



Александар Цветановић, Боривоје Банић

КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

АКАДЕМСКА МИСАО

Александар Цветановић
Боривоје Банић

КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

Академска мисао
Београд, 2007.

Проф. др Александар Цветановић, дипл. грађ. инж.
Боривоје Банић, дипл. грађ. инж.

КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

Рецензенти
Проф. др Зоран Радојковић, дипл. грађ. инж.
Проф. др Аца Милићевић, дипл. грађ. инж.

Издавач
АКАДЕМСКА МИСАО
Београд

Штампа
Планета принт
Београд

Тираж
500 примерака

ИСБН 978-86-7466-292-2

УВОД

Поштоване Колеге,

Овај уџбеник је намењен пре свега Студентима Грађевинског факултета Универзитета у Београду, који у свом плану наставе имају предмет "Коловозне конструкције". Циљ је да се студенти упознају са основним принципима пројектовања и изградње коловозних конструкција и створи основа за њихово самостално усавршавање касније у пракси.

Ако имате примедбе или савете шта треба допунити, изменити или поправити, слободно пошаљите на e-mail адресу: acas@imk.grf.bg.ac.yu.

Аутори

Проф. др Александар Цветановић, дипл. грађ. инж.

Боривоје Банић, дипл. грађ. инж.

САДРЖАЈ:

1 УВОД / 1

- 1.1 ИСТОРИЈСКИ РАЗВОЈ / 1
ЛИТЕРАТУРА / 4

2 САВРЕМЕНИ ТИПОВИ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА / 5

- 2.1 ВРСТЕ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА / 5
- 2.2 ТИПОВИ САВРЕМЕНИХ ФЛЕКСИБИЛНИХ КОЛОВОЗНИХ
КОНСТРУКЦИЈА / 5
- 2.3 ТИПОВИ САВРЕМЕНИХ КРУТИХ КОЛОВОЗНИХ
КОНСТРУКЦИЈА / 9
- 2.4 ГРАЂА КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА / 10
ЛИТЕРАТУРА / 12

3 МАТЕРИЈАЛИ / 13

- 3.1 МАТЕРИЈАЛИ У КОЛОВОЗИМА / 13
- 3.1.1 НЕВЕЗАНИ ЗРНАСТИ МАТЕРИЈАЛИ / 14
- 3.1.2 ВЕЗАНИ МАТЕРИЈАЛИ / 16
- 3.1.2.1 АСФАЛТНИ БЕТОНИ / 21
- 3.1.2.1.1 ДИНАМИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ / 22
- 3.1.2.2 ЦЕМЕНТНИ БЕТОНИ / 32
ЛИТЕРАТУРА / 40

4 ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ / 41

- 4.1 УВОД / 41
- 4.2 НАПОНИ И ДЕФОРМАЦИЈЕ У ФЛЕКСИБИЛНИМ КОЛОВОЗНИМ
КОНСТРУКЦИЈАМА / 42
- 4.2.1 ХОМОГЕНА СРЕДИНА - ПОЛУПРОСТОР / 42
- 4.2.2 АЛТЕРНАТИВНА РЕШЕЊА ПОМОЋУ ДИЈАГРАМА / 44
- 4.2.3 АЛТЕРНАТИВНА РЕШЕЊА НА ОСИ СИМЕТРИЈЕ / 47
- 4.2.4 НЕЛИНЕАРНИ ПОЛУПРОСТОР / 50
- 4.2.4.1 ИТЕРАТИВНИ ПОСТУПАК / 50
- 4.2.4.2 АПРОКСИМАТИВНИ МЕТОД / 52
- 4.2.5 СЛОЈЕВИТИ СИСТЕМИ / 53
- 4.2.5.1 ГРАНИЧНИ УСЛОВИ И УСЛОВИ КОНТИНУИТЕТА / 57
- 4.2.6 ДВОСЛОЈНИ СИСТЕМИ / 60
- 4.2.6.1 ВЕРТИКАЛНИ НАПОНИ / 60
- 4.2.6.2 ВЕРТИКАЛНЕ ДЕФЛЕКСИЈЕ НА ЗАСТОРУ / 62
- 4.2.6.3 ВЕРТИКАЛНЕ ДЕФЛЕКСИЈЕ НА КОНТАКТНОЈ ПОВРШИНИ / 63
- 4.2.6.4 КРИТИЧНА ДИЛАТАЦИЈА ПРИ ЗАТЕЗАЊУ / 63
- 4.2.7 ТРОСЛОЈНИ СИСТЕМ / 68
- 4.3 ВИСКОЕЛАСТИЧНО ПОНАШЊЕ / 69
- 4.3.1 ОСНОВНИ МЕХАНИЧКИ МОДЕЛИ / 69
- 4.3.2 ТЕЧЕЊЕ КАО КАРАКТЕРИСТИКА ВИСКОЕЛАСТИЧНИХ
МАТЕРИЈАЛА / 73

- 4.3.3 МЕТОД РАСПОРЕЂИВАЊА / 74
- 4.3.4 АНАЛИЗА ПОКРЕТНОГ ОПТЕРЕЂЕЊА / 79
ЛИТЕРАТУРА / 82

5 ДОСАДАШЊИ ПОСТУПЦИ ЗА ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ФЛЕКСИБИЛНИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА / 85

- 5.1 ДОСАДАШЊИ ПОСТУПЦИ ЗА ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ФЛЕКСИБИЛНИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА / 85
- 5.2 МЕТОД УДРУЖЕЊА ЗА ЈАВНЕ ПУТЕВЕ И ТРАНСПОРТ - AASHTO / 86
- 5.3 МЕТОД ИНСТИТУТА ЗА АСФАЛТ / 107
- 5.4 МЕТОД КОНЦЕРНА ШЕЛ (SHELL) / 108
- 5.5 МЕТОД САВЕЗНЕ УПРАВЕ ВАЗДУХОПЛОВСТВА (САД) (FAA) / 110
ЛИТЕРАТУРА / 114

6 ПОСТУПАК ЗА ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ФЛЕКСИБИЛНИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА АМЕРИЧКЕ УПРАВЕ ЗА ЈАВНЕ ПУТЕВЕ И ТРАНСПОРТ (AASHTO) 2004. (НОВЕ И РЕКОНСТРУКЦИЈЕ) / 115

- 6.1 ПОСТУПАК ЗА ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ФЛЕКСИБИЛНИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА АМЕРИЧКЕ УПРАВЕ ЗА ЈАВНЕ ПУТЕВЕ И ТРАНСПОРТ (AASHTO) 2004. (НОВЕ И РЕКОНСТРУКЦИЈЕ) / 115
 - 6.1.1 УЛАЗНИ ПОДАЦИ / 117
 - 6.1.1.1 УЛАЗНИ ПОДАЦИ ЗА ПРОБНИ ПРОРАЧУН И УСЛОВИ НА ДЕОНИЦИ / 117
 - 6.1.1.2 НИВОИ ПРОЈЕКТНИХ УЛАЗНИХ ПОДАТАКА / 118
 - 6.1.1.3 ОБРАДА УЛАЗНИХ ПОДАТАКА ТОКОМ АНАЛИЗЕ ПРОЈЕКТНОГ ПЕРИОДА / 119
 - 6.1.1.4 МОДЕЛИ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ УТИЦАЈА У КОЛОВОЗНОЈ КОНСТРУКЦИЈИ / 119
 - 6.1.1.5 ИНКРЕМЕНТИ ОШТЕЂЕЊА И АКУМУЛАЦИЈА ОШТЕЂЕЊА / 120
 - 6.1.1.6 ПРЕДВИЂАЊЕ ОШТЕЂЕЊА / 120
 - 6.1.1.7 ПРЕДВИЂАЊЕ НЕРАВНОСТИ - IRI - МЕЂУНАРОДНИ ИНДЕКС НЕРАВНОСТИ / 124
 - 6.1.1.8 ПРОЦЕЊИВАЊЕ КАРАКТЕРИСТИКА И МОДИФИКОВАЊЕ ПРОРАЧУНА / 124
 - 6.1.1.9 ПРОЈЕКТНА ПОУЗДАНОСТ / 124
 - 6.1.1.10 ОЧЕКИВАНИ ТРОШКОВИ / 125
 - 6.1.2 ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ НОВИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА / 125
 - 6.1.2.1 УЛАЗНИ ПОДАЦИ / 125
 - 6.1.2.2 ПОСТУПАК ЗА ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ФЛЕКСИБИЛНИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА / 128
 - 6.1.2.2.1 ПАРАМЕТРИ ПРОБНОГ ПРОРАЧУНА / 128

- 6.1.2.2.2 МОДЕЛ РЕАКЦИЈА У КОЛОВОЗУ / 129
- 6.1.2.2.3 ПРЕДВИЂАЊЕ ПОНАШАЊА КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ / 131
ЛИТЕРАТУРА / 150

7 УТИЦАЈИ СРЕДИНЕ НА ФЛЕКСИБИЛНЕ КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ / 153

- 7.1 АНАЛИЗА ФАКТОРА СРЕДИНЕ / 153
- 7.1.1 УТИЦАЈИ ТЕМПЕРАТУРЕ И ВОДЕ НА ФЛЕКСИБИЛНЕ КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ / 153
- 7.1.2 ПРОДИРАЊЕ МРАЗА КРОЗ КОЛОВОЗНУ КОНСТРУКЦИЈУ / 160
- 7.1.3 ФАКТОРИ КОЈИ УТИЧУ НА ЛОМОВЕ КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ ПРИ НИСКИМ ТЕМПЕРАТУРАМА / 165
ЛИТЕРАТУРА / 168

8 НАПОНИ И ДЕФОРМАЦИЈЕ У КРУТИМ КОЛОВОЗНИМ КОНСТРУКЦИЈАМА / 169

- 8.1 НАПОНИ И ДЕФОРМАЦИЈЕ У КРУТИМ КОЛОВОЗНИМ КОНСТРУКЦИЈАМА / 169
- 8.1.1 НАПОНИ УСЛЕД САВИЈАЊА / 169
- 8.1.2 ОСЛАЊАЊЕ НЕОГРАНИЧЕНЕ ПЛОЧЕ / 170
- 8.1.3 НАПОНИ САВИЈАЊА У ПЛОЧАМА СЛОБОДНИХ ДИМЕНЗИЈА / 172
- 8.1.4 ТЕМПЕРАТУРНА РАЗЛИКА / 174
- 8.1.5 КОМБИНОВАНИ НАПОНИ / 174
- 8.2 НАПОНИ И ДЕФЛЕКСИЈЕ УСЛЕД ОПТЕРЕЂЕЊА / 175
- 8.2.1 ЈЕДНАЧИНЕ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ НАПОНА И ДЕФЛЕКСИЈА / 176
- 8.3 НАПОНИ УСЛЕД ТРЕЊА / 184
- 8.3.1 ЕФЕКТИ ЗАПРЕМИНСКЕ ПРОМЕНЕ БЕТОНА / 185
- 8.3.1.1 НАПОНИ У БЕТОНУ / 185
- 8.3.1.2 ШИРЕЊЕ ПЛОЧА / 186
- 8.3.1.3 СКУПЉАЊЕ ПЛОЧА / 188
- 8.3.2 ПРИТАЈЕНИ НАПОНИ У БЕТОНУ / 188
- 8.3.3 ТЕРМИЧКЕ ПУКОТИНЕ У СВЕЖЕМ БЕТОНСКОМ КОЛОВОЗУ / 188
- 8.3.4 СУПЕРПОЗИЦИЈА НАПОНА КОД КРУТИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА / 192
- 8.3.5 НАПОНИ У ЧЕЛИКУ / 195
- 8.3.6 ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ МОЖДАНИКА И ПОПРЕЧНИХ СПОЈНИЦА / 196
- 8.3.6.1 ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ МОЖДАНИКА / 197
- 8.3.6.2 ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ СПОЈНИЦА / 200
ЛИТЕРАТУРА / 201

9 ДОСАДАШЊИ ПОСТУПЦИ ЗА ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ КРУТИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА / 203

- 9.1 ДОСАДАШЊИ ПОСТУПЦИ ЗА ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ КРУТИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА / 203
- 9.1.1 ВЕСТЕРГАРДОВ ПОСТУПАК / 203
- 9.1.2 ПОСТУПАК ПИКЕТА И РЕЈА / 204
- 9.1.3 ПОСТУПАК УДРУЖЕЊА ЗА ЈАВНЕ ПУТЕВЕ И ТРАНСПОРТ - ААШТО / 204
ЛИТЕРАТУРА / 224

10 ПОСТУПАК ЗА ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ КРУТИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА АМЕРИЧКЕ УПРАВЕ ЗА ЈАВНЕ ПУТЕВЕ И ТРАНСПОРТ (ААШТО) 2004. (НОВЕ И РЕКОНСТРУКЦИЈЕ) / 225

- 10.1 ПОСТУПАК ЗА ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ КРУТИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА АМЕРИЧКЕ УПРАВЕ ЗА ЈАВНЕ ПУТЕВЕ И ТРАНСПОРТ (ААШТО) 2004. (НОВЕ И РЕКОНСТРУКЦИЈЕ) / 225
- 10.1.1 КРУТЕ КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ СА ПОДУЖНИМ И ПОПРЕЧНИМ СПОЈНИЦАМА / 225
- 10.1.2 КОНТИНУАЛНО АРМИРАНЕ КРУТЕ КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ / 231
ЛИТЕРАТУРА / 234

11 SUPERPAVE СИСТЕМ ЗА ПРОЈЕКТОВАЊЕ БИТУМЕНОМ БЕЗАНИХ МАТЕРИЈАЛА / 235

- 11.1 УВОД / 235
- 11.2 СИСТЕМ SUPERPAVE ЗА ПРОЈЕКТОВАЊЕ МЕШАВИНА / 235
- 11.3 ПРИНЦИПИ ПРОЈЕКТОВАЊА АСФАЛТНИХ МЕШАВИНА ПО SUPERPAVE-y / 237
- 11.3.1 ИЗБОР МАТЕРИЈАЛА / 237
- 11.3.2 ИЗБОР САСТАВА МИНЕРАЛНЕ МЕШАВИНЕ / 238
- 11.3.3 ИЗБОР ПОТРЕБНЕ КОЛИЧИНЕ ВЕЗИВА / 239
- 11.3.4 ОЦЕНА ОСЕТЉИВОСТИ НА ВЛАГУ / 241
ЛИТЕРАТУРА / 242

12 АСФАЛТНЕ МЕШАВИНЕ ПО ХЛАДНОМ ПОСТУПКУ, РЕЦИКЛАЖА И РЕМИКС / 243

- 12.1 ПОВРШИНСКЕ ОБРАДЕ / 243
- 12.1.1 ПРОЈЕКТОВАЊЕ ЈЕДНОСТРУКЕ ПОВРШИНСКЕ ОБРАДЕ / 243
- 12.1.2 ПРИПРЕМНИ РАДОВИ ЗА ИЗРАДУ ЈЕДНОСТРУКЕ ПОВРШИНСКЕ ОБРАДЕ / 246
- 12.1.3 ИЗВОЂЕЊЕ ЈЕДНОСТРУКЕ ПОВРШИНСКЕ ОБРАДЕ / 247
- 12.1.4 ВИШЕСТРУКА ПОВРШИНСКА ОБРАДА / 251
- 12.2 МИКРО ЗАСТОРИ (MICRO SURFACING) / 254

- 12.2.1 ТЕХНОЛОШКИ ПОСТУПАК / 255
- 12.2.2 МАТЕРИЈАЛИ / 257
- 12.2.3 ПРОЈЕКТОВАЊЕ МЕШАВИНЕ / 260
- 12.3 ТАНКИ И УЛТРА-ТАНКИ АСФАЛТИ / 266
- 12.3.1 ДИМАНЗИОНИСАЊЕ / 271
- 12.4 РЕЦИКЛАЖА / 277
- 12.4.1 МОГУЋИ ПОСТУПЦИ РЕГЕНЕРАЦИЈЕ / 278
- 12.4.1.1 РЕГЕНЕРАЦИЈА / 278
- 12.4.1.2 ПРЕРАДА - РЕЦИКЛАЖА (RECYCLE) / 278
- 12.4.1.3 ПРЕРАДА ЗАСТОРА И ПОДЛОГЕ НА ЛИЦУ МЕСТА / 280
- 12.4.1.4 ПРЕРАДА ЗАСТОРА У ЦЕНТРАЛНИМ ПОСТРОЈЕЊИМА / 281
- 12.4.1.5 ПРЕРАДА КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА ПО ХЛАДНОМ ПОСТУПКУ / 281
- 12.4.1.6 ПРЕРАДА ПО ХЛАДНОМ ПОСТУПКУ - ПХП / 283
- 12.4.1.7 ПРЕРАДА АСФАЛТНИХ ЗАСТОРА ПО ТОПЛОМ ПОСТУПКУ / 291
- ЛИТЕРАТУРА / 297

13 СПОЈНИЦЕ / 299

- 13.1 УВОД / 299
- 13.2 ПОПРЕЧНЕ СПОЈНИЦЕ / 299
- 13.2.1 ЕКСПАНЗИОНЕ (ДИЛАТАЦИОНЕ) СПОЈНИЦЕ / 299
- 13.2.2 КОНТРАКЦИОНЕ (ПРИВИДНЕ) СПОЈНИЦЕ / 301
- 13.2.3 ВИТОПЕРНЕ СПОЈНИЦЕ / 302
- 13.2.4 РАДНЕ СПОЈНИЦЕ / 303
- 13.3 ПОДУЖНЕ СПОЈНИЦЕ / 303
- 13.4 ВЕЛИЧИНА ПЛОЧА И РАСПОРЕД СПОЈНИЦА / 304
- 13.5 ЖЉЕБОВИ И ЊИХОВА ИСПУНА / 304
- 13.6 КОСЕ И НА НЕПРАВИЛНОМ РАЗМАКУ ПОСТАВЉЕНЕ СПОЈНИЦЕ / 305
- ЛИТЕРАТУРА / 306

14 ЗАСТОРИ ОД ПРЕФАБРИКОВАНИХ БЕТОНСКИХ ЕЛЕМЕНАТА / 307

- 14.1 ОПШТЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ / 307
- 14.2 КАРАКТЕРИСТИКЕ МАТЕРИЈАЛА / 308
- 14.3 ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ / 309
- 14.4 НАЧИН ПОСТАВЉАЊА БЕТОНСКИХ ЕЛЕМЕНАТА У ЗАСТОР / 310
- 14.5 НАЧИН ПОСТАВЉАЊА БЕТОНСКИХ ЕЛЕМЕНАТА У ЗАСТОР НА ПЕШАЧКИМ СТАЗАМА / 312
- 14.6 ПОСТАВЉАЊЕ ЗАСТОРА ОД БЕТОНСКИХ ЕЛЕМЕНАТА У ДВОРИШТИМА ИНДИВИДУАЛНИХ СТАМБЕНИХ ОБЈЕКТА / 315
- 14.7 ОДВОДЊАВАЊЕ СА ЗАСТОРА ОД БЕТОНСКИХ ЕЛЕМЕНАТА / 320
- 14.8 ПОСТАВЉАЊЕ ИВИЧЊАКА / 322
- 14.9 ОДРЖАВАЊЕ ЗАСТОРА ОД БЕТОНСКИХ ЕЛЕМЕНАТА / 326
- ЛИТЕРАТУРА / 328

15 ТРОШКОВИ / 329

- 15.1 УВОД / **329**
- 15.2 ПОСТУПЦИ АНАЛИЗЕ ТРОШКОВА ВЕКА ТРАЈАЊА / **334**
- 15.3 ПРЕОСТАЛА ВРЕДНОСТ УСЛУГЕ / **335**
- 15.4 АНАЛИЗА ЕКВИВАЛЕНТНИХ УНИФОРМНИХ ГОДИШЊИХ ТРОШКОВА / **336**
- 15.5 ИНФЛАЦИЈА И ДИСКОНТОВАЊЕ / **336**
ЛИТЕРАТУРА / **340**

16 ИЗБОР ТИПА КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ / 341

- 16.1 УВОД / **341**
- 16.2 ОСНОВНИ ФАКТОРИ / **341**
- 16.3 СЕКУНДАРНИ ФАКТОРИ / **343**
- 16.4 СТАНДАРДИ КВАЛИТЕТА / **344**
- 16.5 ЗАКЉУЧАК / **347**
ЛИТЕРАТУРА / **348**

17 ОЦЕНА СТАЊА КОЛОВОЗА / 349

- 17.1 УВОД / **349**
- 17.2 ОЦЕНА НА НИВОУ МРЕЖЕ / **351**
- 17.3 ОЦЕНА НА НИВОУ ПРОЈЕКТА / **351**
- 17.4 ОЦЕНА ОШТЕЋЕНОСТИ / **353**
- 17.5 ОЦЕНА РАВНОСТИ / **354**
- 17.6 ОЦЕНА ОТПОРНОСТИ НА КЛИЗАЊЕ / **356**
- 17.7 ОЦЕНА НОСИВОСТИ / **357**
- 17.7.1 КАРАКТЕРИСТИЧНИ УГИБ / **361**
- 17.7.2 ХОМОГЕНЕ ДЕОНИЦЕ / **362**
- 17.7.3 ПРОРАЧУН ЕЛАСТИЧНИХ КАРАКТЕРИСТИКА КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА ИЗ ИЗМЕРЕНИХ УГИБА / **362**
- 17.8 ОЦЕНА PCI, RCI итд. / **369**
- 17.8.1 PCI (PAVEMENT CONDITION INDEX) – ИНДЕКС СТАЊА КОЛОВОЗА / **369**
- 17.8.2 RCI (RIDING COMFORT INDEX) – ИНДЕКС УДОБНОСТИ ВОЖЊЕ / **385**
- 17.8.3 PCR (PAVEMENT CONDITION RATING) – ОЦЕНА СТАЊА КОЛОВОЗА / **386**
ЛИТЕРАТУРА / **388**

1

УВОД

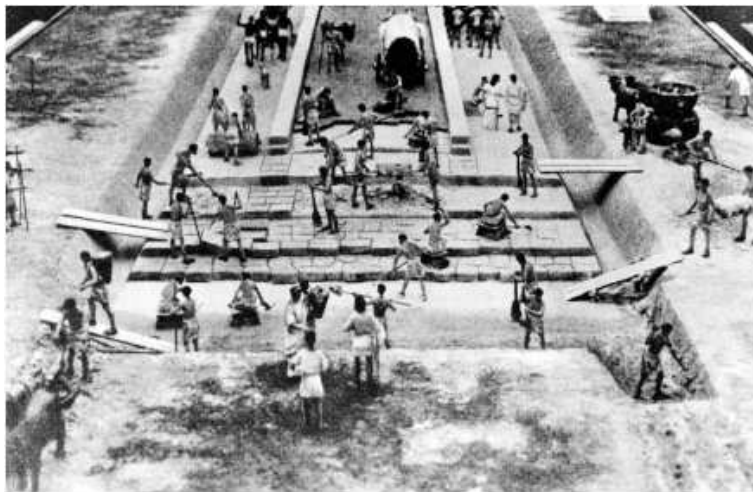
1.1 ИСТОРИЈСКИ РАЗВОЈ

Савремени путеви воде порекло из давнина развоја људског друштва. Још пре проналаска точка, пре отприлике, десет хиљада година, дошло је до масовних сеоба племена, а самим тим и до формирања првих стаза - путева.

Разне цивилизације су у зависности од свог друштвеног и економског развоја, придавале различит значај изградњи путева. Први путеви са обрађеним застором (битуменом) изграђени су у Месопотамији око 3500 година п.н.е. Херодот спомиње пут дуг 2500 km од Сузе до Сарде, ширине од 4.5 до 5.0 m, који се могао прећи за 90 дана, а са прихватиштима за путнике и гласнике. Приступни путеви који су омогућили изградњу пирамида у Египту су изграђени 3000 година п.н.е., а прве поплочане улице у Вавилону 2000 година п.н.е.

Познато је да су ране цивилизације Кинеза, Картагињана, Маја и Ацтека, такође, интензивно градиле путеве.

У протеклим историјским раздобљима, највећи напредак су направили Римљани. На врхунцу њихове цивилизације, разгранати систем војних путева допирао је до најудаљенијих тачака империје. Дужина путева у средњој Европи је износила око 150 000 km, укључујући вијадукте, галерије, мостове и тунеле (тунел Посилло - "Posillipo" је био дуг 770 метара, широк 6 и висок 8 метара).



Слика 1.1 Конструкција римских путева



Слика 1.2 Via Appia

На европском континенту се могу наћи остаци многих од ових путева, који су били направљени од камених плоча, дебљине конструкција и преко 90 сантиметара. Неки од њих су послужили као подлога за касније саграђене, савременије путеве.

У нашим крајевима, још за време првих римских царева, изграђени су војнички путеви [1]. Главни војнички пут, "прастара аретрија", од Дунава до Цариграда, је био изграђен већ 69. године. Водио је Моравском долином и Нишавом у Софију, а отуда, преко такозваних Трајанових врата, долином Марице. Тај пут, ширине око 6 метара, поплочан великим полигоним камењем или набијен песком (отуда назив - калдрма), ишао је обично у правој линији. Ознаке су обележавале миље, са дужином од 1842 метра. Од Београда до Цариграда је била 31 станица, 43 места за измену коња и око 670 миља.

Од пада римске империје, па све до осамнаестог века, јавља се велика стагнација у изградњи путева. Тек појавом познатог француског инжењера Трезагеа (Tresaquet 1716. - 1796.), долази до унапређења поступка њиховог грађења, при чему се преко подлоге од крупнијег, ставља ситнији дробљени камен. У исто време у Енглеској, два шкотска инжењера Томас Телфорд (Thomas Telford) и Џон Мекадам (John McAdam), развијају сличан тип коловозне конструкције. Телфорд ставља у подлогу крупније камење у које уклињује застор од ситног камена. Мекадам користи дробљени камен у више слојева који се сабија у присуству воде. Његов поступак се једино одржао до данашњих дана и служи као подлога на савременим путевима.

После више векова затишја у примени битуменом везаних материјала, 1802. године у Француској су грађени тротоари, а 1850. године и застори на коловозним конструкцијама.

Прва флексибилна коловозна конструкција, у данашњем смислу, је изграђена 1870. године у Америци (Newar "New Jersey" U.S.A.).

Од 1902. године до данашњих дана, захваљујући веома моћној петрохемији, односно њеном мање важном производу - битумену, флексибилне коловозне конструкције су прекриле целу земљину куглу. Данашња годишња производња битумена износи око 30.000.000 тона (1902. године 20.000 тона). Велика већина савремених путева (преко 90%) су од флексибилних коловозних конструкција са битуменом као основним везивом материјала у застору и горњој подлози.

Године 1756. Џон Смитон (John Smeaton), из Енглеске, је открио портланд цемент, а 1875. године у Инвернсу (Inverness), у Шкотској, је саграђена прва бетонска коловозна конструкција.

Последњих тридесет година, због своје економичности и трајности, бетонске, односно, круте коловозне конструкције на аеродромима и аутопутевима почињу да потискују флексибилне (60 до 70% у односу на флексибилне).

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Ђоровић Б., *Istorija Srba*, Београдски издавачко-графички завод, Београд, 1989, стр. 35-39.
- [2] Proudlove J.A. and Batston R.G., *Roads*, Longmans, Green and Co. Ltd., London, 1986.
- [3] O'Flaherty C.A., *Highways Volume 1*, Edvard Arnosld, London, 1986.
- [4] Croney D., *The Design and Performance of Road Pavements*, Her Majesty's Stationery Office, London, 1977.
- [5] Цветановић А., *КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ*, Научна књига, Београд, 1992.

2

САВРЕМЕНИ ТИПОВИ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА

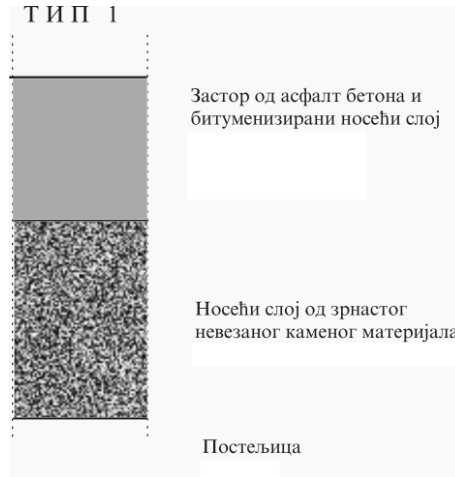
2.1 ВРСТЕ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА

Савремене коловозне конструкције су подељене на две врсте:

- флексибилне коловозне конструкције
- круте коловозне конструкције

2.2 ТИПОВИ САВРЕМЕНИХ ФЛЕКСИБИЛНИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА

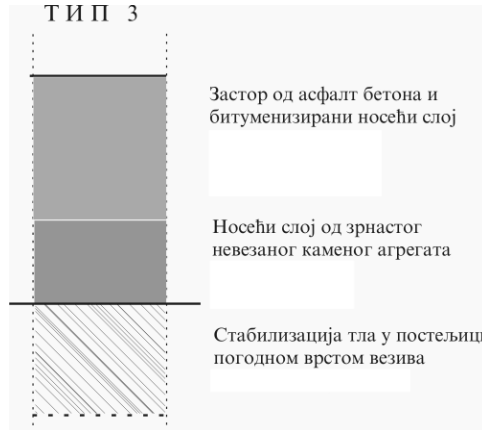
На следећим сликама су приказана типска решења савремених флексибилних коловозних конструкција.



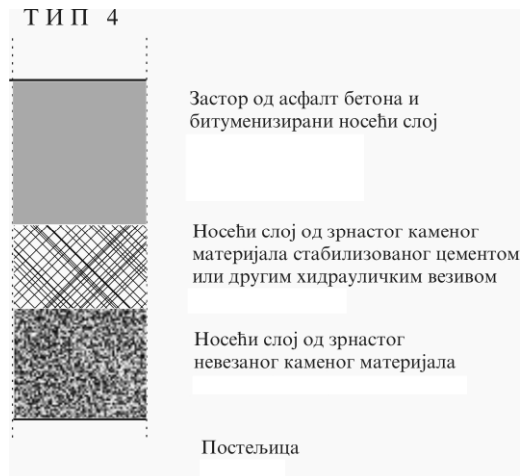
Слика 1.1 Савремене типске коловозне конструкције - ТИП 1



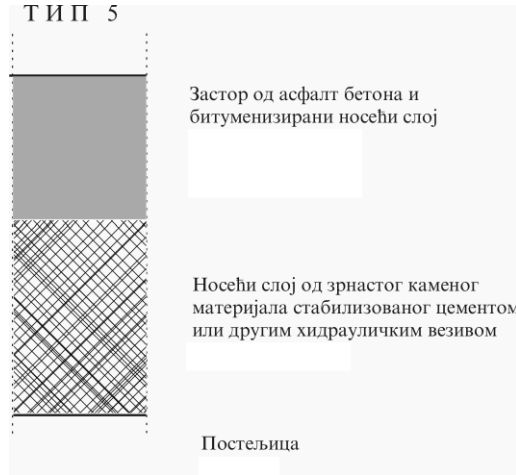
Слика 1.2 Савремене типске коловозне конструкције - ТИП 2



Слика 1.3 Савремене типске коловозне конструкције - ТИП 3



Слика 1.4 Савремене типске коловозне конструкције - ТИП 4



Слика 1.5 Савремене типске коловозне конструкције - ТИП 5

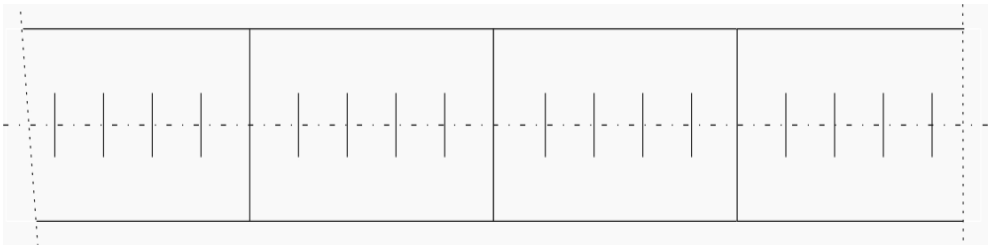


Слика 1.6 Савремене типске коловозне конструкције - ТИП 6

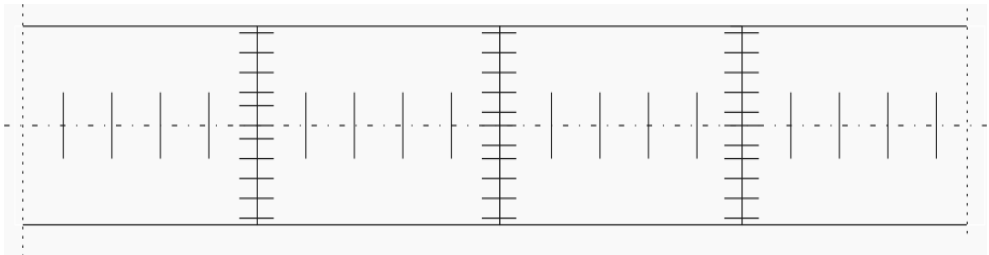
2.3 ТИПОВИ САВРЕМЕНИХ КРУТИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА

Бетонске коловозне конструкције спадају у врсту крутих коловозних конструкција. Састоје се од бетонске неармиране или армиране плоче положене преко подлоге или директно преко постељице.

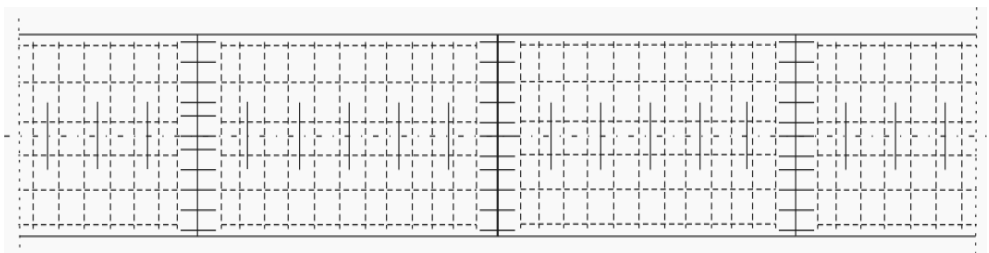
На следећим сликама су приказани неки типови бетонских коловозних конструкција.



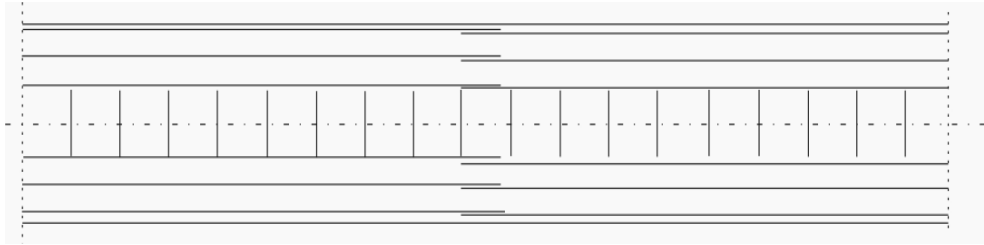
Слика 1.7 Неармирана бетонска плоча без попречних можданика



Слика 1.8 Неармирана бетонска плоча са можданицима у попречним спојницама



Слика 1.9 Армирана бетонска плоча



Слика 1.10 Непрекидно армирана бетонска плоча



Слика 1.11 Преднапрегнуте бетонске плоче

2.4 ГРАЂА КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА

Савремене флексибилне коловозне конструкције су вишеслојне конструкције које се састоје од слојева битуменом везаних материјала - асфалтног застора и носећих слојева. Носећи слојеви се састоје од невезаног зрнастог каменог материјала, везаног зрнастог каменог материјала погодном врстом везива или од комбинације ових материјала. Поједини од ових материјала су произведени и уграђени савременим техничко - технолошким поступцима.

Састав, дебљина и распоред слојева за поједине типове флексибилних коловозних конструкција зависе највише од саобраћајног оптерећења, својстава тла и климатско - хидролошких услова.

Зависно од примене и комбинације одређених врста материјала и њиховог квалитета, састав флексибилних коловозних конструкција се у принципу разликује према врсти подлоге испод битуменом везаних материјала у застору.

Основни материјал за круте коловозне конструкције је цементни бетон (мешавина Портланд везива, агрегата, воде и хемијских додатака - за успоравање везивања, за убрзавање везивања и за увлачење ваздуха). Максимална величина зрна агрегата, код коловоза је од 10 до 40 mm. За производњу бетона се најчешће користи мешавина крупнозрног и ситнозрног агрегата у односу који се одређује претходним пробама експерименталним путем (у овлашћеним лабораторијама). Од тако пројектованих бетонских мешавина се праве плоче, чије су дебљине одређене пројектом коловозне конструкције, на подлози од невезаних агрегата или директно по постелици.

Због своје крутости и великог модула еластичности, у односу на флексибилне коловозне конструкције, оптерећење преносе на велику површину подлоге. С обзиром на ову чињеницу, носивост подлоге има мали утицај на носивост коловоза.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Цветановић А. и Банић Б., *Упутство за одржавање асфалтних застора*, Предузеће за путеве Београд, Београд, 2002.
- [2] Цветановић А. и Банић Б., *Практикум из коловозних конструкција*, Грађевински факултет Београд, www.grf.bg.ac.yu Београд 2006.
- [3] Цветановић А., *КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ*, Научна књига, Београд, 1992.

3

МАТЕРИЈАЛИ

3.1 МАТЕРИЈАЛИ У КОЛОВОЗИМА

У грађевинским конструкцијама се употребљавају разни материјали, нарочито у данашње време, кад се показује тежња за искоришћавањем, чак и индустријског отпада, као грађевинског материјала. Доминантну улогу у производњи савремених грађевинских материјала чине пластичне масе. Овакви материјали се најчешће користе као побољшања постојећим, локалним изворним материјалима.

Ипак, у класичном смислу, а на основу понашања под оптерећењем, материјали који се користе у коловозним конструкцијама се деле на:

- невезане зрнасте материјале
- везане материјале
- асфалтне бетоне
- цементне бетоне

Карактеристике наведених материјала су приказане у табели 3.1.

Табела 3.1 Врсте и карактеристике материјала

Карактеристике	М а т е р и ј а л и			
	Невезани зрнасти материјали	Везани материјали	Асфалтни бетони	Цемент бетони
Врста материјала	Дробљени камен Шљунак Тло Механички стабилизовани материјали Битуменом стабилизовани материјали Хемијски модификовани материјали Цементом, кречом или пепелом модификовани материјали	Кречом стабилизовани материјали Цементом стабилизовани материјали Пепелом стабилизовани материјали	Асфалтни бетони Ливени асфалти	Цемент бетони
Битне карактеристике	Укљештењем зрна агрегата ствара се чврстоћа на смицање Безначајна чврстоћа на затезање	Хемијским везивањем и укљештењем зрна настаје отпорност на смицање. Поседују значајну чврстоћу на затезање	Везиво и укљештење зрна дају значајну чврстоћу на смицање. Својства зависе од температуре	Везиво и укљештење зрна дају велику чврстоћу на смицање
Облици оштећења	Деформације и дезинтеграције	Пукотине и чупање агрегата	Пукотине и трајне деформације	Пукотине
Пројектни параметри	Модули, Поасонови коеф. степен анизотропије	Модули, Поасонови коефицијенти	Модули, Поасонови коефицијенти	Чврстоће на затезање и притисак
Критеријуми понашања	Параметри из техничких услова	Отпорност на замор	Отпорност на замор	Отпорност на замор и чврстоће

3.1.1 НЕВЕЗАНИ ЗРНАСТИ МАТЕРИЈАЛИ

Невезани зрнасти материјали се састоје од песковито шљунковитих или дробљених камених материјала дефинисаног гранулометријског састава. На тај начин се омогућава њихова механичка стабилизација, уградљивост и

збијеност. Карактеристике ових материјала у погледу гранулометријског састава и механичких карактеристика су приказане у стандардима.

Модификовани зрнасти материјали представљају зрнасте материјале чије су карактеристике (нпр. пластичност - крутост) побољшане додатком везива.

Максималне и минималне величине зрна за поједине врсте материјала су:

- шљунак - зрна између 2 и 60 mm
- песак - зрна између 0.06 и 2 mm
- прашина - зрна између 0.002 и 0.06 mm
- глина - сва зрна мања од 0.002 mm

Песак и прашина се даље деле на крупнозрне, средње и ситне фракције:

- крупнозрни песак - зрна између 0.6 и 2 mm
- средњезрни песак - зрна између 0.2 и 0.6 mm
- ситнозрни песак - зрна између 0.06 и 0.2 mm
- крупнозрна прашина - зрна између 0.02 и 0.06 mm
- средњезрна прашина - зрна између 0.006 и 0.02 mm
- ситнозрна прашина - зрна између 0.002 и 0.006 mm

Карактеристични гранулометријски састави невезаних материјала у доњој и горњој подлози (по AASHTO препорукама M147-65-1980) су приказани у табели 3.2. Појас гранулометријског састава А се првенствено користи за подлоге, Б, Ц и Д за доње подлоге, а Е и Ф за засторе код путева који немају хабајући слој од везаних материјала.

Табела 3.2 Гранични појасеви гранулометријског састава невезаних материјала

Величина отвора сита	Проценти пролаза					
	А	Б	Ц	Д	Е	Ф
50 mm	100	100				
25 mm		75-95	100	100	100	100
9.5 mm	30-60	40-75	50-85	60-100		
4.75 mm	25-55	30-60	35-65	50-85	55-100	70-100
2 mm	15-40	20-45	25-50	40-70	40-100	55-100
425 μ m	8-20	15-30	15-30	25-45	20-50	30-70
75 μ m	2-8	5-20	5-15	5-20	6-20	8-25

Остали захтеви:

1. Крупнозрни агрегати (> 2.0 mm) морају да имају хабање по методу Лос Анђелес мање од 20%
2. Да фракције које пролазе кроз сито 450 μ m имају границу течења не већу од 25% и индекс пластичности не већи од 6%.

Граничне криве просејавања за материјале у доњој и горњој подлози за аутопутеве и аеродроме по ASTM препорукама D2940-74-1985, су приказане у табели 3.3.

Према Приручнику за димензионисање института за асфалт [1], захтева се носивост на доњој подлози од $CBR \geq 20\%$ и горњој подлози од $CBR \geq 80\%$.

Табела 3.3 Гранични појасеви просејавања агрегата за аутопутеве и аеродроме

Величина отвора сита	Проценти пролаза	
	Подлога	Доња подлога
50 mm	100	100
37.5 mm	95-100	90-100
19 mm	70-92	
9.5 mm	50-70	
4.75 mm	35-55	30-60
600 μm	12-25	
75 μm	0-8	0-12

Остали захтеви:

1. Крупнозрни агрегати да буду чврсти и дуготрајни
2. Да фракције које пролазе кроз сито од 75 μm не прелазе 60% од фракција које пролазе кроз сито од 600 μm
3. Да фракције које пролазе кроз сито од 425 μm имају границу течења не већу од 25% и индекс пластичности не већи од 4%

Поасонов коефицијент је од 0.1 до 0.5 (најчешће 0.35). Повратни или неки други модул зависе од збијености, влажности и нивоа подземних вода.

Модул директно зависи од примењеног напона:

$$E = k_1 \cdot \theta^{k_2} \quad (3.1)$$

где је:

E - модул [МПа]

θ - збир главних напона [МПа]

k_1, k_2 - експериментално одређени коефицијенти

3.1.2 ВЕЗАНИ МАТЕРИЈАЛИ

Везани материјали се добијају мешањем зрнастих материјала са неким од везива као што су цемент, креч или неко друго хидрауличко везиво, који значајно побољшавају чврстоћу на затезање основног материјала.

Граничне криве просејавања за зрнасте материјале стабилизоване цементом приказане су у табели 3.4. Чврстоћа на притисак после 7 дана би требало да буде између 5 и 7 N/mm². Учешће количине цемента по маси, у стабилизацији, зависи од гранулометријског састава. Код песковитог шљунка или дробине износи од 3.5 до 7%, а код песковитих и прашинасто глиновитих од 7 до 10%.

Табела 3.4 Гранични појасеви за цементом стабилизоване материјале

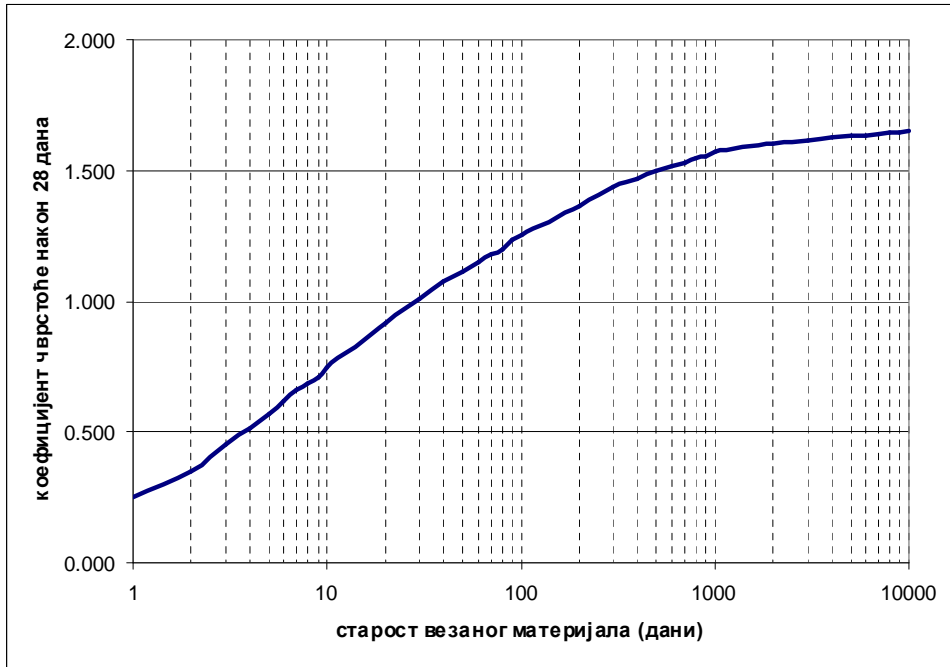
Величина отвора сита	Проценти пролаза по маси
50 mm	100
37.5 mm	95-100
20 mm	45-100
10 mm	35-100
5 mm	25-100
2.36 mm	15-90
600 μm	8-65
300 μm	5-40
75 μm	0-10

Гранични појасеви за криве просејавања за агрегате (дробљене, песковито-шљунковите или шљаку) са максималном величином зрна од 20 до 40 mm, приказане су у табели 3.5. Чврстоћа на притисак после 7 дана би требало да износи између 6(10) и 10(15) N/mm². Чврстоћу цементом стабилованих материјала и мршаваг бетона, због поузданости резултата, требало би у принципу испитивати на цилиндрима основе од 15 cm (међутим, у пракси је уобичајено 10 cm). Утицај неговања и старења на цементом стабиловане и мршаве бетоне је приказан на слици 5.1[2].

Табела 3.5 Гранични појасеви за криве просејавања за мршаве бетоне

Величина сита	Проценти пролаза по маси	
	40 mm	20 mm
50 mm	100	
37.5 mm	95-100	100
20 mm	45-80	95-100
5 mm	25-50	35-55
600 μm	8-30	10-35
150 μm	0-8 ⁺	0-8 ⁺

⁺ 0-10 за дробљене агрегате



Слика 3.1 Утицај старости на чврстоћу на притисак цементом везаних материјала

Поасонов коефицијент мало зависи од дебљине слоја и приближно износи око 0.20.

Уобичајене корелације између модула еластичности и чврстоће на притисак са слободним бочним ширењем су:

- $E = 1814 \cdot UCS^{0.88} + 3500$ за дробљене материјале везане цементом
- $E = 2240 \cdot UCS^{0.88} + 1100$ за природне шљунковите материјале везане цементом

где је:

E - модул еластичности [MPa]

UCS - чврстоћа на притисак са неспреченим бочним ширењем [MPa]

Оријентационе вредности за цементом везане материјале су приказане у табели 3.6.

Табела 3.6 Оријентационе вредности модула еластичности за цементом везане материјале

Стабилизовани материјали цементом	Модул еластичности, [GPa]		
	Динамички	Статички	Средњи
Стаб. зрнасто тло	18	10	14
Стаб. прашинасто тло, PI<10	7	4	5
Стаб. глиновито тло, PI>10	1	0	0.5
Стаб. песковито-шљун. материјал	23	13	18
Нормални мршави бетон	27	19	23
Јачи мршави бетон	30	34	27

Индиректна чврстоћа на затезање износи 1/10 до 1/8 од UCS. Карактеристичне вредности модула су дате у табели 3.7. Оријентациона вредност дилатације за један милион понављања оптерећења износи 50% од статичке дилатације при лому узорка.

Табела 3.7 Оријентационе вредности еластичних карактеристика

Карактеристике материјала	Невезани зрнасти материјали						Везани материјали ¹		
	Квалитетни дробљени камени материјали		Квалитетни шљунковити материјали у подлози		Шљунковити материјали у тампону				
Карактеристике	Невезан	Везан	Невезан	Везан	Невезан	Везан	Дробљени камени материјал са 2-3% везива	Шњунак у подлози са 4-5% везива	Шљунак у тампону са 4-5% везива
Вертикални модул, [MPa]	150-550	200-700	150-500	200-500	150-400	150-450	3000-8000	3000-7000	1500-3000
Типичне вредности вертикалног модула, [MPa]	500 ² 350	500 ² 350	400 ² 300	400 ² 300	300 ² 250	300 ² 250	5000	5000	2000
Степен анизотропије ³	2	2	2	2	2	2	1	1	1
Поасонов коефицијент	0.25-0.4	0.25-0.4	0.25-0.4	0.25-0.4	0.25-0.4	0.25-0.4	0.1-0.3	0.1-0.3	0.1-0.3
Типичне вредности Поасоновог коефицијента	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.2	0.2	0.2

1. Основно везиво је цемент, али може и креч, летећи пепео или зрнаста згура
2. Модификовани метод збијања, остале вредности важе за стандардно збијање
3. Степен анизотропије = вертикални / хоризонтални модул

У просеку модул од око 2000 МПа имају цементом стабилизирани шљунковито песковити материјали, крупнозрни дробљени агрегати или "лако" стабилизирани квалитетни дробљени камени материјали. Стабилизирани квалитетни дробљени камени материјали или квалитетни шљунковито песковити материјали имају модул од око 5000 МПа. Мршави и ваљани бетони имају модул од око 10 000 МПа и чврстоћу на притисак после 28 дана од 5 до 7 МПа.

Битуменом везани материјали се по месту и начину справљања деле на две основне групе:

- мешавине које се производе у постројењима по врућем или хладном поступку (стационарна постројења или покретна)
- мешавине које се производе по хладном поступку (стационарна постројења или покретна) и мешавине које се производе на лицу места

Најпознатији везани материјали добијени по врућем поступку су:

- асфалтни бетони
- скелетни мастикс асфалти
- битуменизирани материјали
- ливени асфалти

Најпознатији везани материјали добијени по хладном поступку су:

- површинске обраде (једнослојне и двослојне)
- микро асфалти
- битуменски малтери (slurry seal)
- мешавине за крпљење рупа у коловозима

Према још важећим стандардима, гранични појасеви за гранулометријске саставе битуменизираних материјала су приказани у табелама 3.8а и 3.8б.

Табела 3.8а Гранични појасеви мешавина за битуменизиране материјале

Величина квадратног отвора сита	BHNS-16	BNS-22	BNS-22s	BNS-32	BNS-32s
	пролази кроз сита, [%]				
0.09 mm	5-12	4-14	5-11	3-12	4-10
0.25 mm	9-30	7-37	8-17	5-18	7-15
0.71 mm	15-40	12-53	13-27	9-27	12-23
2.00 mm	26-55	21-65	24-40	17-40	20-35
4.00 mm	38-70	30-74	34-53	24-52	29-46
8.00 mm	58-88	44-85	50-70	34-68	41-62
11.2 mm	74-98	54-92	61-81	42-78	50-71
16.0 mm	95-100	70-100	75-94	53-90	61-82
22.4 mm	100	97-100	97-100	70-100	76-94
31.5 mm		100	100	97-100	97-100
45.0 mm				100	100
Технолошке дебљине, [cm]	min 4.5 max 6.5	min 6.0 max 10.0	min 6.0 max 10.0	min 6.0 max 14.0	min 7.0 max 14.0

Табела 3.86 Гранични појасеви мешавина за битуменизиране материјале

Величина квадратног отвора сита	DNBS крупнозрни	DBNS средњезрни	DBNS ситнозрни
	пролази кроз сита, %		
0.09 mm	2-15	2-20	6-20
0.25 mm	5-23	8-32	10-65
0.71 mm	9-30	16-45	38-90
2.00 mm	15-40	30-65	60-100
4.00 mm	24-52	46-81	67-100
8.00 mm	37-68	64-94	75-100
11.2 mm	47-80	75-100	78-100
16.0 mm	59-95	85-100	83-100
22.4 mm	73-100	90-100	90-100
31.5 mm	87-100	97-100	100
45.0 mm	100	100	
Технолошке дебљине, [cm]	мин 12.0	мин 10.0	мин 10.0

3.1.2.1 АСФАЛТНИ БЕТОНИ

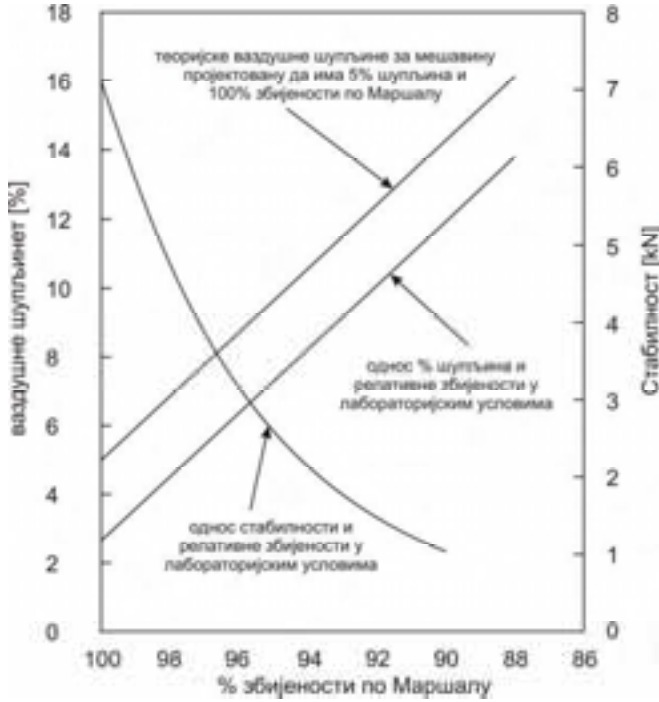
Асфалтни бетони су мешавина битуменског везива и агрегата, који чврстоћу остварују трењем између зрна агрегата и везивањем битумена за агрегат. Најчешћи облик оштећења застора од асфалтног бетона су трајне деформације: колотрази и пукотине изазване замором.

Према још важећем стандарду, гранични појасеви гранулометријских линија за асфалтне бетоне су приказани у табели 3.9.

Табела 3.9 Гранични појасеви за асфалтни бетонске мешавине

Величина квадратног отвора сита	AB-4	AB-8	AB-11	AB-11s	AB-16	AB-16s	AB-22s
	пролази кроз сита, %						
0.09 mm	8-18	4-12	3-12	3-11	3-12	3-10	2-8
0.25 mm	17-33	11-27	8-28	8-18	8-25	8-17	7-14
0.71 mm	55-75	20-41	16-38	16-30	15-36	15-28	11-23
2.00 mm	95-100	38-56	31-54	31-48	27-49	27-43	20-36
4.00 mm	100	56-74	49-69	49-65	40-62	40-56	30-47
8.00 mm		96-100	75-90	75-87	60-80	60-75	46-64
11.2 mm		100	97-100	97-100	74-90	74-86	57-75
16.0 mm			100	100	97-100	97-100	72-87
22.4 mm					100	100	97-100
31.5 mm							100
Технолошке дебљине, [cm]	min 2.0 max 3.0	min 3.0 max 4.0	min 3.5 max 5.0	min 4.0(5.0) max 6.0	min 5.0 max 6.0	min 6.0 max 7.5	min 7.0 max 8.5

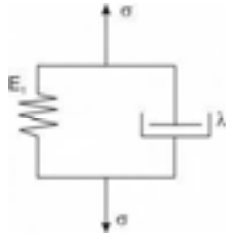
Типичан однос између збијања, стабилности и шупљина испуњених ваздухом је приказан на слици 3.2 [3].



Слика 3.2 Однос између збијености, стабилности и шупљина испуњених ваздухом за одређену асфалтно бетонску мешавину

3.1.2.1.1 ДИНАМИЧКЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ

За проучавање динамичких карактеристика флексибилних коловозних конструкција, веома је важно познавати појам комплексног модула, чија је механичка апроксимација приказана помоћу Келвиновог модела.



Слика 3.3 Келвинов модел под променљивим оптерећењем

Синусно променљиво оптерећење може бити приказано као комплексни број [7]:

$$\sigma = \sigma_o \cdot \cos(\varpi \cdot t) + i \cdot \sigma_o \cdot \sin(\varpi \cdot t) = \sigma_o \cdot e^{i\varpi t} \quad (3.2)$$

где је:

σ_o - амплитуда напона

ω - угаона брзина

Веза угаоне брзине и фреквенције f је:

$$\varpi = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (3.3)$$

Под претпоставком да су унутрашњи ефекти занемарљиви, основна диференцијална једначина може се представити као:

$$\lambda_1 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + E_1 \cdot \varepsilon = \sigma_o \cdot e^{i\varpi t} \quad (3.4)$$

где је:

λ_1 - Трутонов (Trouton) коефицијент вискозитета [6]

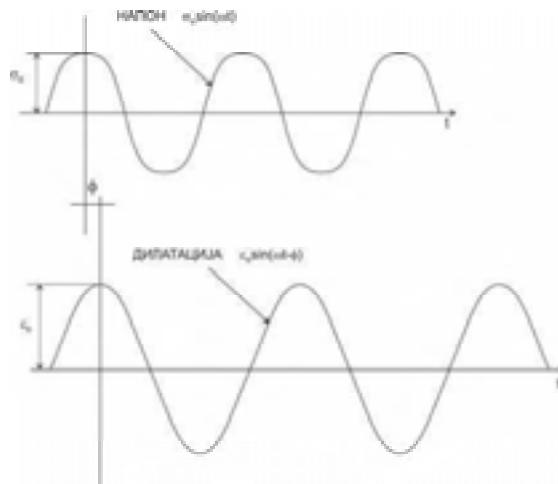
Решење једначине 3.4 се може приказати као:

$$\varepsilon = \varepsilon_o \cdot e^{i(\varpi t - \phi)} \quad (3.5)$$

где је:

ε_o - амплитуда дилатације

ϕ - фазни угао у степенима (угао закашњења дилатације за напоном)(сл. 3.4)



Слика 3.4 Закашњење дилатације за напоном

Када се једначина 3.5 уведе у једначину 3.4 добија се:

$$i \cdot \lambda_1 \cdot \varepsilon_o \cdot \varpi \cdot e^{i(\varpi t - \phi)} + E_1 \cdot e^{i(\varpi t - \phi)} = \sigma_o \cdot e^{i \cdot \varpi \cdot t} \quad (3.6)$$

После скраћивања за $e^{i \cdot \varpi \cdot t}$, са обе стране знака једнакости у једначини 3.6 и изједначавања реалног дела са σ_o , а имагинарног са 0, следеће једначине се могу решити по ϕ и ε_o :

$$\lambda_1 \cdot \varepsilon_o \cdot \varpi \cdot \sin \phi + E_1 \cdot \varepsilon_o \cdot \cos \phi = \sigma_o \quad (3.7a)$$

$$\lambda_1 \cdot \varepsilon_o \cdot \varpi \cdot \cos \phi - E_1 \cdot \varepsilon_o \cdot \sin \phi = 0 \quad (3.7b)$$

Решења једначина 3.7 је:

$$\varepsilon_o = \frac{\sigma_o}{\sqrt{E_1^2 + (\lambda_1 \cdot \varpi)^2}} \quad (3.8a)$$

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\lambda_1 \cdot \varpi}{E_1} \quad (3.8b)$$

Може се видети из једначине 3.8b да је за еластични материјал $\lambda_1 = 0$, тако да је и $\phi = 0$. За вискозни материјал, $E_1 = 0$, а $\phi = \frac{\pi}{2}$. Стога, фазни угао за вискоеластични материјал улази у опсег од 0 до $\frac{\pi}{2}$. Комплексни модул E^* је дефинисан као:

$$E^* = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\sigma_o \cdot e^{i \cdot \varpi \cdot t}}{\varepsilon_o \cdot e^{i(\varpi t - \phi)}} \quad (3.9)$$

односно:

$$E^* = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \cdot \cos \phi + i \cdot \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \cdot \sin \phi \quad (3.10)$$

Динамички модул представља апсолутну вредност комплексног модула:

$$|E^*| = \sqrt{\left(\frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \cdot \cos \phi\right)^2 + \left(\frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \cdot \sin \phi\right)^2} = \frac{\sigma_o}{\varepsilon_o} \quad (3.11)$$

Може се приметити у једначини 3.10 да је реални део једнак еластичној крутости, а имагинарни део унутрашњем пригушењу.

Већина вискоеластичних материјала не може се приказати помоћу једног Келвиновог модела. Најчешће, механичка природа проблема који треба решити захтева серију Келвинових модела. Комплексан модул лако може

бити развијен у Фуријеов ред (Fourier) који је сличан Лапласовој трансформацији.

Фуријеова трансформација је приказана као:

$$L[F(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} F(t) \cdot e^{-i\omega t} dt \quad (3.12)$$

Ради поједностављења, исти запис је употребљен и за Лапласову трансформацију. Фуријеова трансформација је први извод напона:

$$\begin{aligned} L\left(\frac{d\sigma}{dt}\right) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\sigma}{dt} \cdot e^{-i\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} e^{-i\omega t} d\sigma = \dots \\ &\dots = \sigma \cdot e^{-i\omega t} \Big|_{-\infty}^{\infty} - \int_{-\infty}^{\infty} \sigma d(e^{-i\omega t}) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Ако је у почетном тренутку материјал неоптерећен, односно $\sigma = 0$ кад је $t = -\infty$, тада је први извод једнак 0, односно:

$$L\left(\frac{d\sigma}{dt}\right) = i \cdot \omega \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \sigma \cdot e^{-i\omega t} dt = i \cdot \omega \cdot \bar{\sigma} \quad (3.14)$$

Лако се може доказати да Фуријеова трансформација $\frac{\partial^n \sigma}{\partial t^n}$, скраћено записана као $D^n \sigma$, допушта замену D са $i\omega$ и σ са $\bar{\sigma}$, исто као што Лапласова трансформација допушта замену D са p:

$$L[D^n \sigma] = (i \cdot \omega)^n \bar{\sigma} \quad (3.15)$$

Вишегодишња практична истраживања којима руководи Вицак (Witczak) су показала да динамички модул асфалтних мешавина може бити приказан помоћу "мастер криве" и то помоћу израза:

$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log t,)}} \quad (3.16)$$

где је:

t_r - редуковано време оптерећивања на референтној температури (21.1°C)

δ - минимална вредност E^*

$\delta + \alpha$ - максимална вредност E^*

β, γ - параметри који описују нагиб сигмоидалне функције

"Мастер криве" се конструишу по принципу суперпозиције време-температура. Подаци су на различитим температурама или изнад референтне "мастер криве" или испод. "Мастер крива" за модуле, конструисана према овим принципима, описује зависност материјала у функцији времена и температуре.

Фактор положаја параметара материјала у односу на референтну "мастер криву" је:

$$a(T) = \frac{t}{t_r} \quad (3.17)$$

где је:

$a(T)$ - фактор положаја у функцији од температуре

t - време трајања оптерећења на жељеној температури

t_r - време трајања оптерећења на референтној температури

T - температура

Основна изучавања вискоеластичних материјала предлажу линеарну везу између $\log a(T)$ и T (у степенима по Фаренхајту), искуства су показала да је прецизнија веза помоћу полинома другог реда између логаритма фактора положаја и температуре:

$$\log a(T_i) = a \cdot T_i^2 + b \cdot T_i + c \quad (3.18)$$

где је:

$a(T_i)$ - фактор положаја у функцији од температуре T_i

T_i - посматрана температура ($^{\circ}\text{F}$) ($1^{\circ}\text{F} = (1^{\circ}\text{C} - 32) \cdot 5/9$)

a , b и c - коефицијенти полинома другог реда

Ако је вредност коефицијента "а" блиска нули, фактор положаја прелази у класичну линеарну функцију.

За различите нивое улазних података који се користе при димензионисању флексибилних коловозних конструкција у поступку који је описан у **глави 6**, дефинисана у су три нивоа података релевантних за формирање "мастер криве" за модуле.

За ниво 1, користе се подаци лабораторијски мерених вредности. За нивое 2 и 3, кристи се Вицакова формула за предвиђање динамичког модула E^* . Мастер крива за ниво 1 је развијена на основу нумеричке анализе мерених података, тако да они могу да се употребе за њено конструисање. Установљена је веза између вискозитета везива и температуре. То је изведено тако што је крутост битумена преведена у вискозитет за сваку релевантну температуру:

$$\eta = \frac{G^*}{10} \cdot \left(\frac{1}{\sin \delta} \right)^{4.8628} \quad (3.19)$$

$$\log \log \eta = A + VTS \cdot \log T_R \quad (3.20)$$

где је:

η - вискозитет везива у [сР]

G^* - комплексни модул смицања битумена [Pa]

δ - фазни угао битумена у степенима

A, VTS - регресиони параметри

T_R - температура у Ранкиновим степенима

($1 T_R = 1 T_F + 460$)(T_F - степени према Фаренхајту)

"Мастер крива" за анализу на нивоу 2 и 3 је развијена на основу једначине коју је установио Вицак (Witzcak):

$$\begin{aligned} \log |E^*| = & -1.249937 + 0.029232 \cdot \rho_{200} - 0.001767 \cdot (\rho_{200})^2 - \dots \\ & \dots - 0.002841 \cdot \rho_4 - 0.058097 \cdot V_a - 0.08022 \cdot \frac{V_{b,eff}}{V_{b,eff} + V_a} + \dots \quad (3.21) \\ & \dots + \frac{3.871977 - 0.0021 \cdot \rho_4 + 0.003958 \cdot \rho_{38} - 0.000017 \cdot (\rho_{38})^2 + 0.00547 \cdot \rho_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.313351 \log(f) - 0.393532 \cdot \log(\eta))}} \end{aligned}$$

где је:

$|E^*|$ - динамички модул [10^5 psi] (1 psi = 6900 Pa)

η - вискозитет везива жељене старости и температуре [10^6 Poise]

f - фреквенција оптерећења [Hz]

V_a - садржина шупљина у узорку [%](v/v)

$V_{b,eff}$ - ефективна садржина везива [%](v/v)

ρ_{34} - кумулативни остатак на ситу од 19 mm [%]

ρ_{38} - кумулативни остатак на ситу од 9.5 mm [%]

ρ_4 - кумулативни остатак на ситу од 4.76 mm [%]

ρ_{200} - пролаз на ситу 0.075 mm [%]

Вицакова једначина за предвиђање модула [8] 3.21 може бити приказана у истом облику као и једначина 3.16:

$$\log |E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma (\log t_r)}} \quad (3.22)$$

где је:

$|E^*|$ - динамички модул [10^5 psi]

δ - минимална вредност E^*

$$\begin{aligned} \delta = & -1.249937 + 0.029232 \cdot \rho_{200} - 0.001767 \cdot (\rho_{200})^2 - \dots \\ & \dots - 0.002841 \cdot \rho_4 - 0.058097 \cdot V_a - 0.08022 \cdot \frac{V_{b,eff}}{V_{b,eff} + V_a} \quad (3.22a) \end{aligned}$$

$$\alpha = 3.871977 - 0.0021 \cdot \rho_4 + 0.003958 \cdot \rho_{38} - 0.000017 \cdot (\rho_{38})^2 + 0.00547 \cdot \rho_{34} \quad (3.22b)$$

$$\beta = -0.603313 - 0.393532 \cdot \log(\eta_T) \quad (3.22b)$$

$$\gamma = -0.313351 \quad (3.22r)$$

где је:

t_r - редуковано време наношења оптерећења на референтној температури

V_a - садржина шупљина у узорку [%](v/v)

$V_{b,eff}$ - ефективна садржина везива [%](v/v)

ρ_{34} - кумулативни остатак на сити од 19 mm [%]

ρ_{38} - кумулативни остатак на сити од 9.5 mm [%]

ρ_4 - кумулативни остатак на сити од 4.76 mm [%]

ρ_{200} - пролаз на сити 0.075 mm [%]

η_{Tr} - вискозитет битуменског филма на референтној температури [10^6 Poise]

У недостатку одговарајуће лабораторијске опреме, модули крутости асфалтно бетонских мешавина се могу одредити и помоћу рачунарског програма (BANDS 2.0) [9].

The screenshot shows the 'Asphalt Mix Performance (CIPM) v. 2.0' software window. It has two radio buttons: 'Calculate Fatigue Life' (selected) and 'Calculate Fatigue Strain'. Below is a table for 'Input Parameters' with columns for Parameter, Unit, Range, From, To, and Step. The parameters include Loading Time (0.5 seconds), Temperature of Bitumen (28 °C), Penetration Value (50 0.1mm), Penetration Temperature (25 °C), Softening Point (52 °C), Volume Percentage Bitumen (12 %), Volume Percentage Aggregate (83 %), and Fatigue Strain (500 μm/m). Below the table is a 'Results' section with a table showing Penetration Index (-8.7), Bitumen Stiffness (23,500 MPa), Asphalt Mix Stiffness (4,000 MPa), and Fatigue Life x 1000 (29,700). At the bottom are buttons for 'Results Table', 'Results Report', 'Help', and 'Cancel'.

Parameter	Unit	Range	From	To	Step
Loading Time	Seconds	?	0.5		
Temperature of Bitumen	°C	?	28		
Penetration Value	0.1mm	?	50		
Penetration Temperature	°C	?	25		
Softening Point	°C	?	52		
Volume Percentage Bitumen	%v/v	?	12		
Volume Percentage Aggregate	%v/v	?	83		
Fatigue Strain	μm/m	?	500		

Results	
Penetration Index	-8.7
Bitumen Stiffness MPa	23,500
Asphalt Mix Stiffness MPa	4,000
Fatigue Life x 1000	29,700

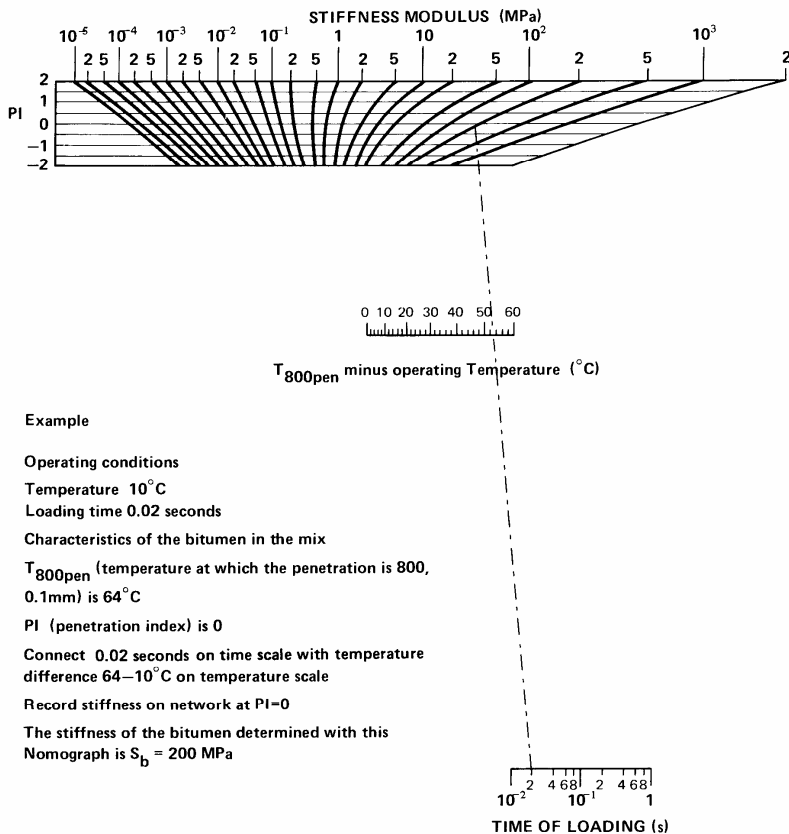
Слика 3.5 Пример улазних и излазних података у компјутерском програму BANDS 2.0

Исто се може одредити помоћу дијаграма са слика 3.6 и 3.7 [5] које је објавио концерна Шел.

Улазни подаци за коришћење дијаграма са слике 3.6 су:

- време трајања оптерећења при проласку стандардне осовине. Може се узети да је $t=1/V$ секунди, V [km/h]

- максимална температура асфалтног коловоза у Целзијусовим степенима
- индекс пенетрације битумена PI
- T_{800pen} , температура у Целзијусовим степенима при којој је пенетрација (100g, 5s) битумена 800 (0.1 mm)

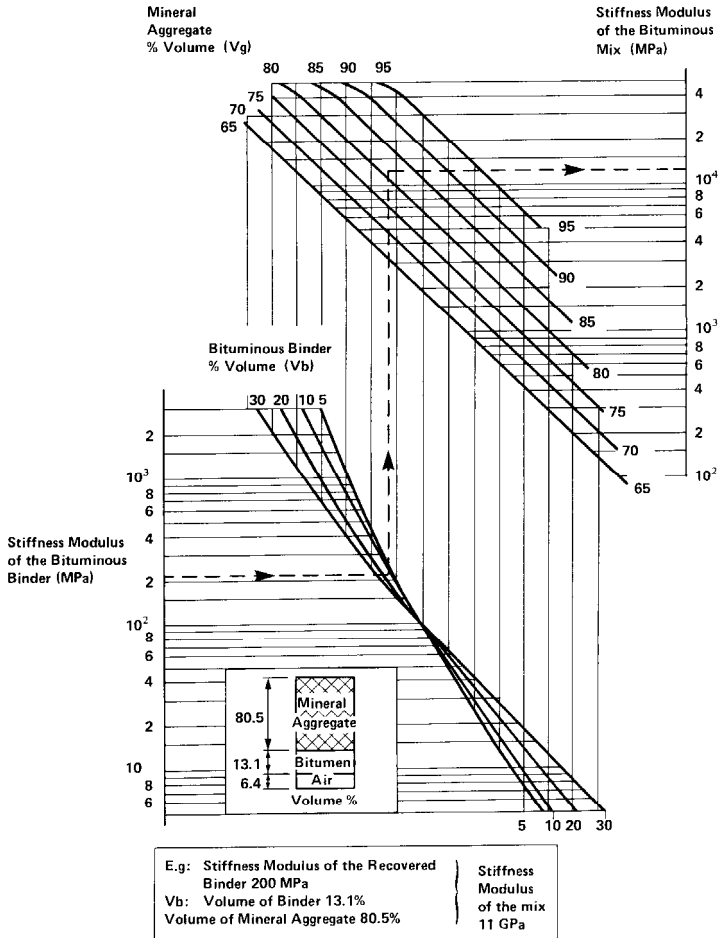


Слика 3.6 Дијаграм Ван дер Поел-а за одређивање модула крутости битумена

Улазни подаци за коришћење дијаграма са слике 3.7 су:

- E_{bit} - модул крутости битумена одређен са дијаграма са слике 3.6
- V_b - запремина битумена у асфалтно бетонској мешавини
- V_{agg} - запреминско учешће агрегата у асфалтној маси изражено у процентима

- за битумене мале крутости, где је потребна екстраполација дијаграма помоћу кога се одређује крутост мешавине, модул крутости мешавине веома зависи од карактеристика агрегата, а посебно од облика зрна агрегата



Слика 3.7 Бонареов дијаграм (Vonnare) за предвиђање модула крутости асфалтно бетонске мешавине

Индекс пенетрације и пенетрација могу да се одреде из односа приказаних у табели 3.10 [5].

Табела 3.10 Релације за одређивање PI и $T_{800,pen}$ из пенетрације или вискозитета битумена

BITUMEN PROPERTIES KNOWN			
PROPERTIES FOR BITUMEN STIFFNESS NOMOGRAPH	Pen 1 at T_1 °C Pen 2 at T_2 °C	Pen 1 at T_1 °C Vis 2 at T_2 °C	Vis 1 at T_1 °C Vis 2 at T_2 °C
A	$\frac{1}{T_2 - T_1} \log \frac{Pen 2}{Pen 1}$	$\frac{1}{T_2 - T_1} \left[\log \frac{800}{Pen 1} + \frac{5.42 \log \frac{1300}{Vis 2}}{8.5 \cdot \log \frac{1300}{Vis 2}} \right]$	$\frac{1}{T_2 - T_1} \left[\frac{46.07 \log \frac{Vis 1}{Vis 2}}{\left[8.5 \cdot \log \frac{1300}{Vis 1} \right] \left[8.5 \cdot \log \frac{1300}{Vis 2} \right]} \right]$
PI	$\frac{20 - 500 A}{1 + 50 A}$		
$T_{800 PEN}$	$T_1 + \frac{1}{A} \log \frac{800}{Pen 1}$		$T_1 - \frac{1}{A} \left[\frac{5.42 \log \frac{1300}{Vis 1}}{8.5 \cdot \log \frac{1300}{Vis 1}} \right]$
NOTES			
1. Pen 1, Pen 2 are penetrations (0.1mm) determined using 100g mass and loading time of 5 seconds.			
2. Vis 1, Vis 2 are dynamic viscosities (Pa.s).			
3. A is the change in log(penetration) per °C change in temperature			

Према истом извору [5], однос максималне дилатације при затезању на дну асфалтног слоја и дозвољеног броја понављања оптерећења је:

$$N = \left[\frac{6918 \cdot (0.856 \cdot V_b + 1.08)}{S_{mix}^{0.36} \cdot \mu \varepsilon} \right]^5 \quad (3.23)$$

где је:

N - дозвољени број понављања оптерећења

$\mu \varepsilon$ - микродилатација при затезању изазвана деловањем оптерећења

V_b - запремина битумена у асфалтној мешавини [%]

S_{mix} - модул крутости мешавине [MPa]

Чврстоћа при затезању асфалтно бетонских мешавина за ниво прорачуна 1 и 2 се одређује на -10 °C. Опит се изводи према AASHTO T322 [10]. За ниво прорачуна 3 може се користити следећа једначина:

$$TS(psi) = 7416.712 - 114.016 \cdot V_a - 0.304 \cdot V_a^2 - 122.592 \cdot VFA + \dots \\ \dots + 0.704 \cdot VFA^2 + 405.71 \cdot \log(pen77) - 2039.296 \cdot \log(A) \quad (3.24)$$

где је:

TS - индиректна чврстоћа при затезању на 14 °F (-10°C)((1°F=1°C -32)*5/9)

V_a - шупљине испуњене ваздухом у изведеном слоју [%]

VFA - шупљине испуњене битуменом у изведеном слоју [%]

Pen77 - пенетрација на 77 °F (25°C)

A - пресек линија вискозности и температуре ($A = \frac{\log 800 - \log Pen}{T_{PK} - 25}$)

Течење се одређује у лабораторији за ниво прорачуна 1 и 2, а према опиту AASHTO T322. За ниво прорачуна 3 је довољна регресиона једначина која је развијена према NCHRP 1-37A (Део 3, Поглавље 3):

$$D(t) = D_1 \cdot t^m \quad (3.25)$$

$$\log D_1 = -8.524 + 0.01306 \cdot T + 0.7957 \cdot \log(V_a) + 2.0103 \cdot \log(VFA) - 1.923 \cdot \log(A) \quad (3.25a)$$

$$m = 1.1628 - 0.00185 \cdot T - 0.04596 \cdot V_a - 0.01126 \cdot VFA + \log(VFA) + \dots + 0.00247 \cdot pen77 + 0.001683 \cdot T \cdot pen77^{0.4605} \quad (3.25b)$$

где је:

T - температура на којој се течење мери [°F]

V_a - шупљине испуњене ваздухом у изведеном слоју [%]

VFA - шупљине испуњене битуменом у изведеном слоју [%]

Pen77 - пенетрација на 77 °F (25°C)

3.1.2.2 ЦЕМЕНТНИ БЕТОНИ

Цементни бетони представљају мешавину Портланд везива, агрегата, воде и хемијских додатака за успоравање везивања, убрзавање везивања, увлачење ваздуха, водонепропустљивост, итд. Максимална величина зрна агрегата (код коловоза) је од 10 до 40 mm. За прављење бетона се најчешће користе мешавине од ситнозрног (табела 3.11) и крупнозрног (табела 3.12) агрегата у односу који се експериментално утврђује.

Табела 3.11 Граничне криве за ситнозрни агрегат [2]

Сито, [mm]	Процент пролаза (m/m)
9.5	100
4.75	95-100
1.18	45-80
0.300	10-30
0.150	2-10

Табела 3.12 Граничне криве за крупнозрни агрегат према Енглеским прописима [2]

Отвор сита, [mm]	Проценти пролаза кроз сита по маси							
	Више фракцијски агрегат			Једнофракцијски агрегат				
	5-40 [mm]	5-20 [mm]	5-14 [mm]	40 [mm]	20 [mm]	14 [mm]	10 [mm]	5 [mm] ⁺
50.0	100			100				
37.5	90-100	100		85-100	100			
20.0	35-70	90-100	100	0-25	85-100	100		
14.0			90-100			85-100	100	
10.0	10-40	30-60	50-85	0-5	0-25	0-50	85-100	100
5.0	0-5	0-10	0-10		0-5	0-10	0-25	45-100
2.36							0-5	0-30

⁺ користи се најчешће за преднапрегнуте бетоне

За потребе коловозних конструкција, према Прописима америчке војске и авијације (Departments of The Army And Air Force Technical Manual – Standard Practice For Concrete Pavements), за крупнозрни агрегат важе следећа 4 појаса (табела 3.13), а за ситнозрни агрегат важе појасеви који су приказани у табели 3.14.

Табела 3.13 Гранични појасеви према Прописима америчке војске и авијације

Сита [mm]	Линија А [%]	Линија Б [%]	Линија Ц [%]	Линија Д [%]
63		100		
45		97 - 100	100	100
31.5		83 - 93	96 - 100	70 - 89
22.4	100	47 - 75	57 - 78	16 - 43
16	95 - 100	20 - 56	12 - 35	0 - 13
11.2	60 - 80		0 - 12	
8	15 - 43		0 - 8	0 - 5
4	0 - 9	0 - 9		
2	0 - 6	0 - 6		

Табела 3.14 Гранулометријски појас за ситнозрни агрегат

Сита [mm]	Линија песка [%]
8.0	100
4.0	91 - 98
2.0	75 - 88
1.0	52 - 75
0.71	37 - 65
0.50	25 - 52
0.25	8 - 24
0.125	0 - 6

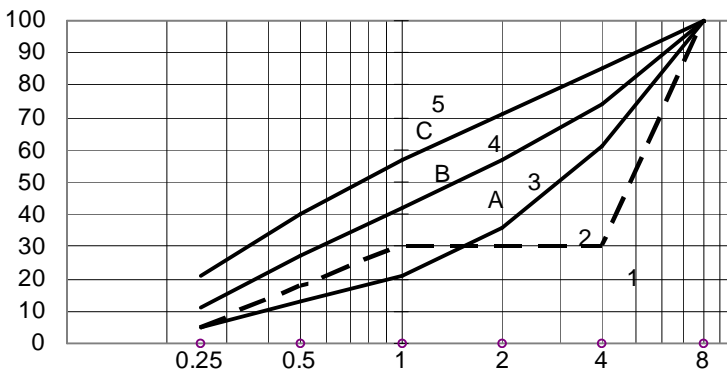
Према стандарду DIN 1045 (Немачка), ситнозрни агрегат треба да се налази у следећем граничном појасу (табела 3.15):

Табела 3.15 Гранулометријски појас за ситнозрни агрегат према DIN 1045

Сита [mm]	А [%]	Б [%]	В [%]
8	100	100	100
4	61	74	85
2	36	57	71
1	21	42	57
0.25	5	11	21

На слици 3.8 се види употребљивост одређених зона које чине граничне линије за ситнозрну мешавину.

СИТНОЗРНА МЕШАВИНА

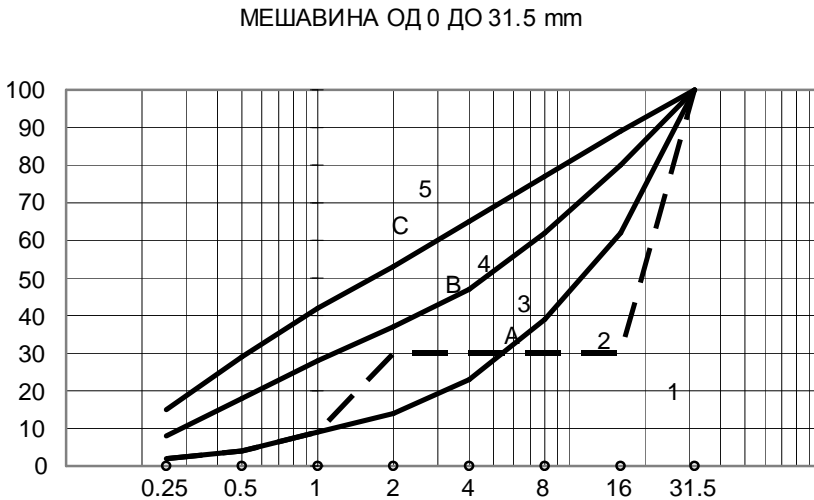


Слика 3.8 Гранични појасеви за ситнозрне мешавине према DIN 1045

Анализа површина које формирају криве указује на следеће чињенице:

- подручје (1) није подесно, јер се бетони са таквом композицијом тешко уграђују
- подручје (2) се употребљава за дисконтинуалне мешавине
- подручје (3) представља оптимално решење, јер бетони направљени са овим учешћем ситнозрне фракције захтевају мале количине воде и цемента за лаку уградњу
- подручје (4) је употребљиво, али агрегат захтева повећану употребу воде и цемента за уградљив бетон
- подручје (5) се избегава, јер агрегат захтева доста воде и велику количину цемента

На слици 3.9 је приказана употребљивост одређених зона које чине граничне линије за крупнозрну мешавину према DIN 1045.

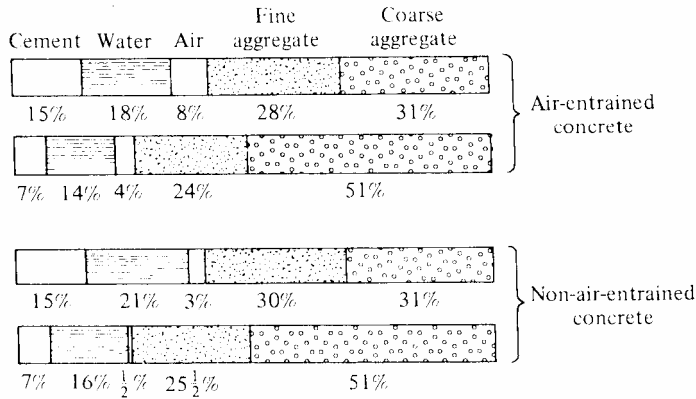


Слика 3.9 Гранични појасеви за крупнозрну мешавину према DIN 1045

Анализа површина које формирају криве указује на следеће чињенице:

- подручје (1) није подесно, јер се бетони са таквом композицијом тешко уграђују
- подручје (2) се употребљава за дисконтинуалне фракције агрегата
- подручје (3) представља оптимално решење, јер бетони направљени са овим учешћем ситнозрне фракције захтевају мале количине воде и цемента за лаку уградњу
- подручје (4) је употребљиво, али агрегат захтева повећану употребу воде и цемента за уградљив бетон
- подручје (5) се избегава, јер агрегат захтева доста воде и велику количину цемента

Количина воде треба да буде што мања, односно минимална са гледишта уградљивости, с тим да водоцементни фактор не прелази 0.5. С обзиром да је 1 kg воде потребан за хидратацију 4 kg цемента, са гледишта очвршћавања мешавине, потребан је водоцементни фактор 0.25 (остатак воде се користи за олакшано уграђивање). Према Енглеским прописима [2] чврстоћа на притисак (на коцкама) после 7 дана треба да је 31 N/mm² (44 N/mm² после 28 дана). Нормално је да овај однос чврстоћа за квалитетне коловозе од бетона износи 0.7:1.



Слика 3.10 Однос материјала у бетону

Величина мехура убаченог ваздуха (због отпорности бетона на дејство леда и средстава за одлеђивање) је између 0.025 и 0.075 mm. Експериментално је утврђено да око 90% шупљина испуњених ваздухом (у малтеру) пружају адекватну заштиту (табела 3.16).

Табела 3.16 Промена шупљина испуњених ваздухом с обзиром на величину агрегата

Максимална величина крупнозрног агрегата [mm]	Приближни проценат малтера у мешавини	Укупан садржај шипљина (9% у малтеру)
75	50	4.5
40	55	5.0
20	60	5.4
10	75	6.8

Мршави бетони изгледају као нормални бетони, једино што је однос агрегата и цемента 15 (20) : 1 (односно 100 до 140 kg/m³). Чврстоћа на притисак износи 5 до 10 MN/m². Минимална дебљина горње подлоге од мршавог бетона не може бити мања од 15 cm, нити дебљина једног слоја већа од 30 cm.

Бетони, који се употребљавају за коловозне засторе, треба после 28 дана да имају пројектовану чврстоћу при савијању од 3 до 5 МПа, дозвољени напон на затезање при савијању око 0.25 МПа.

Оријентационе вредности разних чврстоћа приказане су у табели 3.17.

Табела 3.17 Оријентационе вредности чврстоћа у бетону

Количина цемента, [kg]	МБ [MPa]	Чврстоћа на затезање при савијању, [MPa]	Дозвољени напон на затезање при савијању, [MPa]	Модул еластичности бетона, [GPa]
150	10	2.1	1.6	21
200	15	2.7	2.0	27
250	20	3.4	2.6	28.5
или више	25	3.8	2.9	30
	30	4.3	3.2	31.5
	35	4.8	3.5	33
	40			34.5

Захтеване чврстоће према још важећем стандарду ЈУС У.Е3.020, за превиђена саобраћајна оптерећења, су приказане у табели 3.18.

Табела 3.18 Захтеване чврстоће

Предвиђено саобраћајно оптерећење	МБ [MPa]	Чврстоћа на затезање при савијању β_{zs} , [MPa]
врло тешко	40	5.0
тешко	35	4.5
остало	30	4.0

Однос чврстоће на притисак β_k и чврстоће на затезање при савијању β_{zs} цементног бетона после 28 дана је:

$$\beta_k = 0.75 \cdot (\beta_{zs})^{0.50} \quad (3.26)$$

У САД, чврстоћа бетона на затезање при савијању β_{zs} (оптерећење делује у трећинама распона) назива се "модул лома" S_c , а дозвољени напон "радни напон". Веза између ове две величине је:

$$f_t = 0.75 \cdot S_c \quad (3.27)$$

Веза између "модула лома" S_c и чврстоће на притисак f_c^* је $8 \cdot \sqrt{f_c^*} < S_c = 10 \cdot \sqrt{f_c^*}$. Веза између модула еластичности и модула лома (ERES, 1987) је:

$$S_c = \frac{43.5 \cdot E_c}{10^6} + 488.5 \quad (3.28)$$

или

$$E_C = (S_C - 488.5) \cdot 2.3 \cdot 10^4 \quad (3.29)$$

За бетоне нормалне тежине, Амерички институт за бетон препоручује:

$$E_C = 57000 \cdot \sqrt{f_C^*} \quad (3.30)$$

Коефицијент линеарне термичке дилатације бетона, с обзиром на трење између плоче и подлоге, је $\alpha = 7 \cdot 10^{-6} \text{ mm/mm/}^\circ\text{C}$.

Коефицијент скупљања је између $0.5 \cdot 10^{-4}$ и $2.5 \cdot 10^{-4}$, односно у просеку $1 \cdot 10^{-4}$.

Поасонов коефицијент "v" је 0.14 или 0.15.

Однос између статичког и динамичког модула еластичности бетона гласи:

$$E_d = 10000 + 0.88 \cdot E_s \quad (3.31)$$

где је:

E_d - динамички модул еластичности бетона [МПа]

E_s - статички модул еластичности бетона [МПа]

Оријентациони однос између модула еластичности и чврстоће на притисак гласи:

$$E_{bo} = 9250 \cdot \sqrt[3]{\beta_{KS} + 10} \quad (3.32)$$

где је:

$$\beta_{KS} = 1.15 \cdot \beta_K \quad (5.33)$$

β_{KS} - средња вредност чврстоће бетонских коцки [МПа]

β_K - чврстоћа бетонске коцке на притисак, марка бетона [МПа]

Однос чврстоће бетонске призме β_p и бетонске коцке β_k је:

$$\beta_p = 0.8 \cdot \beta_K \quad (3.34)$$

Дозвољени напон на затезање при савијању је:

$$\sigma_{ZS} = \frac{\beta_{ZS}}{F_S} \quad (3.35)$$

где је:

σ_{ZS} - дозвољени напон на затезање при савијању

β_{ZS} - чврстоћа на затезање при савијању (оптерећење делује у трећинама распона)

F_S - коефицијент сигурности (најчешће 1.33) (табела 3.19)

Табела 3.19 Коефицијенти сигурности

Број понављања оптерећења које изазива лом конструкције	Коефицијент сигурности, F_s
5000	1.33
10000	1.52
25000	1.68
50000	1.84
75000	1.94
1000000 или више	2.00

При овим анализама треба имати у виду да је просечна чврстоћа бетона, старог једну годину, 20 до 45 процената већа од чврстоће после 28 дана.

Одређивање броја дозвољених понављања оптерећења, односно, одређивање замора бетонског коловоза, добија се из:

$$\log N_f = 17.61 - 17.61 \cdot R_i \quad (3.36)$$

где је:

N_i - број понављања оптерећења до појаве замора

$$R_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_{ZS}} \quad (3.37)$$

σ_i - напон при затезању од одговарајућег осовинског оптерећења

σ_{ZS} - допуштени напон на затезање при савијању

$$\sigma_{ZS} = \sigma_{ZSP} - S.O. \cdot 1.03 \quad (3.38)$$

σ_{ZSP} - просечни дозвољени напон на затезање у оквиру пројектног периода

S.O. - стандардно одступање σ_{ZSP}

1.03 - нормално одступање за 85%-тни ниво поузданости

Оријентационе вредности модула еластичности и Поасонових коефицијената су приказани у табелама 3.20 и 3.21.

Табела 3.20 Модули еластичности различитих материјала
(1psi = 6900 Pa)

Материјал	Опсег [psi]	Типични
Бетон	3×10^6 до 6×10^6	4×10^6
Цементом стабилована подлога	1×10^6 до 3×10^6	2×10^6
Цементом стабиловано тло	5×10^4 до 2×10^6	1×10^6
Кречом - пепелом стаб. материјали	5×10^5 до 2.5×10^6	1×10^6
Крута глина	7 600 до 17 000	12 000
Получврста глина	4 700 до 12 300	8 000
Мекана глина	1 800 до 7 700	5 000
Врло мекана глина	1 000 до 5 700	3 000

Табела 3.21 Поасонови коефицијенти за различите материјале

Материјал	Опсег	Типично
Асфалт прављен по врућем поступку	0.30 - 0.40	0.35
Бетон	0.15 - 0.20	0.15
Невезан зрнасти материјал	0.30 - 0.40	0.35
Цементом стабилизован зрнасти материјал	0.10 - 0.20	0.15
Цементом стабилизовано фино зрнасто тло	0.15 - 0.35	0.25
Кречом стабилизован материјал	0.10 - 0.25	0.20
Кречом-пепелом стабиловани материјали	0.10 - 0.15	0.15
Невезани песак или глиновити песак	0.20 - 0.40	0.30
Густи песак	0.30 - 0.45	0.35
Фино зрнасто тло	0.30 - 0.50	0.40
Потопљена мекана глина	0.40 - 0.50	0.45

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] *Asphalt Technology and Construction Practices*, The Asphalt Institute, Educational Series No. 1 (ES-1), Second Edition, January, Maryland, 1983
- [2] David Croney & Paul Croney, *Design and Performance of Road Pavements*, Third Edition, McGraw-Hill, 1998.
- [3] *Pavement Design*, A guide to the Structural Design of Road Pavements, AUSTROADS Publication No. AP-17/92, Sydney, 1992.
- [4] Van der Poel C, A General System Describing the Visco-Elastic Properties of Bitumen and Its Relation to Routine Test Data, *Journal of Applied Chemistry*, Vol. 4, 1954, p.221-236
- [5] *Shell Pavement Design Manual – Asphalt Pavements and Overlays for Road Traffic*, Shell International Petroleum Company Limited, London, 1978.
- [6] Ullidtz P, INSTRUCTOR NOTES ON NONDESTRUCTIVE PAVEMENT ANALYSIS, *8th International Conference on Asphalt Pavements, Pre-Conference Technical Series*, Seattle, Washington, USA, 1997
- [7] Yang H. HUANG, *Pavement Analysis and Design*, PRENTICE HALL, Upper Saddle River, New Jersey 07458, 1993.
- [8] Witczak M.W, Sotil A, *A Recommended Methodology for Developing Dynamic Modulus E* Master Curves From Non-Linear Optimization*, Arizona State University, NCHRP 9-19, March 16th 2004.
- [9] BANDS 2.0, Shell International Oil Products BV, 1998.
- [10] AASHTO T322, Determining the Creep Compliance and Strength of Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Indirect Tensile Test Device.
- [11] Цветановић А, КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ, Научна књига, Београд, 1992.

4

ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ

4.1 УВОД

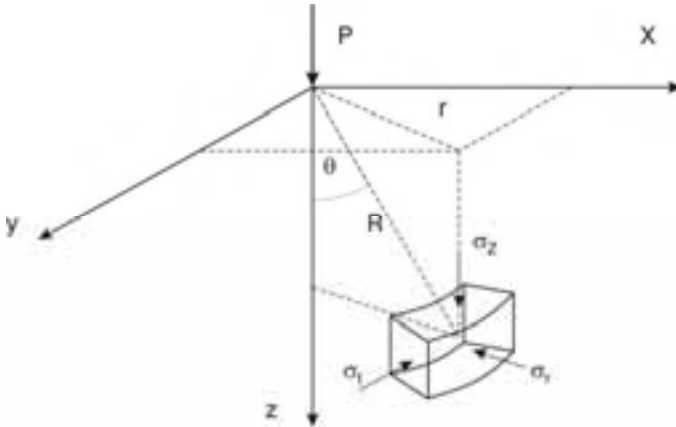
Димензионисање коловозних конструкција је веома осетљива дисциплина у пројектовању путева. Савремени развој технологије рачунара омогућава израду програмских пакета којима се могу обухватити веома компликовани математички прорачуни, неопходни у димензионисању коловозних конструкција, како флексибилних, тако и крутих. Веома велики број параметара који утичу на дебљину коловозне конструкције захтева пажљиву анализу и тачан прорачун. За разлику од ранијих поступака који су користили емпиријске претпоставке и максимална поједностављења овог, иначе сложеног проблема, циљ савремених поступака је да се ухвати што тачнија физичка веза, а самим тим и математичка повезаност, свих параметара који утичу на дебљину, трајност и отпорност коловозне конструкције, а самим тим и на трошкове изградње и одржавања.

У овом поглављу биће разматрана напонска стања у флексибилним коловозним конструкцијама, као и поступци за димензионисање, како ванградских и градских путева, тако и аеродромских pista - полетно слетних и рулних стаза.

4.2 НАПОНИ И ДЕФОРМАЦИЈЕ У ФЛЕКСИБИЛНИМ КОЛОВОЗНИМ КОНСТРУКЦИЈАМА

4.2.1 ХОМОГЕНА СРЕДИНА - ПОЛУПРОСТОР

Најједноставнији начин сагледавања понашања флексибилне коловозне конструкције под оптерећењем је посматрати је као хомогени полупростор. Полупростор је бесконачно велика запремина тла која је са горње стране оивичена једном равни на којој се налази оптерећење. Оригинална Бусинескова теорија (1885.) (Boussinesq) [1] је заснована на концепту концентрисаног оптерећења на еластичном (E , ν), хомогеном и изотропном полупростору. Напони, дилатације (деформације) и угиби (дефлексије), су изведени да задовоље кружну површину под концентрисаним оптерећењем.



Слика 4.1 Диспозиција посматраног елемента полупростора

Изрази за нормалне напоне у поларном координатном систему су:

$$\sigma_z = \frac{3 \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \cos^3 \theta \quad (4.1)$$

$$\sigma_r = \frac{P}{2 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \left[3 \cdot \cos \theta \cdot \sin^2 \theta - \frac{1 - 2 \cdot \nu}{1 + \cos \theta} \right] \quad (4.2)$$

$$\sigma_t = \frac{P \cdot (1 - 2 \cdot \nu)}{2 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \left[-\cos \theta + \frac{1}{1 + \cos \theta} \right] \quad (4.3)$$

$$\sigma_1 = \frac{3 \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \cos \theta \quad (4.4)$$

$$\sigma_v = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{P \cdot (1 + \nu)}{3 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \cos \theta \quad (4.5)$$

Изрази за смичуће напоне у поларном координатном систему су:

$$\tau_{rz} = \frac{3 \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot R^2} \cdot \cos^2 \theta \cdot \sin \theta \quad \tau_{rr} = \tau_{rr} = 0 \quad (4.6)$$

Изрази за нормалне дилатације су:

$$\varepsilon_z = \frac{P \cdot (1 + \nu)}{2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot E} \cdot [3 \cdot \cos^3 \theta - 2 \cdot \nu \cdot \cos \theta] \quad (4.7)$$

$$\varepsilon_r = \frac{P \cdot (1 + \nu)}{2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot E} \cdot \left[-3 \cdot \cos^2 \theta + (3 - 2 \cdot \nu) \cdot \cos \theta - \frac{1 - 2 \cdot \nu}{1 + \cos \theta} \right] \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_t = \frac{P \cdot (1 + \nu)}{2 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot E} \cdot \left[-\cos \theta + \frac{1 - 2 \cdot \nu}{1 + \cos \theta} \right] \quad (4.9)$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_z + \varepsilon_r + \varepsilon_t = \frac{P \cdot (1 + \nu)}{\pi \cdot R^2 \cdot E} \cdot (1 - 2 \cdot \nu) \quad (4.10)$$

а, вертикална померања су:

$$d_z = \frac{P \cdot (1 + \nu)}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot E} \cdot [2 \cdot (1 - \nu) + \cos^2 \theta] \quad (4.11)$$

$$d_r = \frac{P \cdot (1 + \nu)}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot E} \cdot \left[\cos \theta \cdot \sin \theta - \frac{(1 - 2 \cdot \nu) \cdot \sin \theta}{1 + \cos \theta} \right] \quad (4.12)$$

$$d_t = 0 \quad (4.13)$$

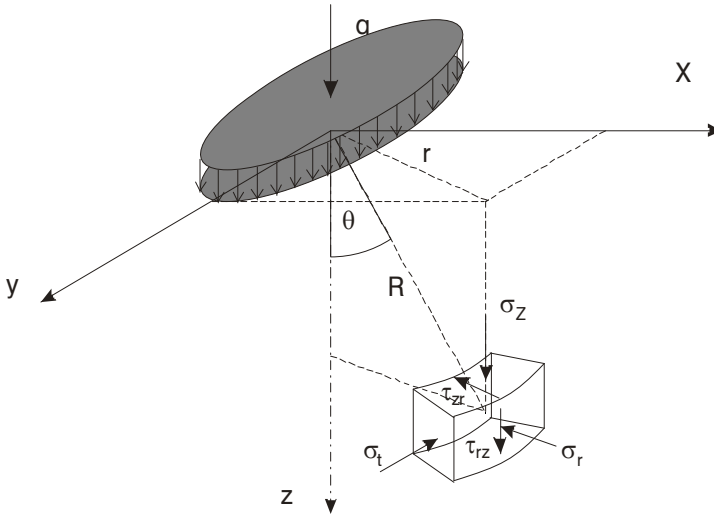
Напон, дилатација и померање у оси испод оптерећења су:

$$\sigma_z = \frac{3 \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot z^2} \quad (4.14)$$

$$\varepsilon_z = \frac{P \cdot (1 + \nu) \cdot (3 - 2 \cdot \nu)}{2 \cdot \pi \cdot z^2 \cdot E} \quad (4.15)$$

$$d_z = \frac{P \cdot (1 + \nu) \cdot (3 - 2 \cdot \nu)}{2 \cdot \pi \cdot z \cdot E} \quad (4.16)$$

Пре него што је Бармистер (1943) (Burmister) [10] развио теорију слојева, доста пажње је било посвећено овом Бусинесковом решењу, јер је једино оно било доступно. Ова теорија се може искористити за одређивање напона, дилатација и угиба у постелици, ако је коефицијент модула између хабајућег слоја и постелице близак јединици - то је показано на танком асфалтном слоју постављеном преко танког носећег слоја од неvezаног агрегата. Ако је коефицијент модула знатно већи од јединице, тада једначина мора бити модификована, као што је показано у старом поступку државе Канзас (1947) (Kansas State Highway Commission).



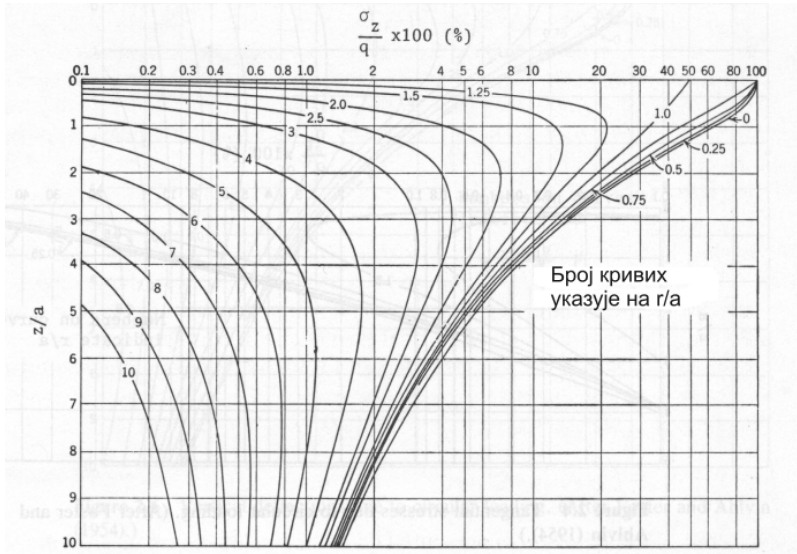
Слика 4.2 Компонентални напони под осносиметричним оптерећењем

На слици 4.2 је приказан хомогени полупростор изложен кружном оптерећењу радијуса a и равномерно распоређеном притиску q . Полупростор има модул еластичности E и Поасонов коефицијент ν . Посматрајмо мали цилиндрични елемент са центром на одстојању z испод површине и радијусом r од осе симетрије. Због карактеристика осне симетрије, постоје три нормална напона σ_z , σ_r , σ_t , и један смичући напон τ_{rz} који је једнак τ_{zr} . Ови напони су функције од q , r/a и z/a .

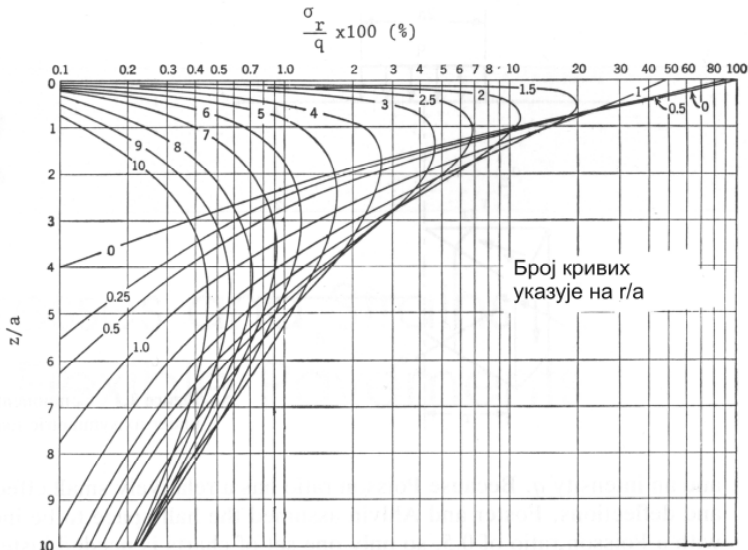
4.2.2 АЛТЕРНАТИВНА РЕШЕЊА ПОМОЋУ ДИЈАГРАМА

Значајан допринос у дефинисању напонских стања су дали Фостер и Алвин (1954) (Foster, Ahlvin) [5] графичким приказом (слике од 4.3 до 4.7). Они су дефинисали дијаграме за одређивање вертикалног напона σ_z , радијалног напона σ_r , тангенцијалног напона σ_t , смичућег напона τ_{rz} и вертикалне дефлексије w , који су последица оптерећења кружне површине радијуса a и интензитета оптерећења q . Због малог утицаја Поасоновог коефицијента на напоне и дефлексије, Фостер и Алвин су претпоставили да полупростор није стишљив и да је Поасонов коефицијент 0.5, тако да је потребан само по један дијаграм за дефлексију и за сваки од напона. У противном, било би потребно за сваки Поасонов коефицијент израдити коресподентне дијаграме за напоне и дефлексију. Ову идеју су касније побољшали Алвин и Улери (1962) (Ahlvin, Ulery) [6] који су приказали серију једначина и табела тако да напони, дилатације и дефлексије могу бити израчунати за сваки Поасонов коефицијент. Овај поступак се веома лако примењује у програмском пакету КЕНЛЕЈЕР (Јанг Х. Хуанг) (1993) (KENLAYER) (Yang H.

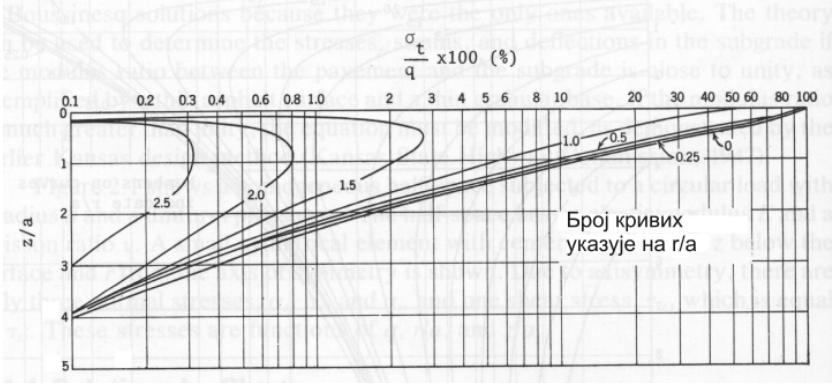
Huang) [2], ако се претпостави да је полупростор хомоген и двослојан, било којих дебљина, а са истим модулом еластичности и Поасоновим коефицијентом за оба слоја.



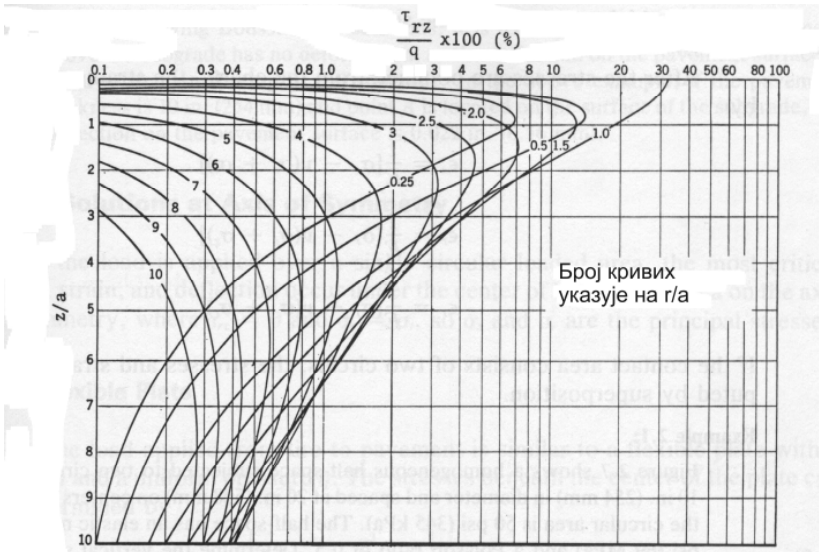
Слика 4.4 Вертикални напони у зависности од кружног оптерећења [5]



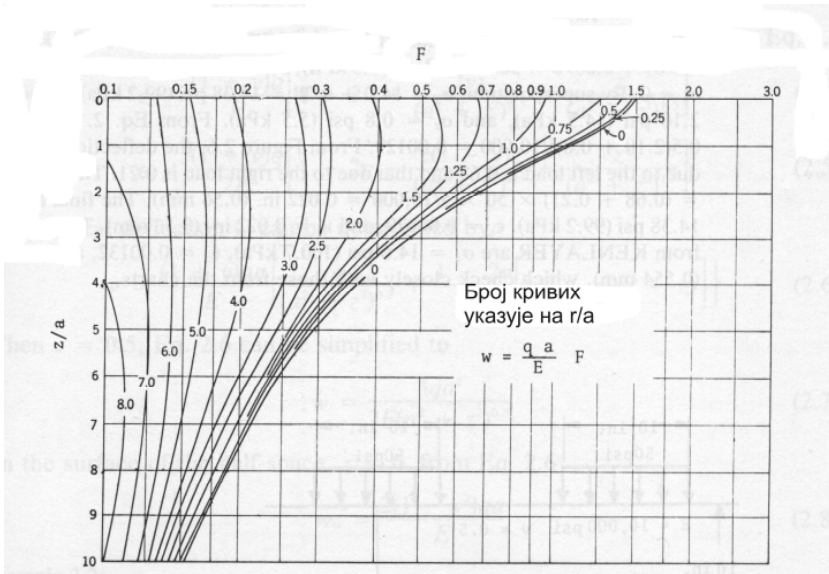
Слика 4.5 Радијални напони у зависности од кружног оптерећења [5]



Слика 4.6 Тангенцијални напони у зависности од кружног оптерећења [5]



Слика 4.7 Смичући напони у зависности од кружног оптерећења [5]



Слика 4.8 Вертикална дефлексија у зависности од кружног оптерећења [5]

Кад су напони одређени из претходних дијаграма, онда се врло лако могу одредити дилатације из следећих израза:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_z - \nu \cdot (\sigma_r + \sigma_t)] \tag{4.17}$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_r - \nu \cdot (\sigma_t + \sigma_z)] \tag{4.18}$$

$$\varepsilon_t = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_t - \nu \cdot (\sigma_z - \sigma_r)] \tag{4.19}$$

4.2.3 АЛТЕРНАТИВНА РЕШЕЊА НА ОСИ СИМЕТРИЈЕ

Када се оптерећење примени преко једне кружне еластичне површине, најкритичнији напони, дилатације и дефлексије се јављају испод центра оптерећене површине, у оси симетрије [2]. Тада су $\tau_{rz} = 0$, $\sigma_r = \sigma_\theta$ тако да су σ_z и σ_r главни напони (диспозиција је приказана на сл. 4.2).

$$\sigma_z = q \cdot \left[1 - \frac{z^3}{(\sqrt{a^2 + z^2})^3} \right] \tag{4.20}$$

$$\sigma_r = \frac{q}{2} \cdot \left[1 + 2 \cdot \nu - \frac{2 \cdot (1 + \nu) \cdot z}{(\sqrt{a^2 + z^2})} + \frac{z^3}{(\sqrt{a^2 + z^2})^3} \right] \quad (4.21)$$

$$\varepsilon_z = \frac{(1 + \nu) \cdot q}{E} \cdot \left[1 - 2 \cdot \nu - \frac{2 \cdot \nu \cdot z}{(\sqrt{a^2 + z^2})} - \frac{z^3}{(\sqrt{a^2 + z^2})^3} \right] \quad (4.22)$$

$$\varepsilon_z = \frac{(1 + \nu) \cdot q}{2 \cdot E} \cdot \left[1 - 2 \cdot \nu - \frac{2 \cdot (1 - \nu) \cdot z}{(\sqrt{a^2 + z^2})} - \frac{z^3}{(\sqrt{a^2 + z^2})^3} \right] \quad (4.23)$$

$$w = \frac{(1 + \nu) \cdot q \cdot a}{E} \cdot \left\{ \frac{a}{(\sqrt{a^2 + z^2})} + \frac{(1 - 2 \cdot \nu)}{a} \cdot [(\sqrt{a^2 + z^2}) - z] \right\} \quad (4.24)$$

где је:

q - расподељено оптерећење од притиска пнеуматика

a - радијус контактне површине

z - вертикална координата

ν - Поасонов коефицијент

E - модул еластичности слоја

σ_z - вертикални напон на дубини z

σ_r - радијални напон (напон затезања)

ε_z - вертикална дилатација на дубини z

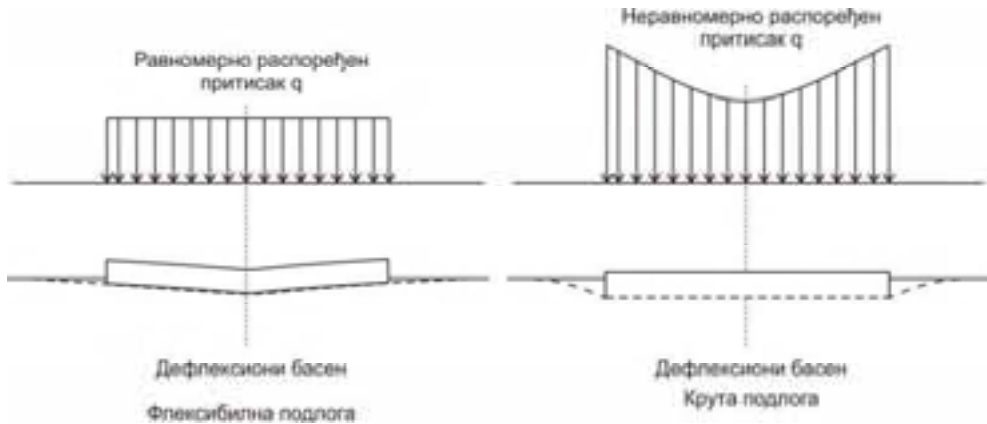
ε_r - радијална дилатација (дилатација затезања)

w - вертикално померање

На површини полупростора, вертикално померање је:

$$w_o = \frac{2 \cdot (1 - \nu^2) \cdot q \cdot a}{E} \quad (4.25)$$

Ако се примени крута подлога за пренос оптерећења (опит плочом), дефлексије су исте у свим тачкама испод плоче, али расподела напона испод плоче није равномерна. Овај појам је приказан на слици 4.9.



Слика 4.9 Разлика између флексибилне и круте подлоге за пренос оптерећења

Расподела притиска испод круте подлоге може бити изражена помоћу једначине коју је дао Улидз (Per Ullidtz)(1987.) [25]:

$$q(r) = \frac{q \cdot a}{2 \cdot \sqrt{(a^2 - r^2)}} \quad (4.26)$$

где је:

r - растојање од центра до тачке где треба одредити притисак

q - средњи притисак који је једнак укупном расподељеном оптерећењу по површини

Најмањи притисак је у центру и једнак је једној половини средњег притиска, док притисак на крајевима плоче тежи бесконачности. Интеграцијом се може видети да је дефлексија следећег облика [2]:

$$w_o = \frac{\pi \cdot (1 - \nu^2) \cdot q \cdot a}{2 \cdot E} \quad (4.27)$$

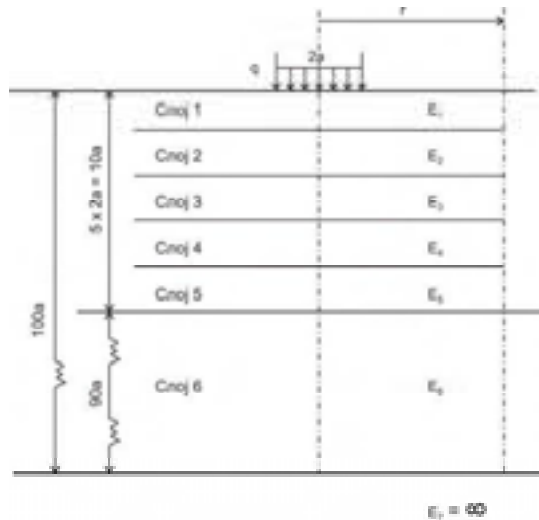
Упоређивањем претходно наведених једначина за вертикално померање на површини, може се закључити да је дефлексија испод круте контактне плоче само 79% од оне која је испод флексибилне контактне плоче. Ово има смисла јер притисак испод круте плоче има мање вредности у близини центра оптерећења, а веће на крајевима. Притисак ближе центру има већи ефекат на површинску дефлексију у центру. Исти ефекат је уочен и ако је систем испод плоча за преношење оптерећења слојевит, Јодер и Витцак (Yoder and Witczak) (1975) [4].

4.2.4 НЕЛИНЕАРНИ ПОЛУПРОСТОР

Бусинескова решења су заснована под претпоставком да је полупростор састављен од линеарно еластичног материјала. Добро је познато да су материјали у постељици нееластични и да их карактерише тренутна деформација под стационарним оптерећењем. Међутим, под применом понављаног саобраћајног оптерећења, већина деформација су повратне и могу се сматрати еластичним. Зато је и могуће разумне еластичне модуле повезивати са брзином кретања оптерећења. Пошто линеарност подразумева примену поступка суперпозиције, еластична константа не сме варирати са стањем напона. Другим речима, једноаксијална деформација линеарно еластичног материјала под једноаксијалним напоном треба да буде независна у односу на ограничени бочни притисак. Ово очигледно није тачно за земљане материјале, зато што њихова аксијална деформација строго зависи од магнитуде ограниченог бочног притиска. Као последица тога, ефекти нелинеарности Бусинесковог решења су од практичног интереса.

4.2.4.1 ИТЕРАТИВНИ ПОСТУПАК

Да би показао ефекте нелинеарности грануларних материјала на напоне и дефлексије, Хуанг (Huang 1968a) [7] је поделио полупростор на 7 слојева, као што је приказано на слици 4.10.



Слика 4.10 Полупростор подељен на седам слојева [7]

Затим је применио Бармистерову теорију слојевитог система за одређивање напона на срединама слојева. За овакав приступ потребно је истаћи да је

сваки нижи слој са знатно већим модулом еластичности у односу на њему одговарајући горњи слој.

Када су напони одређени, модули еластичности за сваки од слојева се одређују помоћу:

$$E = E_o \cdot (1 + \beta \cdot \theta) \quad (4.28)$$

где је:

θ - инваријанта напона или сума три нормална напона

E - модул еластичности за задату инваријанту напона

E_o - почетни модул еластичности или када је $\theta = 0$

β - константа земљаног материјала која изазива повећање модула еластичности по јединици повећања инваријанте напона

Битно је запазити да инваријанта напона обухвата ефекте примењеног оптерећења исто тако као и ефекте геостатичких напона, изражене помоћу:

$$\theta = \sigma_z + \sigma_r + \sigma_t + \gamma \cdot z \cdot (1 + 2 \cdot K_o) \quad (4.29)$$

где је:

σ_z - вертикални напон услед оптерећења

σ_r - радијални напон услед оптерећења

σ_t - тангенцијални напон услед оптерећења

γ - јединична маса тла

z - дубина на којој се напони израчунавају

K_o - коефицијент земљаног притиска при растерећењу

Овај проблем може бити решен методом узастопних апроксимација. Прво се претпоставе модули еластичности за сваки од слојева, а затим се одреде напони према теорији слојевитог система. Из управо одређених напона, одређују се нови модули еластичности према једначини 4.28, а затим се, поново, израчунавају напони. Процес се понавља све док модули између две узастопне итерације не упадну у предвиђену толерантну разлику.

Примењивањем теорије слојева у нелинеарним анализама, поставља се питање: које радијално одстојање r треба узети за одређивање напона и модула? Хуанг (Huang) (1969а) [8] је показао да вертикални напони, без обзира на радијални положај, $r = 0$ или $r = \infty$, не утичу значајније приликом одређивања модула еластичности, али у великој мери утичу вертикална померања. Исти аутор је касније показао, применом методе коначних елемената, да нелинеарно понашање тла има велики утицај на вертикална и радијална померања, а посредно утиче и на радијалне и тангенцијалне напоне, док на вертикалне и смичуће напоне утиче веома мало. У зависности од дубине на којој је посматрана тачка, вертикални напони

одређени према нелинеарној теорији су већи или мањи од оних одређених према линеарној теорији, док за одређену дубину, вредности напона (према обе теорије) теже истим вредностима. То може бити објашњење, зашто је Бусинескова опција за вертикалне напоне, заснована на линеарној теорији која се примењује у механици тла, коришћена са великим успехом, иако се тло понаша изразито нелинеарно.

4.2.4.2 АПРОКСИМАТИВНИ МЕТОД

Апроксимативни метод подразумева анализирање нелинеарног полупростора подељеног у слојеве и одређивање напона на средини дебљине сваког слоја помоћу Бусинескове линеарне теорије. За сваки од тако одређених напона, одредити модул еластичности за сваки слој, према једначини 4.28. Тада могу бити одређене деформације сваког слоја, које су разлике дефлексија са врха и дна посматраног слоја, а зависе од модула еластичности E . Ако је подлога крута, или ако је посматрана тачка веома дубоко где се вертикална померања могу занемарити (она су једнака нули), деформације су додате да би биле одређене дефлексије на различитим дубинама. Претпоставка о расподели напона коју је дао Бусинеск, искористили су Весић и Домашук (Vesic and Domaschuk) (1964) [9] да предвиде облик дефлексионог басена на флексибилним коловозним конструкцијама, што је дало задовољавајуће резултате. Треба рећи да је једначина 4.28 једна од многих конститутивних једначина за пескове.

Табела 4.1 Разлике у напонима и модулима између Бусинескове солуције и Бармистерове солуције

z положај у средини слоја	Бусинеск			Бурмистер		
	σ_z	σ_r	E	σ_z	σ_r	E
(in.)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)	(psi)
6	51.72	4.60	30 860	51.46	4.50	30 580
18	11.69	-0.51	21 330	10.61	-0.65	21 070
30	4.57	-0.27	20 330	4.26	-0.27	20 280
42	2.39	-0.15	20 250	2.31	-0.11	20 260
54	1.46	-0.09	20 400	1.47	0.01	20 440
330	0.04	0.00	27 020	0.04	0.00	27 020

* 1 in. = 25.4 mm, 1 psi = 6.9 kPa

За прорачун деформација сваког слоја користи се прво једначина 4.24. Разлика између ωE на граничној површини два слоја, подељена са E даје деформацију слоја. Дефлексија површинског слоја је сума деформација свих слојева. Интересантно је поменути да инваријанта напона, услед примењеног оптерећења, опада са повећањем дубине, док услед геостатичких напона расте са повећањем дубине. Модули еластичности су

приближни за средње слојеве, док су за слојеве на врху и на дну различити (табела 4.1). Слична решења се добијају и програмом КЕНЛЕЈЕР (KENLAYER).

4.2.5 СЛОЈЕВИТИ СИСТЕМИ

Флексибилни коловози су слојевити системи са бољим матријалима у горњим слојевима и никако не представљају хомоген полупростор. Због тога је употреба Бармистерове теорије слојева прикладнија. Бармистер (Burmister) (1943) [10] је прво развио систем са два слоја, а затим га развио у систем са три слоја (Burmister) (1945) [11]. Са развојем компјутерске технологије, ова теорија може бити примењена на вишеслојне системе. Ово је применио Хуанг (Huang) (1967, 1968a) [12][7], где је број слојева бесконачан.

На слици 4.11 је приказан систем са n слојева. Основне претпоставке морају да задовоље следеће:

- сваки слој је хомоген, изотропан и линеарно еластичан са модулом еластичности E и Поасоновим коефицијентом ν
- материјал је без тежине и бесконачан
- сваки слој има ограничену дебљину h , али најнижи слој је бесконачне дебљине
- равномерни притисак q је постављен преко кружне површине радијуса a , на врху горњег слоја
- услови континуитета су задовољени на контактним површинама између слојева и имају исте вертикалне напоне, смичуће напоне, вертикална померања и радијална померања. За смањено треће између слојева, континуитет смичућег напона и радијалног померања је замењен са смичућим напоном који је једнак нули са обе стране контактне површине

Као и у класичној теорији еластичности, функција напона ϕ задовољава главну диференцијалну једначину:

$$\nabla^4 \phi = 0 \quad (4.30)$$

која се претпоставља за сваки од слојева. За осно симетричну расподелу напона је:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z^2} \right) \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z^2} \right) \phi(r, z) = 0 \quad (4.31)$$

где су \mathbf{r} и \mathbf{z} цилиндричне координате за радијални и вертикални смер, респективно. Одређивањем функције напона, напони и померања могу бити приказати помоћу следећих израза:

$$\sigma_z = \frac{\partial}{\partial z} \left((2-\nu)\nabla^2\phi(r, z) - \frac{\partial^2\phi(r, z)}{\partial z^2} \right) \quad (4.32)$$

$$\sigma_r = \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu\nabla^2\phi(r, z) - \frac{\partial^2\phi(r, z)}{\partial r^2} \right) \quad (4.33)$$

$$\sigma_t = \frac{\partial}{\partial z} \left(\nu\nabla^2\phi(r, z) - \frac{1}{r} \frac{\partial\phi(r, z)}{\partial r} \right) \quad (4.34)$$

$$\tau_{rz} = \frac{\partial}{\partial r} \left((1-\nu)\nabla^2\phi(r, z) - \frac{\partial^2\phi(r, z)}{\partial z^2} \right) \quad (4.35)$$

$$w = \frac{1+\nu}{E} \left(2(1-\nu)\nabla^2\phi(r, z) - \frac{\partial^2\phi(r, z)}{\partial z^2} \right) \quad (4.36)$$

$$u = - \left(\frac{1+\nu}{E} \right) \frac{\partial^2\phi(r, z)}{\partial r \partial z} \quad (4.37)$$

где је:

σ_z - вертикални напон

σ_r - радијални напон у хоризонталној равни

σ_t - тангенцијални напон у хоризонталној равни (управно на σ_r)

τ_{rz} - смичући напон

w - вертикално померање

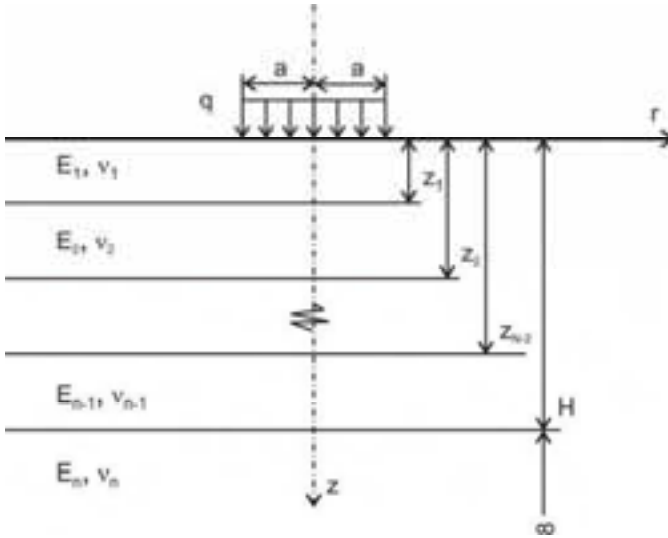
u - радијално померање

E - Јунгов модул (Young's modulus)

ν - Поасонов коефицијент (Poisson's ratio)

Једначина 4.32 је диференцијална једначина 4 реда и због тога, једначине за напоне и померања, које се добијају њеним интеграљењем имају 4 константе које морају бити одређене из граничних услова и услова континуитета.

Нека је $\rho = \frac{r}{H}$ и $\lambda = \frac{z}{H}$, где је H растојање од површине до горње границе нижег слоја, као што је приказано на слици 4.11.



Слика 4.11 Прорачунски модел за систем са n слојева

Уз овакве смене лако се добија једначина:

$$\phi_i = \frac{H^3 \cdot J_0 \cdot (m \cdot \rho)}{m^2} \cdot [A_i \cdot e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - B_i \cdot e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} + C_i \cdot m \cdot \lambda \cdot e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - D_i \cdot m \cdot \lambda \cdot e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})}] \quad (4.38)$$

која је функција напона за i-ти слој која задовољава једначину 4.32, у којој је:

J_0 - Беселова функција прве врсте и реда 0

m - је параметар

A, B, C, D - константе интеграције које се одређују из граничних услова и услова континуитета

Индекс i варира од 1 до n и односи се на параметре из i -тог слоја.

Ако се смена 4.38 уведе у једначине од 4.32 до 4.37, добијају се следећи изрази:

$$(\sigma_z^*)_i = -m \cdot J_0 \cdot (m \cdot \rho) \cdot \{ [A_i - C_i \cdot (1 - 2\nu_i - m \cdot \lambda)] \cdot e^{-m(\lambda_i - \lambda)} + [B_i + D_i \cdot (1 - 2\nu_i - m \cdot \lambda)] \cdot e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \} \quad (4.39)$$

$$(\sigma_r^*)_i = [m \cdot J_0 \cdot (m \cdot \rho) - \frac{J_1 \cdot (m \cdot \rho)}{\rho}] \cdot \{ [A_i + C_i \cdot (1 + m \cdot \lambda)] \cdot e^{-m(\lambda_i - \lambda)} + [B_i - D_i \cdot (1 - m \cdot \lambda)] \cdot e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \} + 2 \cdot \nu_i \cdot m \cdot J_0 \cdot (m \cdot \rho) \cdot [C_i \cdot e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - D_i \cdot e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})}] \quad (4.40)$$

$$(\sigma_r^*)_i = -\frac{J_1 \cdot (m \cdot \rho)}{\rho} \cdot \{ [A_i + C_i \cdot (1 + m \cdot \lambda)] \cdot e^{-m(\lambda_i - \lambda)} + [B_i - D_i \cdot (1 - m \cdot \lambda)] \cdot e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \} + 2 \cdot v_i \cdot m \cdot J_o \cdot (m \cdot \rho) \cdot [C_i \cdot e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - D_i \cdot e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})}] \quad (4.41)$$

$$(\tau_{rz}^*)_i = m \cdot J_1 \cdot (m \cdot \rho) \cdot \{ [A_i + C_i \cdot (2 \cdot v_i + m \cdot \lambda)] \cdot e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - [B_i - D_i \cdot (2 \cdot v_i - m \cdot \lambda)] \cdot e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \} \quad (4.42)$$

$$(w^*)_i = -\frac{1 + v_i}{E_i} \cdot J_o \cdot (m \cdot \rho) \cdot \{ [A_i - C_i \cdot (2 - 4 \cdot v_i - m \cdot \lambda)] \cdot e^{-m(\lambda_i - \lambda)} - [B_i + D_i \cdot (2 - 4 \cdot v_i + m \cdot \lambda)] \cdot e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \} \quad (4.43)$$

$$(u^*)_i = \frac{1 + v_i}{E_i} \cdot J_1 \cdot (m \cdot \rho) \cdot \{ [A_i + C_i \cdot (1 + m \cdot \lambda)] \cdot e^{-m(\lambda_i - \lambda)} + [B_i - D_i \cdot (1 - m \cdot \lambda)] \cdot e^{-m(\lambda - \lambda_{i-1})} \} \quad (4.44)$$

где је:

σ_z - вертикални напон

σ_r - радијални напон у хоризонталној равни

σ_i - тангенцијални напон у хоризонталној равни (управно на σ_r)

τ_{rz} - смичући напон

w - вертикално померање

u - радијално померање

J_1 - Беселова функција прве врсте реда 1

E - Јунгов модул

v - Поасонов коефицијент

i - индекс изван заграде се односи на i -слој

* - односи се на оптерећење од $mJ_o(m\rho)$, а не на q

За одређивање напона и померања услед равномерно распоређеног оптерећења q преко кружне контактне површине радијуса a , треба искористити Хенкелов метод трансформације. Хенкелова смена за овакав облик оптерећења је:

$$\bar{f}(m) = \int_0^a q \cdot p \cdot J_o \cdot (m \cdot \rho) dp = \frac{q \cdot \alpha}{m} \cdot J_1 \cdot (m \cdot \alpha) \quad (4.45)$$

где је $\alpha = \frac{a}{H}$. Хенкелов инверзни израз је:

$$\bar{f}(m) = \int_0^a q \cdot p \cdot J_o \cdot (m \cdot \rho) dp = q \cdot \alpha \cdot \int_0^\infty J_o \cdot (m \cdot \rho) \cdot J_1 \cdot (m \cdot \alpha) dm \quad (4.46)$$

Ако је R^* напон или померање из једначина од 4.39 до 4.44 услед оптерећења $-mJ_0(m\rho)$ и R зависи од оптерећења q , напон затезања има негативан предзнак и тада је:

$$R = q \cdot \alpha \int_0^{\infty} \frac{R^*}{m} \cdot J_1 \cdot (m \cdot \alpha) dm \quad (4.47)$$

Анализа слојевитог система се на основу тога може сумирати на следећи начин:

- додељивати узастопне вредности m , од 0 па до прилично великог позитивног броја све док R у једначини 4.47 конвергира
- за сваку вредност m , одредити константе интеграцијом A_i , B_i , C_i и D_i из граничних услова и услова континуитета
- заменити ове константе у једначине од 4.39 до 4.44 да би се могло одредити R^*
- одредити R из једначине 4.47 нумеричком интеграцијом

Поступком нумеричке интеграције нулте вредности за $J_0(m\rho)$ и $J_0(m\alpha)$ су одређене и интеграл између те две нулте вредности се одређује помоћу Гаусовог алгоритма са 4 непознате. С обзиром на чињеницу да први круг интеграције мора да буде са пуно ситних одсечака, поготово ако је ρ велико, интервал између 0 и 2.40483, где се налази нула за J_0 , је издељен на 6 подинтервала, а између 2.40483 и 3.83171, где се налази нула од J_1 , је подељен на два подинтервала. Интеграл сваког од подинтервала се такође одређује Гаусовим алгоритмом са 4 непознате.

4.2.5.1 ГРАНИЧНИ УСЛОВИ И УСЛОВИ КОНТИНУИТЕТА

На горњој површини, $i=1$ и $\lambda=0$, гранични услови:

$$(\sigma_z^*)_1 = -m \cdot J_0 \cdot (m \cdot \rho) \quad (4.48)$$

$$(\tau_{rz}^*)_1 = 0 \quad (4.49)$$

су манифестовани кроз две једначине:

$$\begin{bmatrix} e^{-m\lambda_1} & 1 \\ e^{-m\lambda_1} & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} A_1 \\ B_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -(1-2 \cdot \nu_1) \cdot e^{-m\lambda_1} & 1-2 \cdot \nu_1 \\ 2 \cdot \nu_1 \cdot e^{-m\lambda_1} & 2 \cdot \nu_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} C_1 \\ D_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 1 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (4.50)$$

Сви услови за слојевите системе засновани на претпоставци да су слојеви потпуно повезани, имају исте вертикалне и смичуће напоне, вертикална и радијална померања, у свакој тачки површине.

Стога, када је $\lambda=\lambda_i$, услови континуитета:

$$(\sigma_z^*)_i = (\sigma_z^*)_{i+1} \quad (4.51)$$

$$(\tau_{rz}^*)_i = (\tau_{rz}^*)_{i+1} \quad (4.52)$$

$$(w^*)_i = (w^*)_{i+1} \quad (4.53)$$

$$(u^*)_i = (u^*)_{i+1} \quad (4.54)$$

изражени су кроз четири једначине:

$$\begin{bmatrix} 1 & F_i & -(1-2 \cdot v_i - m \cdot \lambda_i) & -(1-2 \cdot v_i + m \cdot \lambda_i) \cdot F_i \\ 1 & -F_i & 2 \cdot v_i + m \cdot \lambda_i & (2 \cdot v_i - m \cdot \lambda_i) \cdot F_i \\ 1 & F_i & 1 + m \cdot \lambda_i & -(1 - m \cdot \lambda_i) \cdot F_i \\ 1 & -F_i & -(2-4 \cdot v_i - m \cdot \lambda_i) & -(2-4 \cdot v_i + m \cdot \lambda_i) \cdot F_i \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \\ D_i \end{Bmatrix} = \quad (4.55)$$

$$= \begin{bmatrix} F_{i+1} & 1 & -(1-2 \cdot v_{i+1} - m \cdot \lambda_{i+1}) \cdot F_{i+1} & 1-2 \cdot v_{i+1} + m \cdot \lambda_i \\ F_{i+1} & -1 & (2 \cdot v_i + m \cdot \lambda_i) \cdot F_{i+1} & 2 \cdot v_{i+1} - m \cdot \lambda_i \\ R_i \cdot F_{i+1} & R_i & (1 + m \cdot \lambda_i) \cdot R_i \cdot F_{i+1} & -(1 - m \cdot \lambda_i) \cdot R_i \\ R_i \cdot F_{i+1} & -R_i & -(2-4 \cdot v_{i+1} - m \cdot \lambda_i) \cdot R_i \cdot F_{i+1} & -(2-4 \cdot v_{i+1} + m \cdot \lambda_i) \cdot R_i \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} A_{i+1} \\ B_{i+1} \\ C_{i+1} \\ D_{i+1} \end{Bmatrix}$$

где је:

$$F_i = e^{-m \cdot (\lambda_i - \lambda_{i-1})} \quad (4.56)$$

$$R_i = \frac{E_i}{E_{i+1}} \cdot \frac{1 + v_{i+1}}{1 + v_i} \quad (4.57)$$

Пошто напони и померања морају нестати када λ тежи бесконачности, може се закључити, из једначине 4.38, да је за најнижи слој са $i=n$

$$A_n = C_n = 0 \quad (4.58)$$

За систем са n слојева, постоје $4n$ константи интеграције. Са $A_n = C_n = 0$, преостају $4n-2$ константе које морају бити одређене из $4n-2$ једначине, две су из једначине 4.50, а осталих $4(n-1)$ из једначина 4.55.

У рачунарском програму за ове операције се може уштедети време трајања рачунања ако се само две једначине реше, умесето $4n-2$. То се постиже на следећи начин, ако се једначине 4.55 трансформишу у:

$$\begin{Bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \\ D_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \times 4 \\ \text{matrica} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} A_{i+1} \\ B_{i+1} \\ C_{i+1} \\ D_{i+1} \end{Bmatrix} \quad (4.59)$$

Узастопним множењима, константе за први слој бивају преведене у оне за последњи слој помоћу:

$$\begin{Bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \\ D_i \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \times 2 \\ \text{matrica} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} B_n \\ D_n \end{Bmatrix} \quad (4.60)$$

Када се једначина 4.60 замени у једначини 4.50, две једначине са две непознате, B_n и D_n се могу одредити. Када су одређене непознате B_n и D_n , могу се заменити у једначини 4.59, уз $A_n = C_n = 0$, ради одређивања константи за $(n-1.)$ слој. Поступак замене се понавља све док константе од најнижег па до највишег слоја не буду одређене.

Кад је i -та контактна површина, или $\lambda = \lambda_i$, неvezана или са малим трењем, континуитет смичућег напона и радијалног померања мора бити замењен са нултим смичућим напоном са обе стране контактне површине.

$$(\sigma_z^*)_i = (\sigma_z^*)_{i+1} \quad (4.61)$$

$$(w^*)_i = (w^*)_{i+1} \quad (4.62)$$

$$(\tau_{rz}^*)_i = 0 \quad (4.63)$$

$$(\tau_{rz}^*)_{i+1} = 0 \quad (4.64)$$

Стога, једначине 4.55 морају бити замењене са:

$$\begin{bmatrix} 1 & F_i & -(1-2 \cdot v_i - m \cdot \lambda_i) & (1-2 \cdot v_i - m \cdot \lambda_i) \cdot F_i \\ 1 & F_i & 1+m \cdot \lambda_i & -(1-m \cdot \lambda_i) \cdot F_i \\ 1 & -F_i & 2 \cdot v_i + m \cdot \lambda_i & (2 \cdot v_i - m \cdot \lambda_i) \cdot F_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \\ D_i \end{Bmatrix} = \quad (4.65)$$

$$\begin{bmatrix} F_{i+1} & 1 & -(1-2 \cdot v_{i+1} - m \cdot \lambda_i) \cdot F_{i+1} & 1-2 \cdot v_{i+1} - m \cdot \lambda_i \\ R_i \cdot F_{i+1} & R_i & 1+m \cdot \lambda_i & -(1-m \cdot \lambda_i) \cdot R_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ F_{i+1} & -1 & (2 \cdot v_{i+1} + m \cdot \lambda_i) \cdot F_{i+1} & 2 \cdot v_{i+1} - m \cdot \lambda_i \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} A_{i+1} \\ B_{i+1} \\ C_{i+1} \\ D_{i+1} \end{Bmatrix}$$

Обе ове једначине 4.55 и 4.65 су употребљене у програмском пакету КЕНЛЕЈЕР (KENLAYER)[2]. Ако је нека контактна површина везана, примењује се једначина 4.55. Ако је нека контактна површина са малим трењем, онда се примењује једначина 4.65. Овај програм је знатно ефикаснији ако су све контактне површине непомерљиве, јер тада се одређују само две једначине. Ако је једна или више контактних површина са малим трењем, програм је мање ефикасан, јер му треба времена да израчуна $4n-2$ једначине.

4.2.6 ДВОСЛОЈНИ СИСТЕМИ

Тачна дефиниција двослојног система је када је танак слој асфалтног бетона по врућем поступку постављен директно на постељицу. Ако је коловозна конструкција састављена из три слоја (хабајући слој, битуменизирани носећи слој и постељица), неопходно је комбиновати носећи слој и постељицу као један слој за израчунавање напона и дилатација у хабајућем слоју или комбиновати хабајући и носећи слој за израчунавање напона и дилатација у постељици.

4.2.6.1 ВЕРТИКАЛНИ НАПОНИ

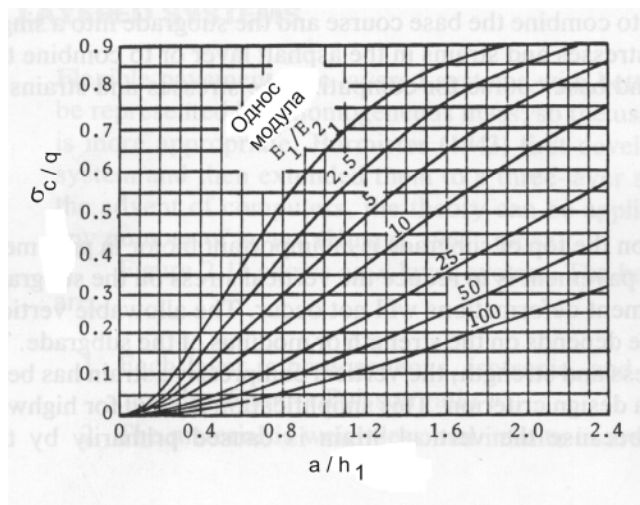
Вертикални напони на врху постељице су значајан фактор у димензионисању коловозних конструкција. Улога коловозне конструкције је да смањи вертикалне напоне на постељицу, тако да штетне деформације конструкције буду избегнуте. Допуштени вертикални напон на одређеној постељици зависи од чврстоће или модула постељице. Комбиновањем ефеката напона и чврстоће, вертикална дилатација настала услед притиска је најчешћи критеријум при димензионисању. Ово поједностављење важи за аутопутеве и аеродромске писте, јер је вертикална дилатација првенствено изазвана вертикалним напоном, док су ефекти хоризонталног напона релативно мали.

Напони у двослојном систему зависе од односа модула E_1/E_2 и односа дебљине и радијуса h_1/a . На слици 4.12 (Бармистер) (Burmister, 1958) [13] је приказан ефекат слоја коловозне конструкције на расподелу вертикалних напона услед централно оптерећене кружне површине. Дијаграм је примењив у случајевима када је дебљина h_1 слоја 1 једнака радијусу контактне површине, односно $h_1/a=1$. Претпоставља се да је Поасонов коефицијент за све слојеве једнак 0.5. Може се видети да вертикални напон значајно опада са повећањем односа модула. На контактної површини између коловозне конструкције и постељице, вертикални напон је око 68% од примењеног притиска ако је $E_1/E_2=1$, као што показује расподела напона по Бусинеску и редукује се на око 8% примењеног оптерећења ако је $E_1/E_2=100$.



Слика 4.12 Расподела вертикалног напона у двослојној систему

На слици 4.13 је приказан ефекат дебљине коловозне конструкције и односа модула на вертикални напон σ_c на контактної површини коловозне конструкције и постелице, испод центра оптерећене кружне површине. За примењени притисак q вертикални напон расте са порастом контактног радијуса, а опада са порастом дебљине.



Слика 4.13 Вертикални контактни напони код двослојног система [12]

Дозвољени вертикални притисак зависи од броја понављања оптерећења. На основу критеријума за димензионасање према методу Шела (Shell) и на

основу једначине AASHTO, Хуанг и сарадници су (Huang)(1984b)[14] развили следећу релацију:

$$N_d = 4.873 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{\sigma_c}{6.9} \right)^{-3.734} \cdot \left(\frac{E_2}{6.9} \right)^{3.583} \quad (4.66)$$

где је:

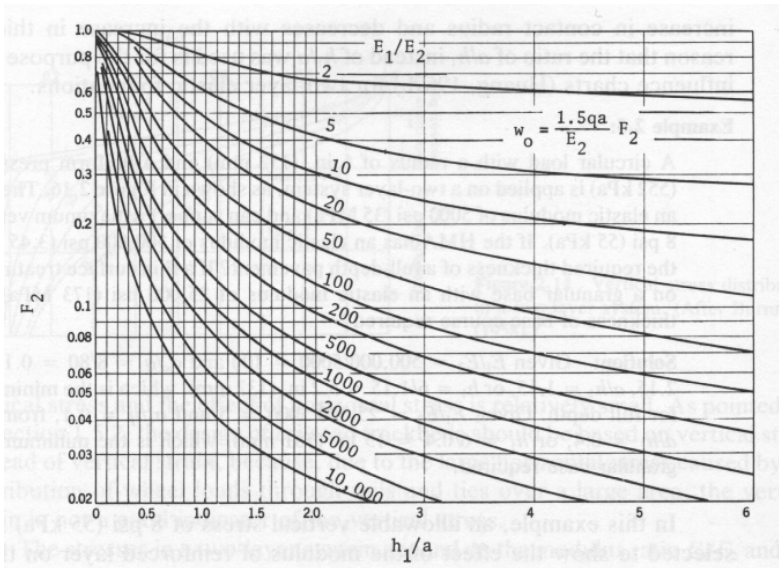
N_d - дозвољени број понављања оптерећења за ограничавање трајне деформације

σ_c - вертикални напон притиска на површину постељице [kPa]

E_2 - еластични модул на постељици [kPa]

4.2.6.2 ВЕРТИКАЛНЕ ДЕФЛЕКСИЈЕ НА ЗАСТОРУ

Вертикалне дефлексије на застору се користе као критеријум за димензионисање коловозне конструкције. На слици 4.14 је дијаграм који може бити употребљен за одређивање дефлексија застора код двослојног система.



Слика 4.14 Вертикалне дефлексије застора за двослојни систем

Дефлексије су изражене помоћу дефлексионог фактора F_2 изразима [10]:

- кад је контактна површина за преношење оптерећења флексибилна

$$w_o = \frac{1.5 \cdot q \cdot a}{E_2} \cdot F_2 \quad (4.67)$$

- кад је контактна површина за преношење оптерећења крута

$$w_o = \frac{1.18 \cdot q \cdot a}{E_2} \cdot F_2 \quad (4.68)$$

где је:

q - јединично оптерећење по кружној плочи

a - радијус контактне површине

E_2 - модул еластичности доњег слоја

F_2 - бездимензиони дефлексиони фактор

Дефлексиони фактор је функција односа модула E_1/E_2 и h_1/a . За хомогени полупростор са односом $h_1/a=0$ и $F_2=1$, једначина 4.67 једнака је једначини 4.25 за $\nu=0.5$. Ако се оптерећење преноси преко круте контактне површине, тада је једначина 4.27, за исте услове као за једначину 4.25, једнака је једначини 4.68.

4.2.6.3 ВЕРТИКАЛНЕ ДЕФЛЕКСИЈЕ НА КОНТАКТНОЈ ПОВРШИНИ

Вертикалне дефлексије контактних површина су, такође, коришћене као критеријум за димензионисање.

Хуанг (Huang)(1969b)[14] је израдио систем дијаграма који одређују вертикалне дефлексије на контактним површинама за двослојни систем. Дефлексија је изражена у зависности од дефлексионог фактора F помоћу израза:

$$w = \frac{q \cdot a}{E_2} \cdot F \quad (4.69)$$

Дефлексиони фактор зависи од односа E_1/E_2 , h_1/a и r/a , где је r - радијално одстојање од центра оптерећене површине. Израђено је 7 дијаграма са односима модула еластичности од 1, 2.5, 5, 10, 25, 50 и 100. Однос модула $E_1/E_2=1$, представља Бусинесково решење.

4.2.6.4 КРИТИЧНА ДИЛАТАЦИЈА ПРИ ЗАТЕЗАЊУ

Дилатација при затезању на дну битуменом везаног слоја се користи као пројектни критеријум за одређивање настајања пукотина услед замора. У том смислу разматрана су два типа главних дилатација. Један тип каже да је главна дилатација заснована на свих шест компонената нормалних и смичућих напона. Према другом типу, главна хоризонтална дилатација

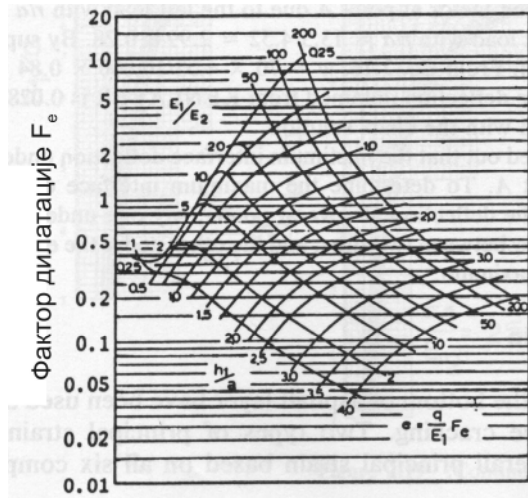
зависи само од хоризонталног и смичућег напона. Укупна главна дилатација је незнатно већа од хоризонталне главне дилатације, те је стога употреба укупне главне дилатације на страни сигурности. Хуанг (Huang)(1973)[16] је развио дијаграме за одређивање критичне дилатације при затезању на дну првог слоја (горњег слоја) у двослојном систему. Критична дилатација при затезању је укупна дилатација и одређена је помоћу израза:

$$e = \frac{q}{E_1} \cdot F_e \quad (4.70)$$

где је:

e - критична дилатација при затезању

F_e - фактор дилатације који се може одредити из дијаграма (слика 4.15)



Слика 4.15 Дилатациони фактор за један тачак [16]

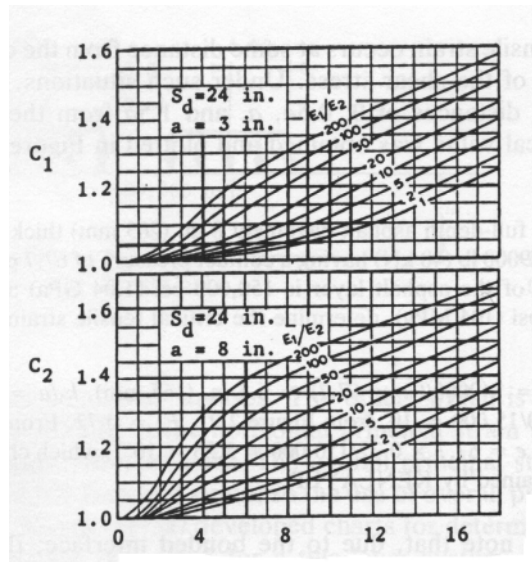
УТИЦАЈИ ЈЕДНОГ ТОЧКА

На слици 4.15 је приказан фактор дилатације за двослојни систем под кружно оптерећеном контактном површином. У највећем броју случајева, критична дилатација при затезању се јавља испод центра оптерећене површине, где је смичући напон једнак нули. Када су и h_1/a и E_1/E_2 мали, критична дилатација при затезању се јавља на одређеном одстојању од центра, у зависности од доминирајућег ефекта смичућег напона. У таквој ситуацији, главна дилатација при затезању на радијалном одстојању од 0, 0.5а, а и 1.5а од центра је израчуната и критична вредност је добијена и нацртана на дијаграму на слици 4.15.

УТИЦАЈИ ДВОЈНОГ ТОЧКА

С обзиром да фактор дилатације за двојни точак са контактним радијусом a и растојањем између тачкова S_d зависи од односа S_d/a , уз h_1/a и E_1/E_2 , најдиректнији метод је приказ помоћу дијаграма сличног оном на слици 4.15, али за однос S_d/a . Ипак, то захтева серију дијаграма, тако да интерполација може захтевати више времена. Да би то било избегнуто, развијен је јединствен метод који захтева само један дијаграм, као што је приказано на слици 4.16 [16].

Овим методом, двојни точак је замењен једним тачком са истим контактним радијусом a , тако да дијаграм са слике 4.15, такође, може да се користи. Фактор дилатације за двојни точак је већи од фактора дилатације за један точак, те се стога уводи фактор конверзије C који мора бити одређен, а који представља однос између фактора дилатације за двојни и фактора дилатације за један точак. Множењем фактора конверзије са фактором дилатације одређеном на слици 4.15 добија се фактор дилатације за двојни точак.



Слика 4.16 Фактор конверзије за двојни точак (пример за контактне радијусе $a = 3$ in. и $a = 8$ in.) (дебљина слојева у in.)

Теорија двослојног система указује да фактор дилатације за двојни точак зависи од h_1/a , S_d/a и E_1/E_2 . Докле год однос h_1/a и S_d/a остаје исти, фактор дилатације ће бити исти, без обзира на величину контактнoг радијуса a . Дијаграми са слике 4.16 могу бити примењени за било које вредности S_d заменом a и h_1 , пропорционално са S_d , тако да односи h_1/a и S_d/a буду исти. Поступак је следећи:

- 1) За задато S_d , h_1 и a , одређује се модификовани радијус a' и модификована дебљина h_1' :

$$a' = \frac{24}{S_d} \cdot a \quad (4.71)$$

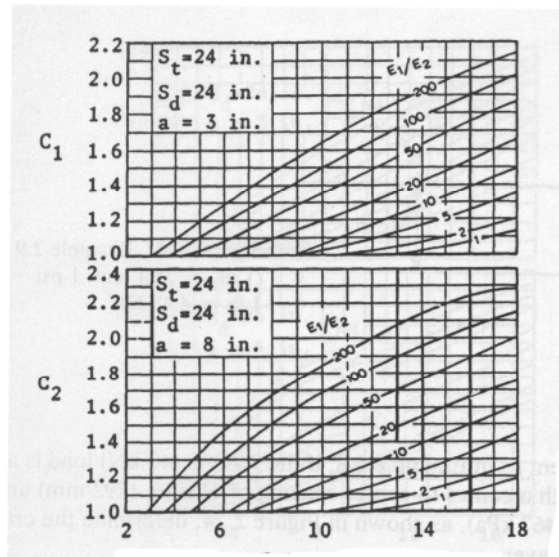
$$h_1' = \frac{24}{S_d} \cdot h_1 \quad (6.72)$$

- 2) Употребом h_1' као дебљине коловозне конструкције, одредити фактор конверзије C_1 и C_2 са слике 4.16.
- 3) Одредити факторе конверзије за a' употребом линеарне интерполације између 3 и 8 инча, односно:

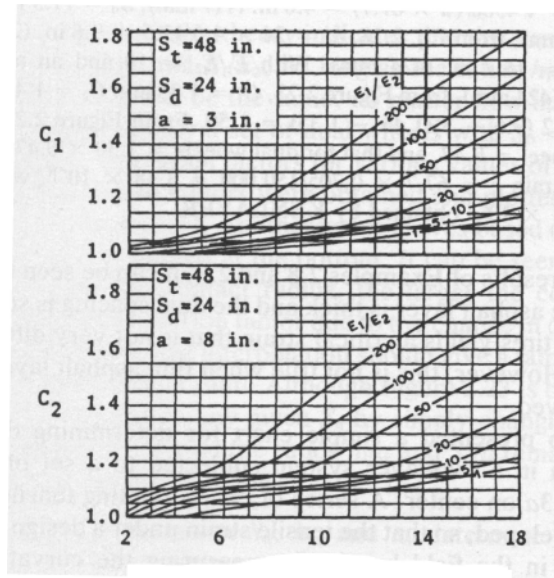
$$C = C_1 + 0.2 \cdot (a' - 3) \cdot (C_2 - C_1) \quad (4.73)$$

УТИЦАЈИ ДВОЈНОГ ТАНДЕМ ТОЧКА

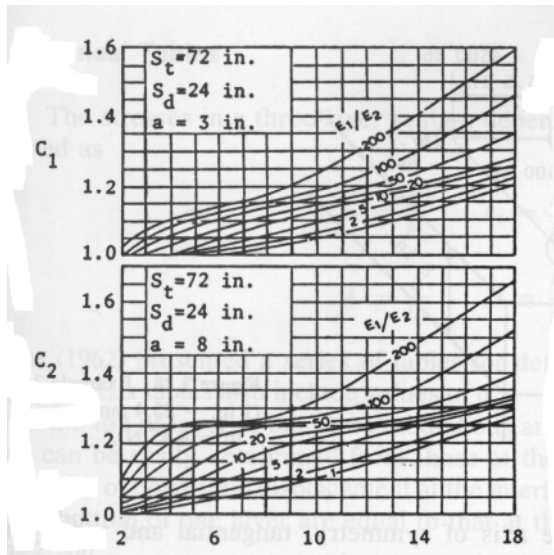
Дијаграми су слични оном са слике 4.16, сем што је овде распон точкова S_d и распон тандема S_t , а развијени су за одређивање фактора конверзије за двојне тандем точкове и приказани су на сликама 4.17 [16], 4.18 [16] и 4.19 [16].



Слика 4.17 Фактор конверзије за двојни тандем - растојање тандема од 24 in. (пример за контактне радијусе $a = 3$ in. и $a = 8$ in.) (дебљина слојева у in.)



Слика 4.18 Фактор конверзије за двојни тандем - растојање тандема од 48 in. (пример за контактне радијусе $a = 3$ in. и $a = 8$ in.) (дебљина слојева у in.)



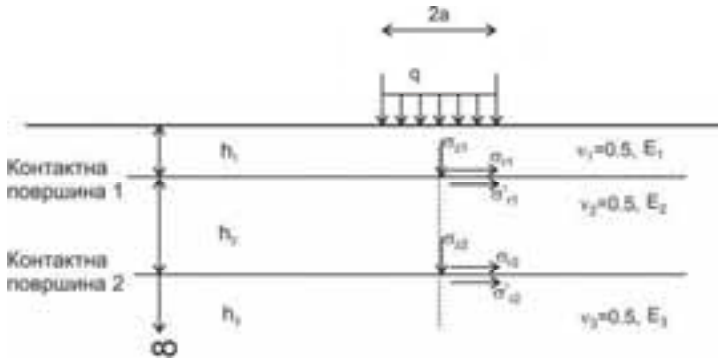
Слика 4.19 Фактор конверзије за двојни тандем - растојање тандема од 72 in. (пример за контактне радијусе $a = 3$ in. и $a = 8$ in.) (дебљина слојева у in.)

Основни принцип примене ових дијаграма је да фактор конверзије за двојне тандем тачкове зависи од h_1/a , S_d/a и S_t/a . Актуелни S_d не мора да буде једнак 24 in (610 mm), те га треба прерачунати на 24 in (610 mm) и тада променити контактни радијус a , према једначини 4.71, али да се однос S_d/a не промени. Вредности h_1 и S_t се, такође, могу прерачунати, тако да односи h_1/a и S_t/a остану непромењени. За вредности S_t од 24, 48 и 72 in. (0.61, 1.22 и 1.83 m) конверзиони фактори могу бити одређени са дијаграма, док се за друге вредности S_t мора урадити интерполација.

Упоредњем дијаграма са слике 4.16 и дијаграма са слика 4.17, 4.18 и 4.19 јасно се уочава да примена тандем тачкова редукује фактор конверзије, чиме се смањује критична дилатација при затезању. Ово је последица суперпонираног ефекта двојних тачкова. Међусобно деловање двојних тачкова је непредвидљиво, што се манифестује нерегуларним обликом кривих линија у доњем делу дијаграма на сликама 4.18 и 4.19.

4.2.7 ТРОСЛОЈНИ СИСТЕМ

На слици 4.20 је приказан трослојни систем и напони који се налазе у оси симетрије на контактним површинама.



Слика 4.20 Шема трослојног система

Напони који се разматрају су: вертикални напон на контактної површини 1, σ_{z1} , вертикални напон на контактної површини 2, σ_{z2} и радијални напон на дну првог слоја σ_{r1} , радијални напон на врху другог слоја σ'_{r1} , радијални напон на дну другог слоја σ_{r2} и радијални напон на врху трећег слоја σ'_{r2} . Тангенцијални и радијални напони у оси симетрије су једнаки, а смичући напон је једнак 0. Ако је Пуасонов коефицијент једнак 0.5, тада из једначине 4.17 следи:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} \cdot (\sigma_z - \sigma_r) \quad (4.74)$$

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2 \cdot E} \cdot (\sigma_r - \sigma_z) \quad (4.75)$$

Из једначина 4.74 и 4.75 се може уочити да је радијална дилатација једнака једној половини вертикалне дилатације, али са супротним знаком.

$$\varepsilon_z = -2 \cdot \varepsilon_r \quad (4.76)$$

То физички значи да, ако је материјал нестишљив и са Поасоновим коефицијентом $\nu=0.5$, хоризонтална дилатација је једнака једној половини вертикалне дилатације и збир све три дилатације ε_z , ε_r и ε_t мора бити једнак 0.

Постоје и други модели изражавања напона и дилатација у трослојном систему. То су Џонсове табеле (Jones) (1962) [17] и Питијеви дијаграми (Peattie)(1962) [18].

4.3 ВИСКОЕЛАСТИЧНО ПОНАШАЊЕ

Вискоеластичан материјал поседује и карактеристике еластичности крутог тела и вискозне карактеристике флуида. Ако претпоставимо да је материјал облика лопте и бацимо га на под, он ће одскочити и тада, кажемо да је еластичан. Ако лопта остане на поду и почне да тече и да се изравнава под сопственом тежином, каже се да је вискозна. Услед вискозне компоненте, понашање вискоеластичног материјала је временски зависно; што је време дужи, материјал ће више тећи. Због вискоеластичне природе асфалта произведеног по врућем поступку чије понашање зависи од времена трајања оптерећења, логично је да треба применити вискоеластичан модел за разматрање слојевитих система. Основна процедура је заснована на еластично-вискоеластичном принципу који користи Лапласов (Laplace) модел трансформације ради замене временске променљиве t са трансформационом променљивом p , чиме се вискоеластични проблем трансформише у одговарајући еластични проблем. Инверзијом оваквог еластичног проблема добија се вискоеластични проблем.

4.3.1 ОСНОВНИ МЕХАНИЧКИ МОДЕЛИ

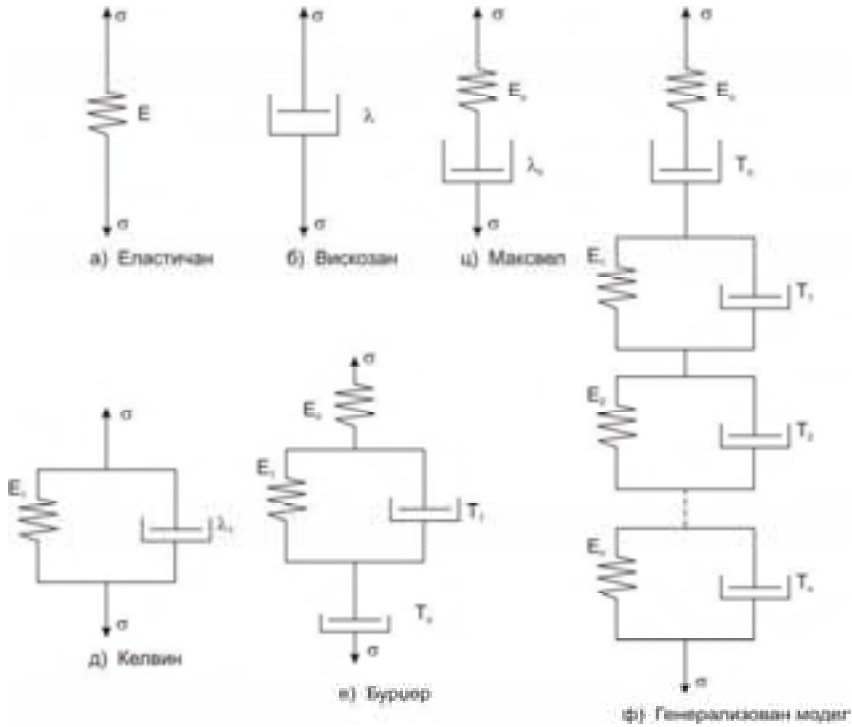
На слици 4.21 су приказани различити механички модели који карактеришу вискоеластичне материјале. Модели су формирано од два основна елемента: опруге и клипа.

Еластичан материјал је приказан помоћу опруге (сл. 4.21a) и одликује се Хуковим законом, што значи да је напон пропорционалан дилатацији:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (4.77)$$

где је:

σ - напон
 ε - дилатација
 E - модул еластичности



Слика 4.21 Механички модели вискоеластичних материјала

Вискозан материјал је приказан (сл. 4.21б) помоћу клипа и задовољава Њутнов закон и тада је напон пропорционалан времену трајања дилатације:

$$\sigma = \lambda \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (4.78)$$

где је:

λ - вискозитет

t - време

При константном напону, једначина 4.78 постаје, после интеграције:

$$\varepsilon = \frac{\sigma \cdot t}{\lambda} \quad (4.79)$$

Максвелов (Maxwell) модел је комбинација редно везаних опруге и клипа (сл. 4.22ц). При константном напону, укупна дилатација је једнака збиру дилатације опруге и клипа. Из једначина 4.77 и 4.79 се добија да је дилатација једнака:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_o} + \frac{\sigma \cdot t}{\lambda_o} = \frac{\sigma}{E_o} \cdot \left(1 + \frac{t}{T_o} \right) \quad (4.80)$$

где је време релаксације једнако $T_o = \frac{\lambda_o}{E_o}$. Индекс **o** се односи на Максвелов модел. Ако је примењени напон σ_o на модел тренутан, опругу одликује тренутна дилатација $\varepsilon_o = \frac{\sigma_o}{E_o}$. Ако је, пак, дилатација константна, напон постепено слаби, а после дужег временског периода потпуно нестаје и тада је нула. То може бити показано решењем диференцијалне једначине:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{1}{E_o} \frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\sigma}{\lambda_o} \quad (4.81)$$

Први члан са десне стране једначине 4.81 је величина дилатације услед дејства опруге, а други услед дејства клипа. Ако је дилатација константна, $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = 0$, или после интеграције, тада је:

$$\sigma = \sigma_o \cdot e^{\left(-\frac{t}{T_o} \right)} \quad (4.82)$$

Из једначине 4.82 се могу уочити гранични услови. Ако је $t = 0$, тада $\sigma = \sigma_o$; када је $t = \infty$, тада је $\sigma = 0$; и када је $t = T_o$, онда је $\sigma = 0.368\sigma_o$. Ово значи, да је потребно време релаксације T_o за смањење напона од почетне вредности за 36.8%. У физичком смислу, време релаксације од 10 минута обезбеђује пад напона за 36.8% од своје првобитне вредности.

Келвинов (Kelvin) модел представља паралелно везане опругу и клип (сл. 4.21д). И опруга и клип имају исту дилатацију, док им је напон једнак збиру напона од клипа и опруге. Индекс 1 представља Келвинов модел.

$$\sigma = E_1 \cdot \varepsilon + \lambda_1 \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad (4.83)$$

При константном напону, дилатација после интеграције је:

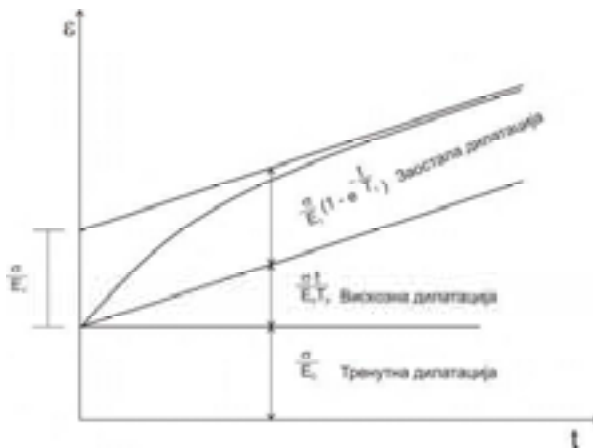
$$\int_0^{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{\sigma - E_1 \cdot \varepsilon} = \int_0^t \frac{dt}{\lambda_1} \quad \Rightarrow \quad \varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} \cdot \left[1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right] \quad (4.84)$$

где је $T_1 = \frac{\lambda_1}{E_1}$ време током кога се формира заостала еластична дилатација (време ретардације). Гранични услови се могу уочити из једначине 4.84 и то, када је $t = 0$, онда је $\varepsilon = 0$; када је $t = \infty$, тада је $\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1}$, односно, боље речено, опруга је потпуно истегнута до њене заостале еластичне дилатације; и када је $t = T_1$, тада је $\varepsilon = 0.632\sigma/E_1$. Дакле, време ретардације T_1 , у Келвиновом моделу, је време за које се за 63.2% повећа укупна заостала дилатација.

Бургеров (Burger) модел је комбинација редно везаних Максвеловог и Келвиног тела (сл. 4.21е). При константном напону, из једначина 4.80 и 4.84, се види да је дилатација:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} \cdot \left[1 + \frac{t}{T_0} \right] + \frac{\sigma}{E_1} \cdot \left[1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right] \quad (4.85)$$

Укупна дилатација је комбинација три дилатације: тренутне еластичне дилатације, вискозне дилатације и заостале еластичне дилатације (сл. 4.22). Квалитативно, Бургеров модел веома добро приказује понашање вискоеластичног материјала. Квантитативно, само један Келвинов модел није довољан за покривање дужег временског периода током кога се јавља заостала еластична дилатација, па је због тога потребан већи број Келвинових тела.



Слика 4.22 Бургеров модел; три компоненте дилатације

Генерализован модел (сл. 4.21ф) се користи за приказивање било ког вискоеластичног материјала. При константном напону, дилатација генерализованог тела може бити изражена помоћу израза:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} \cdot \left[1 + \frac{t}{T_0} \right] + \sum_{i=1}^n \frac{\sigma}{E_i} \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{T_i}\right)} \right] \quad (4.86)$$

где n представља број понављања Келвинових тела. Овај модел представља ефекат трајања оптерећења на утицаје у коловозној конструкцији. Под само једним деловањем оптерећења, тренутна и заостала еластична дилатација су доминантне, док је вискозна дилатација занемарљива. Али, под великим бројем понављања оптерећења, акумулира се вискозна дилатација која изазива трајне деформације.

4.3.2 ТЕЧЕЊЕ КАО КАРАКТЕРИСТИКА ВИСКООЕЛАСТИЧНИХ МАТЕРИЈАЛА

Процес којим се у различитим временским интервалима карактеришу вискоеластичне карактеристике материјала је течење, које је дефинисано помоћу:

$$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma} \quad (4.87)$$

где је:

$\varepsilon(t)$ - временски зависна дилатација при константном напону

При деловању константног напона, течење је реципрочна вредност Јунговог модула (Young's modulus). Код генерализованог модела, течење може бити изражено помоћу:

$$D(t) = \frac{1}{E_0} \cdot \left[1 + \frac{t}{T_0} \right] + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{t}{T_i}\right)} \right] \quad (4.88)$$

При различитим вискоеластичним константама, E_0 , T_0 , E_i и T_i , код генерализованог модела, течење се, у различитим временским тренуцима, израчунава помоћу једначине 4.88.

Ако је крива течења дата, вискоеластичне константе генерализованог модела могу бити одређене методом узастопних остатака или методом респоређивања.

4.3.3 МЕТОД РАСПОРЕЂИВАЊА

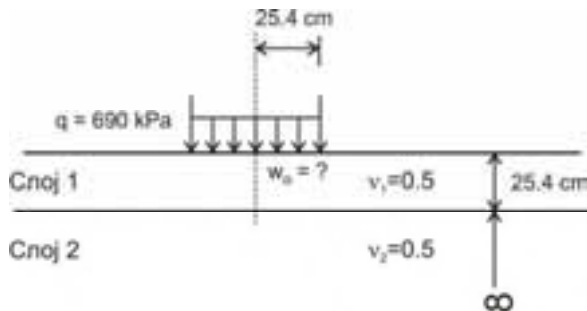
Метод распоређивања је апроксимативан поступак замене израчунатих и тренутних, утицаја за претходно одређено временско трајање. Уместо одређивања оба утицаја E_i и T_i , поступком узастопних остатака, неколико вредности T_i се претпостави и одреде се одговарајући E_i решавањем система симултаних једначина. Овај метод се користи за превођење материјала из еластичних стања у вискоеластична стања.

ЕЛАСТИЧНА СТАЊА

Нека је за познати временски интервал задато течење за сваки вискоеластичан материјал (приказано на следећем примеру).

Пример 1:

На слици 4.23 је приказан двослојни вискоеластични систем оптерећен равномерним притиском од 690 kPa преко кружне површине радијуса од 254 mm. Дебљина слоја 1 је 254 mm, а оба слоја су нестишљива, са Поасоновим коефицијентом од 0.5. Течење оба ова материјала је табеларно приказано у табели 4.2. Одредити дефлексију површине у центру оптерећене површине у задатим временским тренуцима.



Слика 4.23 Пример 1

Табела 4.2 Течење материјала у слојевима и дефлексије на површини

Време [s]	0.01	0.1	1	10	100
Слој 1 $D(t)[10^{-6}/\text{kPa}]$	0.148	0.175	0.389	1.344	2.655
Слој 2 $D(t)[10^{-6}/\text{kPa}]$	0.152	1.060	2.829	10.610	15.942
Дефлексија w_0 [mm]	0.041	0.163	0.406	1.499	231.038

Решење: Ако је коефицијент модула већи од 1, дефлексија на површини w_0 у било ком временском тренутку је одређена са

слике 4.14. Нека је $t = 1$ s. Модул еластичности је реципрочна вредност течења.

За слој 1, $E_1 = 1 / (0.389 \times 10^{-6}) = 2.57$ GPa

За слој 2, $E_2 = 1 / (2.829 \times 10^{-6}) = 353$ MPa,

$E_1/E_2 = 2570/353 = 7.28$

Са слике 4.14 следи $F_2 = 0.54$, тако да је:

$$w_o = \frac{1.5 \cdot q \cdot a}{E_2} \cdot F_2 = \frac{1.5 \cdot 690 \cdot 10^3 \cdot 0.254 \cdot 0.54}{(353 \cdot 10^6)} = 0.402 \text{ mm}$$

Исти поступак се примењује и за остале временске тренутке.

Треба обратити пажњу да овај поступак није тачно вискоеластично решење. То је квазиеластично решење које је веома блиска апроксимација вискоеластичног решења.

ДИРИХЛЕОВИ (DIRICHLET) РЕДОВИ

Димензионисање коловозне конструкције се заснива на покретним оптерећењима у веома кратким временским интервалима. Течење $D(t)$ изазвано вискозном дилатацијом је неизбежно, тако да једначина 4.88 може бити написана као:

$$D(t) = \frac{1}{E_o} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \cdot \left[1 - e^{-\frac{t}{T_i}} \right] \quad (4.89)$$

Због тога је подесно изразити течење преко Дирихлеовог реда, односно као:

$$D(t) = \sum_{i=1}^n G_i \cdot e^{-\frac{t}{T_i}} \quad (4.90)$$

Поређењем једначина 4.89 и 4.90, када је $T_n = \infty$, види се да је:

$$G_i = -\frac{1}{E_i} \quad (4.91)$$

$$G_n = \frac{1}{E_o} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_i} \quad (4.92)$$

У већ поменутом рачунарском програму КЕНЛЕЈЕР (KENLAYER)[2], овај поступак рачунања је примењен у методу распоређивања, при прорачуну течења и код анализе покретног оптерећења.

ПОСТУПАК РАСПОРЕЂИВАЊА КОД ТЕЧЕЊА

Течење вискоеластичних материјала се одређује опитом течења. Према Федералној управи за аутопутеве (FHWA)(1978)[19], треба урадити 1000 опита течења у 11 различитих временских тренутака и то: 0.001, 0.003, 0.01, 0.03, 0.1, 0.3, 1, 3, 10, 30 и 100, мада могу бити употребљени и други временски тренуци.

Због веома кратког трајања покретног оптерећења, време заостајања T_1 од 0.01, 0.03, 0.1, 1, 10, 30 и ∞ секунди је предвиђено у програму КЕНЛЕЈЕР. Ако се течење одређује у 7 временских тренутака, коефицијенти G_1 до G_7 могу бити одређени из једначине 4.90 решавањем 7 симултаних једначина. Ако је течење у 11 временских тренутака, постоји 11 једначина са 7 непознатих, тако да 11 једначина мора бити сведено на 7. Када се одреде коефицијенти G_1 до G_7 , течење у било ком тренутку може бити израчунато помоћу једначине 4.90.

$$\begin{aligned}
 & \begin{vmatrix} e^{(-\frac{t_1}{T_1})} & \cdot & e^{(-\frac{t_{11}}{T_1})} \\ \cdot & 7 \times 11 & \cdot \\ e^{(-\frac{t_1}{T_7})} & \cdot & e^{(-\frac{t_{11}}{T_7})} \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} e^{(-\frac{t_1}{T_1})} & \cdot & e^{(-\frac{t_1}{T_7})} \\ \cdot & 11 \times 7 & \cdot \\ e^{(-\frac{t_{11}}{T_1})} & \cdot & e^{(-\frac{t_{11}}{T_7})} \end{vmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} G_1 \\ \cdot \\ G_7 \end{Bmatrix} = \\
 & = \begin{vmatrix} e^{(-\frac{t_1}{T_1})} & \cdot & e^{(-\frac{t_{11}}{T_1})} \\ \cdot & 7 \times 11 & \cdot \\ e^{(-\frac{t_1}{T_7})} & \cdot & e^{(-\frac{t_{11}}{T_7})} \end{vmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} D_1 \\ \cdot \\ D_{11} \end{Bmatrix} \quad (4.93)
 \end{aligned}$$

Пример 2:

Претпоставља се да течење вискоеластичног материјала може бити приказано помоћу:

$$D(t) = G_1 \cdot e^{-10t} + G_2 \quad (4.94)$$

Ако је течење на $t = 0.01$, 0.07 и 0.4 секунде једнако 13.8, 72.9 и 142.3 mm^2/kN , респективно, одредити коефицијенте G_1 и G_2 .

Решење: Са $t_1 = 0.01$, $t_2 = 0.07$ и $t_3 = 0.4$, $T_1 = 0.1$ и $T_2 = \infty$, $D_1 = 13.8$ mm^2/kN , $D_2 = 72.9$ mm^2/kN , $D_3 = 142.3$ mm^2/kN према једначини 4.93

$$\begin{vmatrix} e^{-0.1} & e^{-0.7} & e^{-4} \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} e^{-0.1} & 1 \\ e^{-0.7} & 1 \\ e^{-4} & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} G_1 \\ \cdot \\ G_7 \end{Bmatrix} = \begin{vmatrix} e^{-0.1} & e^{-0.7} & e^{-4} \\ 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} 13.8 \\ 72.9 \\ 142.3 \end{Bmatrix}$$

или

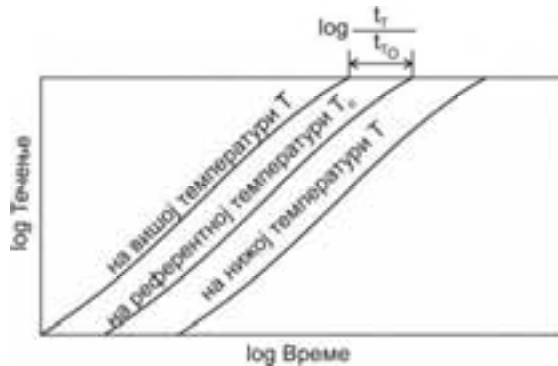
$$\begin{vmatrix} 1.066 & 1.420 \\ 1.420 & 3.000 \end{vmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 51.294 \\ 229 \end{Bmatrix} \tag{4.95}$$

Решење једначине 4.95 је: $G_1 = -145 \text{ mm}^2/\text{kN}$, $G_2 = 145 \text{ mm}^2/\text{kN}$, што је и очекивано, јер је задато течење обрађено на основу Келвиновог модела:

$$D(t) = 145 \cdot (1 - e^{-10 \cdot t}) \tag{4.96}$$

СУПЕРПОЗИЦИЈА ВРЕМЕНА - ТЕМПЕРАТУРА

Раније је демонстрирано да асфалтне мешавине изложене деловању повећане температуре имају убрзан ток стварања деформација, што изгледа као да је временски ток сабијен. На слици 4.24 је приказан дијаграм течења у зависности од времена, у логаритамској подели. За задато време, течење на нижим температурама је мање од оног на вишим температурама. Постоји паралелан ток кривих линија течења за разне температуре.



Слика 4.24 Дијаграм: течење-време на разним температурама

Ако је течење под референтном температуром познато, течење под било којом другом задатом температуром може бити одређено употребом фактора померања a_T , који је дефинисао Паген (Pagen)(1965)[20]:

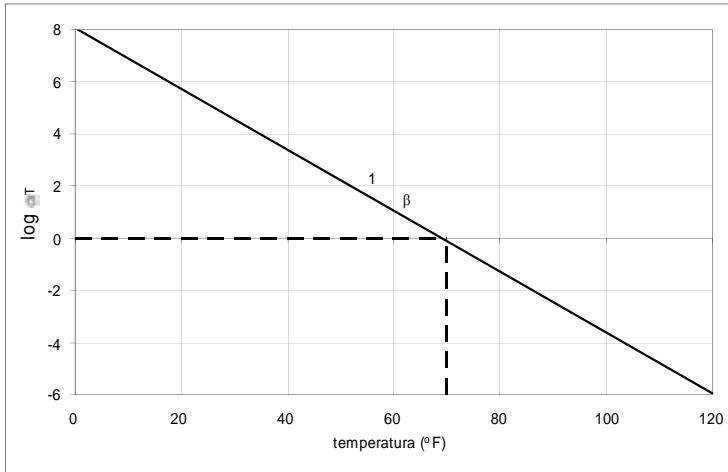
$$\alpha_T = \frac{t_T}{t_{T_o}} \quad (4.97)$$

где је:

t_T - време за које материјал тече на температури T

t_{T_o} - време за које материјал тече на референтној температури T_o

Лабораторијски опити вискозности асфалтних мешавина су показали да дијаграм фактора померања у односу на температуру даје праву линију, сл. 4.25. Нагиб праве линије β варира од 0.061 до 0.170, са средњом вредношћу од 0.113 [19].



Слика 4.25 Дијаграм: фактор померања - температура

Са слике 4.25 следи да је:

$$\beta = \frac{\log\left(\frac{t_T}{t_{T_o}}\right)}{T - T_o} \quad (4.98)$$

или

$$t_T = t_{T_o} \cdot e^{[2.3026 \cdot \beta \cdot (T - T_o)]} \quad (4.99)$$

Ако је течење засновано на референтној температури T_o , тада је:

$$D(t) = \sum_{i=1}^n G_i \cdot e^{-\left(\frac{t_{T_o}}{T_i}\right)} \quad (4.100)$$

а ако је засновано на температури T , тада је:

$$D(t) = \sum_{i=1}^n G_i \cdot e^{-\left(\frac{t}{T_i}\right)} \quad (4.101)$$

Веза између t_T и t_{T_0} је приказана у једначини 4.99.

ПОСТУПАК РАСПОРЕЂИВАЊА ЗА ВИСКОЕЛАСТИЧНО РЕШЕЊЕ

Чак и када тачно вискоеластично решење није познато, вискоеластични утицаји увек могу бити апроксимативно приказани помоћу Дирихлеовог реда:

$$R = \sum_{i=1}^7 c_i \cdot e^{-\left(\frac{t}{T_i}\right)} \quad (4.102)$$

Ако треба добити решење еластичног система у 11 временских тренутака, тада се може применити једначина 4.93 за редуковање броја једначина на 7, колики је и број непознатих које треба решити. Ако су утицаји у 7 временских тренутака одређени из еластичног решења, коефицијенти c_1 до c_7 могу бити одређени директно помоћу:

$$\begin{vmatrix} e^{-\frac{0.01}{0.01}} & e^{-\frac{0.01}{0.03}} & e^{-\frac{0.01}{0.1}} & e^{-\frac{0.01}{1}} & e^{-\frac{0.01}{10}} & e^{-\frac{0.01}{30}} & 1 \\ e^{-\frac{0.03}{0.01}} & e^{-\frac{0.03}{0.03}} & e^{-\frac{0.03}{0.1}} & e^{-\frac{0.03}{1}} & e^{-\frac{0.03}{10}} & e^{-\frac{0.03}{30}} & 1 \\ e^{-\frac{0.1}{0.01}} & e^{-\frac{0.1}{0.03}} & e^{-\frac{0.1}{0.1}} & e^{-\frac{0.1}{1}} & e^{-\frac{0.1}{10}} & e^{-\frac{0.1}{30}} & 1 \\ e^{-\frac{1}{0.01}} & e^{-\frac{1}{0.03}} & e^{-\frac{1}{0.1}} & e^{-\frac{1}{1}} & e^{-\frac{1}{10}} & e^{-\frac{1}{30}} & 1 \\ e^{-\frac{10}{0.01}} & e^{-\frac{10}{0.03}} & e^{-\frac{10}{0.1}} & e^{-\frac{10}{1}} & e^{-\frac{10}{10}} & e^{-\frac{10}{30}} & 1 \\ e^{-\frac{30}{0.01}} & e^{-\frac{30}{0.03}} & e^{-\frac{30}{0.1}} & e^{-\frac{30}{1}} & e^{-\frac{30}{10}} & e^{-\frac{30}{30}} & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \\ c_7 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (R)_{0.01} \\ (R)_{0.03} \\ (R)_{0.1} \\ (R)_1 \\ (R)_{10} \\ (R)_{30} \\ (R)_\infty \end{Bmatrix} \quad (4.103)$$

После одређивања коефицијената c_i , утицаји под стационарним оптерећењем могу да се одреде помоћу једначине 4.102.

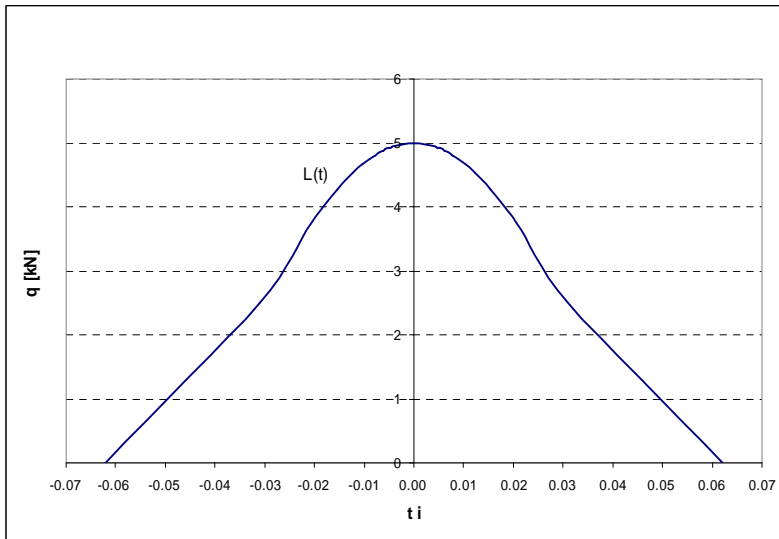
4.3.4 АНАЛИЗА ПОКРЕТНОГ ОПТЕРЕЂЕЊА

Еластични-вискоеластични одговарајући принципи могу бити примењени:

- директно на покретна оптерећења за одређивање површинских дефлексија на вискоеластичном полупростору, Перлоф и Моавензадех (Perloff and Moavenzadeh) (1967)[21]

- за напоне и померања у двослојном вискоеластичном систему, Чу и Ларју (Chou and Larew)(1696) [22]
- у трослојном систему, Елиот и Моавензадех (Elliot and Moavenzadeh) (1971)[23]
- у вишеслојном систему, Хуанг (Huang) (19736) [24]

Због комплексности ових поступака и великог времена које је потребно да се они обаве, чак и комјутерски, нису за практичну употребу. Поједностављени метод је примењен у рачунарском програму ВЕСИС (VESYS) и КЕНЛЕЈЕР (KENLAYER).



Слика 4.26 Покретно оптерећење у функцији од времена

Овим поступком се подразумева да интензитет оптерећења варира током времена према синусној функцији, слика 4.26. Када је $t = 0$, онда је оптерећење максимално и изражава се помоћу функције:

$$L(t) = q \cdot \sin^2\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi \cdot t}{d}\right) \quad (4.104)$$

где је:

d - трајање оптерећења

Када је оптерећење на разумном одстојању од посматране тачке, $t = \pm \frac{d}{2}$, тада је оптерећење једнако нули, или $L(t) = 0$. Када је оптерећење директно изнад задате тачке, $t = 0$, оптерећење има интензитет q .

Трајање оптерећења зависи од брзине возила \mathbf{s} и контактнoг радијуса пнеуматика \mathbf{a} . Разумно претпостављеним одстојањем, где оптерећење практично нема ефекта, се подразумева $d = 6a$, односно:

$$d = \pm \frac{12 \cdot a}{s} \quad (4.105)$$

Утицаји испод статичког оптерећења могу бити одређени помоћу Дирихлеовог низа, једначина 4.102.

Утицаји испод покретног оптерећења могу бити одређени помоћу Болцмановог принципа суперпозиције:

$$R = \int_{\frac{d}{2}}^0 R(t) \cdot \frac{dL}{dt} dt \quad (4.106)$$

Из једначине 4.104

$$\frac{dL}{dt} = -\frac{q \cdot \pi}{d} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{d}\right) \quad (4.107)$$

Заменом једначине 4.102 и једначине 4.107 у једначину 4.106 и интегралњем, добија се:

$$R = \frac{q \cdot \pi^2}{2} \cdot \sum_{i=1}^n c_i \frac{1 + e^{-\frac{d}{2T_i}}}{\pi^2 + \left(\frac{d}{2 \cdot T_i}\right)^2} \quad (4.108)$$

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Per ULLIDTZ, *INSTRUCTOR NOTES ON NONDESTRUCTIVE PAVEMENT ANALYSIS*, 8th International Conference on Asphalt Pavements, Pre-Conference Technical Series, Seattle, Washington USA, August 10, 1997, p. 21-23
- [2] Yang H. HUANG, *Pavement Analysis and Design*, PRENTICE HALL. Upper Saddle River, New Jersey 07458, 1993.
- [3] Per ULLIDTZ, *ANALYTICAL TOOLS FOR DESIGN OF FLEXIBLE PAVEMENTS*, Keynote Address 1, keynote2002.pdf
- [4] E.J. Yoder, M.W. Witczak, *PRINCIPLES OF PAVEMENT DESIGN*, second edition, JOHN WILEY & SONS, INC, 1975.
- [5] Foster C. R. and R.G. Ahlvin, "Stresses and Deflections Induced by a Uniform Circular Lode", *Proceedings, Highway Research Board*, Vol. 33, 1954, p.467-470
- [6] Ahlvin R.G. and H.H. Ulery, "Tabulated Values for Determining the Complete Pattern of Stresses, Strains and Deflections Beneath a Uniform Circular Lode on Homogeneous Half Space", *Bulliten 342, Highway Research Board*, 1962, p.1-13
- [7] Huang Y.H, "Stresses and Displacements in Nonlinear Soil Media", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 94, No. SM1, 1968a, p.1-19
- [8] Huang Y.H, "Finite Element Analysis of Nonlinear Soil Media", *Proceedings, Symposium on Application of Finite Element Methods in Civil Engineering*, Vanderbilt University, Nashville, TN, 1969a, p.663-690
- [9] Vesic A.S. and L. Domaschuk, *Theoretical Analysis of Structural Behaviour of Road Test Flexible Pavement*, NCHRP Report No. 10, Highway Research Board, 1964
- [10] Burmister D.M. "The Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and Applications to the Design of Airport Runways", *Proceedings, Highway Research Board*, Vol. 23, 1943, p.126-144
- [11] Burmister D.M. "The General Theory of Stresses and Displacements in Layerd Soil Systems", *Journal of Applied Physics*, Vol. 16, 1945, p.84-94, 126-127, 296-302
- [12] Huang Y.H, "Stresses and Displacements in Viscoelastic Layered Systems Under Circular Loaded Areas", *Proceedings, 2nd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, 1967, p.225-244
- [13] Burmister D.M. "Evaluation of Pavement Systems of the WASHO Road test by Layered Systems Method", *Bulliten 177, Highway research Board*, 26-54

- [14] Huang Y.H, "Influence Charts for Two-Layer Elastic Foundation", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 95, No. SM2, March 1969b, p.709-713
- [15] Huang Y.H, "Computation of Equivalent Single Wheel Loads Using Layered Theory", *Highway Research Board Record 291*, Highway Research Board Recor, 1969c, p.144-155
- [16] Huang Y.H, "Critical Tensile Strain in Asphalt Pavements", *Transportation Engineering Journal, ASCE*, Vol. 99, No. TE3, 1973a, p.553-569
- [17] Jones A, "Tables of Stresses in Three-Layer Elastic System", *Bulliten 342*, Highway Research Board, 1962, p.176-214
- [18] Peattie K.R, "Stress and Strain Factors for Three-Layer Elastic System", *Bulliten 342*, Highway Research Board, 1962, p.215-253
- [19] FHWA, *Predictive Design Procedures, VESYS Users manual*, Report No. FHWA-RD-77-154, Federal Highway Administration, 1978
- [20] Pagen C.A, "Rheological Response of Bituminous Concrete", *Highway Research Record 67*, Highway Research Board, 1965, p. 1-26
- [21] Perloff W.H. and F. Moavenzadeh, "Deflection of Viscoelastic Medium Due to Moving Loads", *Proceedings, 2nd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, University of Michigan, 1967, p. 269-276
- [22] Chou Y.T. and H.G. Larew, "Stresses and Displacements in Viscoelastic Pavement Systems Under a Moving Load", *Highway Research Record 282*, Highway research Board, 1969, p. 25-40
- [23] Elliot J.F and F. Moavenzadeh, "Analisy of Stresses and Displacements in Three-Layer Viscoleastic Systems", *Highway Research Record 345*, Highway research Board, 1971, p. 45-57
- [24] Huang Y.H, "Stresses and Strains in Viscoelastic Multilayer Systems Subjected to Moving Loads", *Highway Research Record 457*, Highway research Board, 1973b, p. 60-71
- [25] Ullidtz P., "Pavement Analysis", Elsevier Science, New York, 1987.

5

ДОСАДАШЊИ ПОСТУПЦИ ЗА ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ФЛЕКСИБИЛНИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА

5.1 ДОСАДАШЊИ ПОСТУПЦИ ЗА ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ФЛЕКСИБИЛНИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА

Најпознатији досадашњи поступци за димензионисање флексибилне коловозне конструкције су:

1. Метод удружења за јавне путеве и транспорт - AASHTO [1]
2. Метод Института за асфалт [2]
3. Метод концерна Шел (Shell) [3] [4]
4. Метод Савезне управе ваздухопловства (FAA) [5] [6]

5.2 МЕТОД УДРУЖЕЊА ЗА ЈАВНЕ ПУТЕВЕ И ТРАНСПОРТ - AASHTO

Метод удружења за јавне путеве и транспорт - AASHTO [1] заснива се на резултатима опита AASHO обављених у држави Илиноис 1959. и 1960. године. Прво упутство за димензионисање је објављено 1961. године и од тада се редовно објављују допуне, које прате најновија сазнања из области које обухватају коловозне конструкције. Поред овог веома опширног упутства, постоје и разни програми за рачунаре, а један од тих је и FLEX – PAVE [7], којим се знатно олакшава овај метод.

Меродавни параметри за димензионисање су:

- период трајања до првог ојачања
- пројектни период
- саобраћајно оптерећење
- утицај средине
- критеријуми квалитета
- карактеристике материјала
- карактеристике коловозних конструкција

ПЕРИОД ДО ПРВОГ ОЈАЧАЊА

Период трајања ојачања или реконструкције представља време од тренутка пуштања у саобраћај до првог ојачања или време између два ојачања. Најчешће су то периоди од 10 до 15 година (најмање 5 година).

ПРОЈЕКТНИ ПЕРИОД

Пројектни период је временско раздобље у годинама за које коловозну конструкцију треба пројектовати. У зависности од важности пута, пројектни периоди су следећих распона:

- градски аутопутеви - 30 до 50 година
- аутопутеви и путеве првог разреда - 20 до 50 година
- остали путеве - 15 до 25 година
- остали путеве са засторима од неvezаних материјала - 10 до 20 година

САОБРАЋАЈНО ОПТЕРЕЋЕЊЕ

Укупно еквивалентно саобраћајно оптерећење у пројектном периоду, за возну траку коју треба димензионисати, је изражено помоћу броја прелаза “стандардног возила” од 80 kN по осовини:

$$ESO_{80} = R_S \cdot R_t \cdot eso \quad (5.1)$$

где је:

- ES₈₀ - укупно еквивалентно саобраћајно оптерећење од 80 kN по осовини за возну траку у току пројектног периода
- R_s - коефицијент расподеле саобраћаја по смеровима; за већину путева R_s = 0.5 (50 процената)
- R_t - коефицијент расподеле саобраћаја по тракама ако их у једном смеру има две или више
- eso - укупно еквивалентно саобраћајно оптерећење од 80 kN по осовини у оба смера за одређену деоницу пута у пројектном периоду. Коефицијенти еквивалентног оптерећења су приказани у табелама 5.1 и 5.2.

Табела 5.1 Коефицијенти еквивалентног оптерећења. Једноосовинско оптерећење, $p_t = 2.5$.

Осовинско оптерећење	Конструкциони број SN					
	2.5	5	7.5	10	12.5	15
[kN]						
8.9	0.0004	0.0004	0.0003	0.0002	0.0002	0.0002
17.8	0.003	0.004	0.004	0.003	0.003	0.002
26.7	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01
35.6	0.03	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03
44.5	0.08	0.10	0.12	0.10	0.09	0.08
53.4	0.17	0.20	0.23	0.21	0.19	0.18
62.3	0.33	0.36	0.40	0.39	0.36	0.34
71.2	0.59	0.61	0.65	0.65	0.62	0.61
80.1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
89.0	1.61	1.57	1.49	1.47	1.51	1.55
97.9	2.48	2.38	2.17	2.09	2.18	2.30
106.8	3.69	3.49	3.09	2.89	3.03	3.27
115.7	5.33	4.99	4.31	3.91	4.09	4.48
124.6	7.49	6.98	5.90	5.21	5.39	5.98
133.4	10.31	9.55	7.94	6.83	6.97	7.79
142.3	13.90	12.82	10.52	8.85	8.88	9.95
151.2	18.41	16.94	13.74	11.34	11.18	12.51
160.1	24.02	22.04	17.73	14.38	13.93	15.50
169.0	30.90	28.30	22.61	18.06	17.20	18.98
177.9	39.26	35.89	28.51	22.50	21.08	23.04

Табела 5.2 Коефицијенти еквивалентног оптерећења. Двоосовинско оптерећење, $p_t = 2.5$.

Осовинско оптерећење [kN]	Конструкциони број SN					
	2.5	5	7.5	10	12.5	15
44.5	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
53.4	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
62.3	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02
71.2	0.04	0.07	0.07	0.06	0.05	0.04
80.1	0.07	0.10	0.11	0.09	0.08	0.07
89.0	0.11	0.14	0.16	0.14	0.12	0.11
97.9	0.16	0.20	0.23	0.21	0.18	0.17
106.8	0.23	0.27	0.31	0.29	0.26	0.24
115.7	0.33	0.37	0.42	0.40	0.36	0.34
124.6	0.45	0.49	0.55	0.53	0.50	0.47
133.4	0.61	0.65	0.70	0.70	0.65	0.63
142.3	0.81	0.84	0.89	0.89	0.86	0.83
151.2	1.06	1.08	1.11	1.11	1.09	1.08
160.1	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38
169.0	1.75	1.73	1.69	1.68	1.70	1.73
177.9	2.21	2.16	2.06	2.03	2.08	2.14
186.8	2.76	2.67	2.49	2.43	2.51	2.61
195.7	3.41	3.27	2.99	2.88	3.00	3.16
204.6	4.18	3.98	3.58	3.40	3.55	3.79
213.5	5.08	4.80	4.25	3.98	4.17	4.49

ПОУЗДАНОСТ

Поузданост R представља вероватноћу да ће коловозна конструкција на крају пројектног периода и датим условима средине, поседовати индекс употребљивости већи или једнак од пројектованог ($p_t = 2.5$ или 2.0).

Пројектне вредности нивоа поузданости приказане су у табели 5.3.

Табела 5.3 Пројектне вредности нивоа поузданости

Разред пута	Ниво поузданости у процентима	
	градски	ванградски
Аутопутеви	85 до 99.9	80 до 99.9
I разреда и градске магистрале	80 до 99	75 до 95
II, III и IV разреда и сабирне улице	80 до 95	75 до 95
Локални путеви	50 до 80	50 до 80

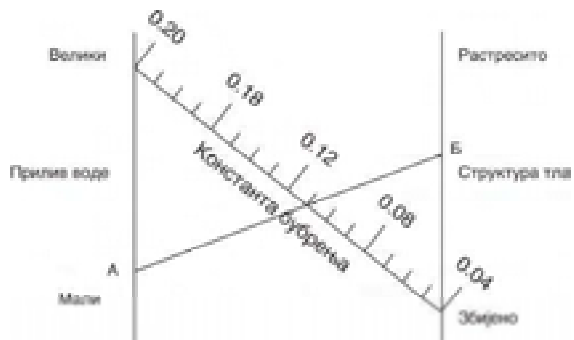
Стандардно одступање S_o при процени будућег саобраћаја у зависности од локалних услова за флексибилне коловозне конструкције је од 0.30 до 0.50.

УТИЦАЈ СРЕДИНЕ

Утицај средине је представљен дејством мраза и бубрења.

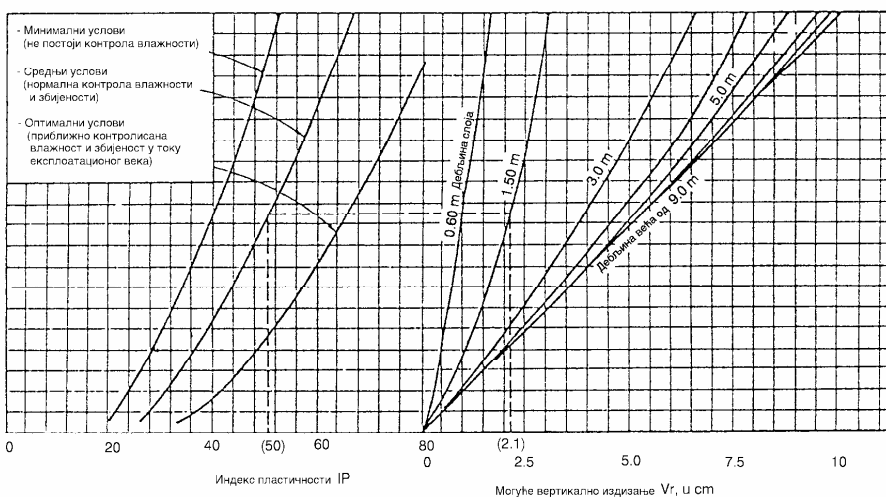
Бубрење у постељци

Утицај бубрења тла на опадање употребљивости одређује се преко константе бубрења, могућег вертикалног издизања и вероватноће бубрења. Константа бубрења θ_s која зависи од нивоа воде и састава тла се читава са слике 5.1.



Слика 5.1 Дијаграм за процену константе бубрења

Могуће вертикално издизање - V_r , представља издизање тла у постељци, до кога може доћи при изузетно великом бубрењу (тј. при високој пластичности и распрострањеној влажности). Ова вредност може бити добијена лабораторијски, емпиријски или очитана са дијаграма на слици 5.2.



Слика 5.2 Приближно одређивање могућег вертикалног издизања тла

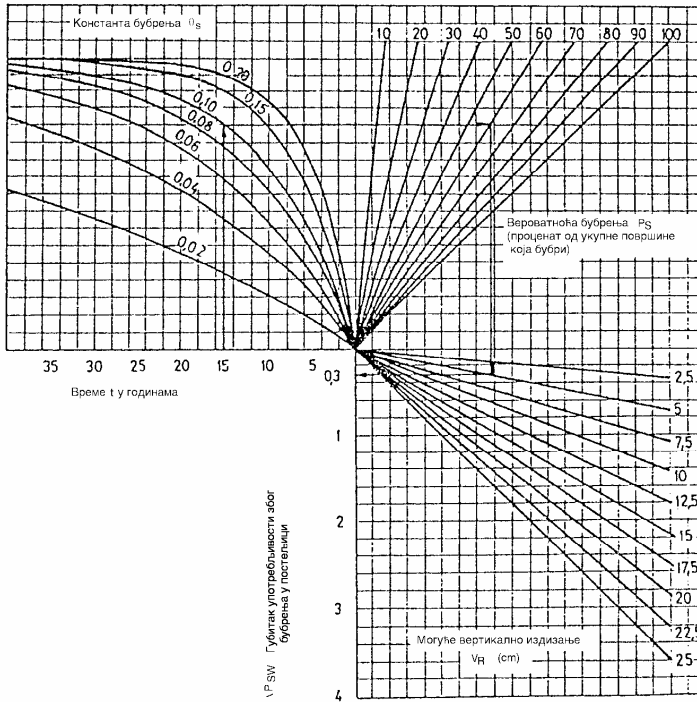
Вероватноћа бубрења, представља део од пројектоване деонице пута на којој може да се појави бубрење (изражено у процентима). За одређену деоницу пута сматра се да је вероватноћа бубрења 100 процената, ако је индекс пластичности тла у постељици већи од 30, а дебљина слоја већа од 60 cm (или ако је V_r веће од 0.5 cm).

У табели 5.4 је приказан начин обраде података о бубрењу.

Табела 5.4. Табела параметара за оцену бубрења

Број деонице	Дужина деонице	Дебљина доњег строја (укључујући постељицу)	Индекс пластичности IP	Стање влажности	Могуће вертикално издизање [cm]	Везано / неvezано тло	Константа бубрења

Губитак употребљивости због бубрења тла у постељици очитава се са дијаграма приказаног на слици 5.3.



Слика 5.3 Дијаграм за процену губитка употребљивости због бубрења тла у постељици

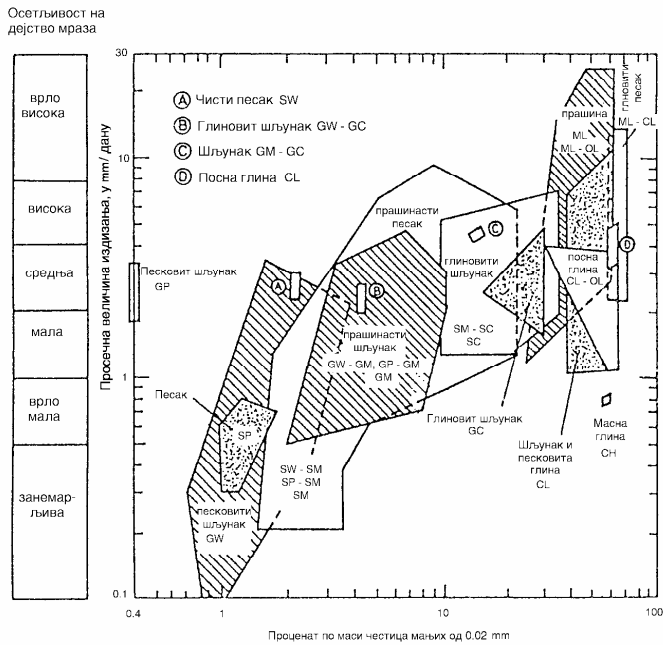
Овај номограм решава следећу једначину:

$$\Delta P_{SW} = 0.00132 \cdot V_R \cdot P_S \cdot (1 - e^{-\theta S \cdot t}) \tag{5.2}$$

Дејство мраза

Феномен издизања тла због дејства мраза, по ефектима је сличан бубрењу. Он настаје када се слободна вода у постелици скупи, смрзне и формира ледено сочиво. Три основна параметра преко којих се дефинише издизање због мраза су: константа издизања, максимални могући губитак употребљивости и вероватноћа издизања.

Константа издизања представља јединично дневно издизање због дејства мраза (у mm по дану) и може се у зависности од врсте тла у постелици прочитати са слике 5.4.



Слика 5.4 Дијаграм за оцену константе издизања

Шљунковита тла	F1 (18)*	F1 (18)	F2 (14.5)	F3 (12)
Песак (изузев врло финог прашинастог песка)		F2 (14.5)		F3 (12)
Врло фини прашинасти песок				F4 (10)

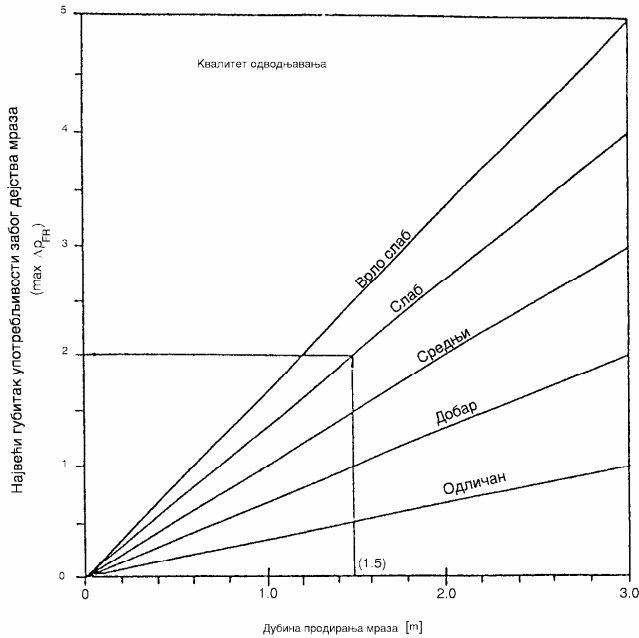
Сва прашинаста тла F4(10)
 Глине (IP > 12) F3(12)
 Глине (IP < 12) F4(10)

* Вредности у загради представљају CBR у [%]

Максимални могући губитак употребљивости због издизања, изазван дејством мраза, зависи од квалитета одводњавања и дубине продирања мраза, табела 5.5 и слика 5.5.

Табела 5.5 Квалитет одводњавања

Квалитет одводњавања	Вода се уклања са коловоза у року од
одличан	1 / 2 дана
добар	1 дана
осредњи	1 недеље
слаб	1 месеца
врло слаб	(вода се не одводи)

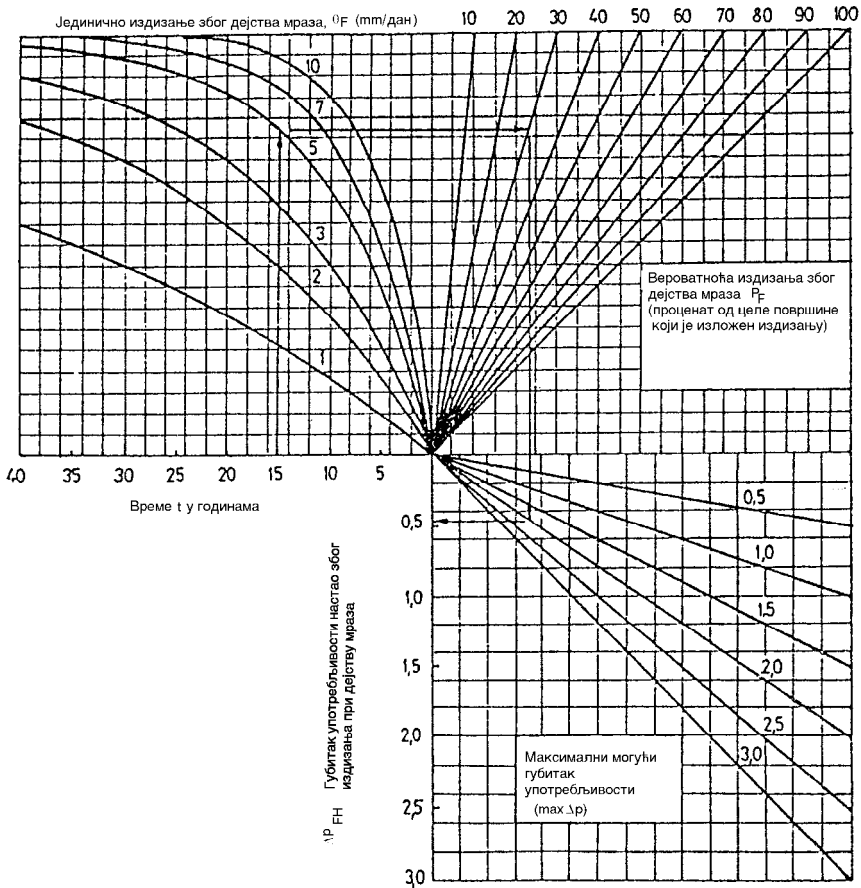


Слика 5.5 Дијаграм за процену максималног губитка употребљивости насталог издизањем тла у постелици због дејства мрза

Вероватноћа издизања, због мрза, представља проценат од посматране површине на којој може да се јави оштећење. Она зависи од осетљивости тла на мраз, влажности, одводњавања, трајања температуре испод нуле и броја циклуса мржњења и отапања.

За сада не постоји тачан критеријум за избор вероватноће издизања, већ је то резултат способности оцењивања самог пројектанта.

Губитак употребљивости, због издизања тла у постелици (дејство мрза), може се очитати са дијаграма на слици 5.6.

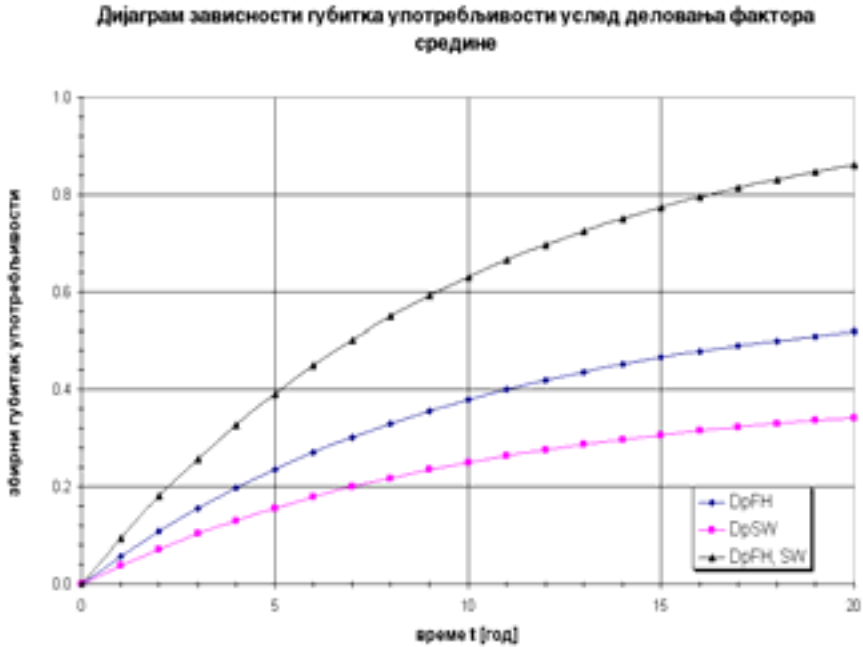


Слика 5.6 Дијаграм за процену губитка употребљивости због издизања тла у постелици при дејству мраза

Овај номограм решава следећу једначину:

$$\Delta P_{FH} = 0.01 \cdot P_F \cdot (\max \Delta i_p) \cdot (1 - e^{(-0.02 \cdot \theta \cdot F \cdot t)}) \quad (5.3)$$

Укупан губитак употребљивости због утицаја средине, представљен је на дијаграму на слици 5.7. Време t најчешће одговара пројектном периоду или трајању једне фазе у случају етапне изградње.



Слика 5.7 Губитак употребљивости због дејства фактора средине у току пројектног периода

DpFH - губитак употребљивости услед дејства мрза

DpSW - губитак употребљивости због бубрења

DpFH, SW - укупни губитак употребљивости

КРИТЕРИЈУМИ КВАЛИТЕТА

За оцену квалитета коловозне конструкције користе се индекс употребљивости, величина колотрага и одношење агрегата.

ИНДЕКС УПОТРЕБЉИВОСТИ

За оцену стања коловозне конструкције користи се индекс садашње употребљивости "р", чије вредности су од 0 (разорен коловоз) до 5 (коловоз у одличном стању). На крају пројектног периода или периода фазне изградње, коловозна конструкција треба да поседује минимални ниво квалитета употребљивости "р_т".

Дозвољене минималне вредности индекса употребљивости дате су у табели 5.6.

Табела 5.6 Најмање дозвољене вредности индекса употребљивости, p_t

p_t	Процент корисника који сматра дато стање неприхватљивим	Разред пута
3.0	12	аутопут
2.5	55	аутопут и пут I разреда
2.0	85	путеви од II до IV разреда

Укупна промена индекса употребљивости у оквиру пројектног периода је:

$$\Delta p = p_o - p_t \quad (5.4)$$

где је:

Δp - промена индекса употребљивости

p_o - индекс употребљивости на почетку пројектног периода

p_t - индекс употребљивости на крају пројектног периода

КОЛОТРАЗИ

Дозвољена величина колотрага на засторима од неvezаних материјала износи од 2.5 до 5.0 cm. Колотрази на засторима од битуменом vezаних материјала представљају велики проблем, али за сада нису обухваћени овим поступком димензионисања.

ОДНОШЕЊЕ АГРЕГАТА

Код путева са неvezаним засторима, одношење агрегата је разматрано помоћу анализе изгубљене висине застора у пројектном периоду и минималне потребне дебљине застора, да би овај могао да испуњава своју функцију у коловозној конструкцији. Једна од формула за одређивање одношења агрегата је:

$$AGL = \left[\frac{T^2}{(T^2 + 50)} \right] \cdot f \cdot (4.2 + 0.092 \cdot T + 0.0138 \cdot R^2 + 1.88 \cdot VC) \cdot 2.54 \quad (5.5)$$

где је:

AGL - годишњи губитак агрегата [cm]

T - годишњи обим саобраћаја у оба смера, у хиљадама возила

R - годишње падавине [cm]

VC - просечни подужни нагиб пута [%]

вредност коефицијента f	врста материјала
0.037	латеритни шљунак
0.043	кварцни шљунак
0.028	шљунак од магматских стена
0.059	шљунак од седиментних стена

КАРАКТЕРИСТИКЕ НЕВЕЗАНИХ МАТЕРИЈАЛА

Основни показатељи носивости слојева од незезаних материјала су:

- еластични или повратни модул E_e
- калифорнијски индекс носивости CBR
- модул деформације E_d
- модул стишљивости E_s

Повратни модул тла у току године осцилује у зависности од климатских услова. У пролећном периоду износи од 20 до 30% мање од своје максималне летње вредности.

У овом методу димензионисања [AASHTO] повратни модул M_R бива одређиван на следећи начин:

- лабораторијски - одреде се месечни модули постележице у условима који се очекују на терену (помоћу CBR - опита)

$$M_R = 10.342 \cdot CBR \text{ [MPa]} \quad (5.6)$$

- затим се одреде релативна оштећења по месецима

$$u_f = 1140.764 \cdot M_R^{-2.32} \text{ [mm]} \quad (5.7)$$

- на основу средње вредности релативних оштећења по месецима, одреди се репрезентна вредност повратног модула

$$M_R = 20.785 \cdot u_f^{-\frac{1}{2.32}} \text{ [MPa]} \quad (5.8)$$

КАРАКТЕРИСТИКЕ ВЕЗАНИХ МАТЕРИЈАЛА

У овом поступку димензионисања карактеристике материјала у слојевима су изражене помоћу "коефицијената слојева a_i ". За различите слојеве и материјале важе следећи изрази:

- застор од асфалтног бетона

$$a_1 = 0.40 \cdot \log E - 0.951; 0.20 < a_1 < 0.40; E \text{ у [MPa]} \quad (5.9)$$

- горња подлога
 - битуменом везани агрегати (битуменизирани шљунак, битуменизирани дробљени агрегати или стабилизација)

$$a_2 = 0.30 \cdot \log E - 0.713 ; 0.10 < a_2 < 0.30; E \text{ у [МПа]} \quad (5.10)$$
 - цементом везани агрегати (мршави бетон или стабилизација)

$$a_2 = 0.52 \cdot \log E - 1.728 ; 0.10 < a_2 < 0.28; E \text{ у [МПа]} \quad (5.11)$$
 - издробљени портланд цементни бетон

$$a_2 = 0.27 \cdot \log E - 0.589 ; 0.10 < a_2 < 0.44; E \text{ у [МПа]} \quad (5.12)$$
 - неvezани шљункови или дробљени агрегат

$$a_2 = 0.249 \cdot \log E - 0.439 ; 0.05 < a_2 < 0.20; E \text{ у [МПа]} \quad (5.13)$$
- доња подлога
 - неvezани шљунковити или дробљени агрегат

$$a_3 = 0.227 \cdot \log E - 0.348 ; 0.06 < a_2 < 0.20; E \text{ у [МПа]} \quad (5.14)$$

ОДВОДЊАВАЊЕ

У зависности од локалних услова и брзине одводњавања слободне воде са коловозне конструкције, нивои одводњавања су приказани у табели 5.7. Препоручљиве вредности коефицијента m , који зависи од квалитета одводњавања и процента времена у току године када је коловозна конструкција изложена нивоу влажности блиском засићењу, приказане су у табели 5.8. Утицај одводњавања на застор се занемарује.

Табела 5.7 Квалитет одводњавања

Квалитет одводњавања	Вода се уклања са коловоза у року од
одличан	1 / 2 дана
добар	1 дана
осредњи	1 недеље
слаб	1 месеца
врло слаб	(вода се не одводи)

ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ

Одређивање потребне дебљине коловозне конструкције обавља се помоћу дијаграма на слици 5.8 или помоћу рачунарских програма на основу следећих параметара:

- A. Пројектног саобраћајног оптерећења ESO_{80}
- B. Поузданости R
- C. Просечног стандардног одступања S_o
- D. Стварног повратног модула постелице $M_R (E_o)$
- E. Пројектованог губитка употребљивости $\Delta p = p_o - p_t$

Табела 5.8 Препоручљиве вредности m_i са којима се коригују коефицијенти слојева горње и доње подлоге

Квалитет одводњавања	Процент од времена у току године када је коловозна конструкција изложена нивоу влажности блиском засићењу			
	мањи од 1%	1 - 5 %	5 - 25 %	већи од 25 %
одличан	1.40 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20
добар	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1.00
средњи	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80
слаб	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80 - 0.60	0.60
врло слаб	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

* коефицијенти m_i се користе само за неvezане материјале у горњој и доњој подлози

На основу пројектованог конструктивног броја SN, одређује се дебљина застора, горње и доње подлоге:

$$SN = a_1 \cdot D_1 + a_2 \cdot D_2 \cdot m_2 + a_3 \cdot D_3 \cdot m_3 \quad (5.15)$$

где су:

a_1, a_2, a_3 - коефицијенти слојева за застор, горњу и доњу подлогу

D_1, D_2, D_3 - дебљине застора, горње и доње подлоге

m_2, m_3 - коефицијенти одводњавања горње и доње подлоге

ОДРЕЂИВАЊЕ ДЕБЉИНЕ СЛОЈЕВА

Дебљине слојева се одређују пробањем, користећи једначину или дијаграм на слици 5.8.

Поступак пробања подразумева прорачунавање структурног броја, употребом једначине:

$$\log ESO_{80} = Z_R \cdot S_o + 9.36 \cdot \log(SN + 2.54) + \frac{G_t}{0.40 + \frac{138071.59}{(SN + 2.54)^{5.19}}} + 2.32 \cdot \log M_R - 7.045 \quad (5.16)$$

где је:

ESO_{80} - укупно еквивалентно саобраћајно оптерећење у пројектном периоду

$$G_t = \log \frac{\Delta p}{4.2 - 2.5} = \frac{p_o - p_t}{4.2 - 2.5} \quad (5.17)$$

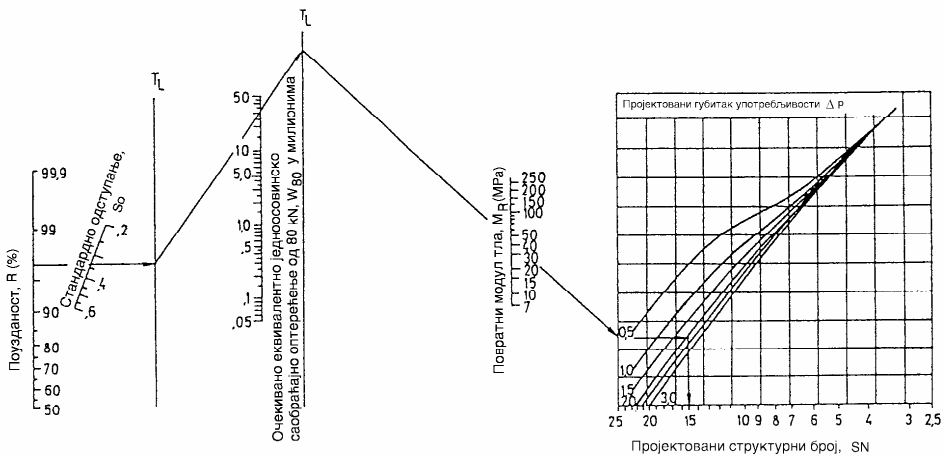
ΔR - губитак употребљивости у току пројектног периода (или између две рехабилитације) од дејства саобраћаја

R_0 - почетни индекс употребљивости

R_T - крајњи индекс употребљивости

M_R - повратни модул постелице [МПа]

SN - структурни број



Слика 5.8 Дијаграм за одређивање структурног броја

Затим се укупни структурни број расподели на структурне бројеве слојева, на следћи начин:

$$D_{1*} \geq SN_1 / a_1 \quad (5.17)$$

$$SN_{1*} = a_1 \cdot D_{1*} \geq SN_1 \quad (5.18)$$

$$D_{2*} \geq (SN_2 - SN_{1*}) / (a_2 \cdot m_2) \quad (5.19)$$

$$SN_{1*} + SN_{2*} \geq SN_2 \quad (5.20)$$

$$D_{3*} \geq [SN_3 - (SN_{1*} + SN_{2*})] / (a_3 \cdot m_3) \quad (5.21)$$

* - стварно употребљене вредности морају бити веће или једнаке од потребних вредности

ПРИМЕР:

На ванградској саобраћајници са по две саобраћајне траке у сваком правцу и за пројектни период од $n = 20$ година је предвиђена двоетапна градња коловозне конструкције.

Анализом саобраћајног оптерећења добијен је податак о еквивалентном саобраћајном оптерећењу у првој години експлоатације $G_{ES0} = 300000$ стандардних осовина, а процењена стопа раста саобраћаја у току пројектног периода износи $r = 3\%$ за све класе возила.

Тло у постелјци је глиновити песак, са 15% честица мањих од 0.02 mm . Измерене вредности CBR - а по сезонама су приказане у табели 5.9.

Табела 5.9 Носивост постелјце

сезона (месец)	CBR (%)
IX, X	4
IV, V, VI, VII, VIII, XI, XII	5
I, II	15
III	3

Пошто је постелјца осетљива на дејство мрза, потребно је урадити квалитетну дренажу, тако да се може сматрати да ће квалитет одводњавања бити добар. Може бити усвојен, због квалитета одводњавања, проценат времена од 3% , у току године, када је коловозна конструкција изложена нивоу влаге блиском засићењу. Дубина продирања мрза је 1.5 m , а за вероватноћу издизања може бити усвојена вредност $P_F = 35\%$.

Материјали који су расположиви за изградњу коловозне конструкције имају следеће карактеристике:

- асфалтни бетон $E_1 = 3000\text{ MPa}$ ($S_t = 9\text{ kN}$)
- бито - шљунак $E_2 = 2100\text{ MPa}$ ($S_t = 6\text{ kN}$)
- неvezани агрегат $E_2 = 120\text{ MPa}$ (CBR = 50 %)

Почетни ниво употребљивости, због квалитетног извођача, може бити усвојен $p_0 = 4.3$, а за крајњи ниво употребљивости је усвојено $p_t = 2.5$.

Анализа података:**Пројектни период**

Димензионисање коловозне конструкције се врши за пројектни период $n = 20$ година. У току тог периода је могуће вршити двоетапну изградњу коловозне конструкције.

Због дејства мраза, може се закључити да ће период прве етапе бити краћи од 20 година.

Саобраћајно оптерећење

$$ESO_{80} = R_s \cdot R_t \cdot GESO \cdot [(1 + r)^n - 1] / r \quad (5.22)$$

R_s - коефицијент расподеле по саобраћајним смеровима (**0.3 - 0.7**)

R_t - коефицијент расподеле саобраћаја по тракама, зависи од броја трака у сваком правцу:

број трака у сваком правцу	R_t
1	1.00
2	0.80 - 1.00
3	0.60 - 0.80
4	0.50 - 0.60

r - просечна годишња стопа раста саобраћаја [%]

n - период времена између две рехабилитације или пројектни период

Пошто пут има по две саобраћајне траке у сваком од правца, може бити усвојен коефицијент расподеле по смеровима:

$$R_s = 0.5$$

и коефицијент расподеле по тракама:

$$R_t = 0.9$$

За еквивалентно саобраћајно оптерећење у првој години експлоатације:

$$GESO = 300000 \text{ ст.ос.}$$

и просечну годишњу стопу раста саобраћаја у току пројектног периода:

$$r = 3 \%$$

укупно еквивалентно саобраћајно оптерећење у току пројектног периода од $n = 20$ година је:

$$ESO_{80} = 0.5 \cdot 0.9 \cdot 300000 \cdot [(1 + 0.03)^{20} - 1] / 0.03 = 3.63 \cdot 10^6 \text{ ст. ос.}$$

Поузданост

R - вероватноћа да ће коловозна конструкција на крају пројектног периода и при датим условима средине имати индекс употребљивости већи или једнак крајњем индексу употребљивости. Улазни параметри за одређивање поузданости су средње вредности:

- саобраћајног оптерећења
- носивости постељице
- коефицијената слојева и одводњавања

Поузданост зависи од разреда пута:

Разред пута	Ниво поузданости (%)	
	градски	ванградски
Аутопутеви	85 - 99.9	80 - 99.9
Путеви I разреда и градске магистрале	80 - 99	75 - 95
Путеви II, III и IV разреда и сабирне улице	80 - 95	75 - 95
Локални путеви	50 - 80	50 - 80

Фазна изградња

$$R = R_f^n \quad (5.23)$$

R - коефицијент поузданости за целокупни пројектни период

R_f - коефицијент поузданости за једну фазу

n - број фаза у оквиру пројектног периода

Фактор поузданости

$$\log F_r = -Z_R * S_o \quad (5.24)$$

поуданост R (%)	стандардно нормално одступање (t - расподела) Z_R	поузданост R (%)	стандардно нормално одступање (t - расподела) Z_R
50	0.000	94	- 1.555
60	- 0.253	95	- 1.645
70	- 0.524	96	- 1.751
75	- 0.674	97	- 1.881
80	- 0.841	97.5	- 2.0
85	- 1.037	98	- 2.054
90	- 1.282	99	- 2.327
91	- 1.340	99.9	- 3.090
92	- 1.405	99.99	- 3.750
93	- 1.476		

Стандардно одступање

$$S_o$$

Могућа комбинована грешка услед погрешног предвиђања саобраћајног оптерећења и понашања коловоза

- 0.40 - 0.50 за флексибилне коловозе

То је значајан ванградски пут са тешким саобраћајним оптерећењем и може бити усвојен ниво поузданости:

$$R = 90 \%$$

у току целокупног пројектног периода. Пошто је предвиђена двоетапна изградња, а да би био задовољен горњи ниво поузданости, свака етапа мора имати поузданост:

$$R = 0.90^{0.5} = 0.949 = 95 \% (Z_r = 1.645)$$

За ниво стандардног одступања је усвојено:

$$S_o = 0.40$$

Носивост постељице

Сезонска зависност носивости постељице је веома изражена. Пројектна вредност је приказана на основу пондерисаних коефицијената релативног оштећења U_f . Може бити одређена рачунски или са дијаграма.

$$U_f = 1140.764 * M_r^{-2.32}$$

$$M_r = 10.342 * CBR$$

$$M_r = (1140.764 / U_{f,pros.})^{1/2.32}$$

Месец	CBR [%]	M_r [kN/m ²]	U_f [mm]
јануар	15	155.13	0.009
фебруар	15	155.13	0.009
март	3	31.026	0.395
април	5	51.71	0.121
мај	5	51.71	0.121
јун	5	51.71	0.121
јули	5	51.71	0.121
август	5	51.71	0.121
септембар	4	41.368	0.203
октобар	4	41.368	0.203
новембар	5	51.71	0.121
децембар	5	51.71	0.121
$\Sigma U_f =$			1.664

$$U_{f,pros} = 0.139 \text{ mm}$$

$$M_{r,proj} = 48.7 \text{ kN}$$

Утицај околине

Утицај околине се огледа кроз дејство мраза. Пошто је у постелици глиновити песак, може се закључити да је то материјал средње осетљив на дејство мраза. Константа издизања може бити усвојена са слике 5.4:

$$\theta_f = 2 \text{ mm/dan}$$

За усвојену вероватноћу издизања:

$$P_f = 35 \%$$

и познату дубину на којој делује мраз од 1.5 m и добар квалитет одводњавања, са слике 5.5 следи максимални губитак употребљивости услед дејства мраза:

$$\max \Delta p = 1.0$$

Са овим подацима се са номограма за губитак употребљивости (слика 5.6) може прочитати вредност ΔP_{FH} , или израчунати помоћу формуле:

$$\Delta P_{FH} = 0.01 * P_f * \max \Delta p * (1 - e^{-0.02 * \theta_f * t})$$

t - временски период [година]

$$\Delta P_{FH} = 0.19$$

$$\Delta P_{FH} = 0.01 * 35 * 1.0 * (1 - e^{-0.02 * 2 * 20}) = 0.19$$

Карактеристике материјала у коловозној конструкцији

На основу модула материјала E_i могу бити одређени коефицијенти замене за слојеве коловозне конструкције:

- коефицијент замене **застора a_1** од **асфалтног бетона** добијамо из израза:

$$a_1 = 0.40 * \log E_1 - 0.951 = 0.40 * \log 3000 - 0.951 = 0.44$$

- коефицијент замене **за горњу подлогу a_2** од **бито - шљунка** добијамо из израза:

$$a_2 = 0.30 * \log E_2 - 0.713 = 0.30 * \log 2100 - 0.713 = 0.284$$

- коефицијент замене **за доњу подлогу a_3** од **невезаног агрегата** добијамо из израза:

$$a_3 = 0.227 * \log E_3 - 0.348 = 0.227 * \log 120 - 0.348 = 0.126$$

Коефицијент одводњавања

Одређујемо га само за доњу подлогу, јер је израђена од невезаног агрегата.

Квалитет одводњавања	Процент од времена у току године када је коловозна конструкција изложена нивоу влажности блиском засићењу			
	мањи од 1 %	1 - 5 %	5 - 25 %	већи од 25 %
одличан	1.40 - 1.35	1.35 - 1.30	1.30 - 1.20	1.20
добар	1.35 - 1.25	1.25 - 1.15	1.15 - 1.00	1.00
средњи	1.25 - 1.15	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80
слаб	1.15 - 1.05	1.05 - 0.80	0.80 - 0.60	0.60
врло слаб	1.05 - 0.95	0.95 - 0.75	0.75 - 0.40	0.40

За **добар** квалитет одводњавања и проценат времена када је коловозна конструкција у стању блиском засићењу од **3 %**, следи:

$$m_3 = 1.20$$

Губитак употребљивости

$$\Delta p = p_o - p_t = 4.3 - 2.5 = 1.8$$

Димензионисање коловозне конструкције

Потребно је одредити димензије коловозне конструкције, за познато саобраћајно оптерећење. Поступак се може спровести на дијаграму (слика 5.8).

Добијен је конструктивни број коловозне конструкције $SN_{pot.} = 11.2 \text{ cm}$

Исти поступак може бити поновљен и за одређивање конструктивног броја за доњу подлогу, јер је њен $M_r = 120 \text{ MPa}$ мањи од 250 MPa .

Добијен је конструктивни број за доњу подлогу $SN_{3pot} = 8.2 \text{ cm}$

Одређивање дебљине слојева коловозне конструкције

Да би дебљине застора и горње подлоге биле прецизно одређене, потребно је познавати однос трошкова та два слоја. У овом случају, усваја се дебљина застора, а затим одређује дебљина горње подлоге, тако да буде задовољен конструктивни број од 8.2 cm .

Усвојена дебљина застора је:

$$d_1 = 8.0 \text{ cm}$$

Дебљина горње подлоге је:

$$d_2 \geq [(8.2 - 8 * 0.44) / 0.28] = 16.71 \approx 17 \text{ cm}$$

Потребна дебљина доње подлоге добија се из израза:

$$d_3 \geq [(11.2 - 8 * 0.44 - 17 * 0.28) / 0.12 * 1.2] = 20.27 \approx 21 \text{ cm}$$

Конструктивни број коловозне конструкције је:

$$SN_{\text{stv.}} = 8.0 * 0.44 + 17 * 0.28 + 21 * 0.12 * 1.2 = 11.304 \text{ cm}$$

Испуњен је услов:

$$SN_{\text{stv.}} = 11.304 \text{ cm} \geq SN_{\text{pot.}} = 11.2 \text{ cm}$$

Прорачун трајности коловозне конструкције у зависности од дејства мраза

Разлику између укупног губитка употребљивости:

$$\Delta p = p_o - p_t = 4.3 - 2.5 = 1.8$$

и губитка употребљивости услед деловања мраза:

$$\Delta P_{\text{FH}} = 0.01 * 35 * 1.0 * (1 - e^{-0.02 * 2 * 20}) = 0.193$$

током периода од **20** година, користи саобраћајно оптерећење.

$$\Delta P_{\text{TR}} = 1.8 - 0.19 = 1.607$$

Користећи дијаграм (слика 5.8) може се прочитати да је саобраћајно оптерећење које одговара разлици у губитку употребљивости једнако:

$$ESO_{80} = 3.0 * 10^6 \text{ ст.ос.}$$

На основу ове вредности може се добити одговарајући коефицијент раста саобраћаја:

$$q = (3.0 * 10^6) / (0.5 * 0.9 * 300000) = 22.22$$

а одатле се може добити временски период у којем ће бити акумулисано дато саобраћајно оптерећење:

$$n = \log(q * r + 1) / \log(r + 1) = \log(22.22 * 0.03 + 1) / \log(1 + 0.03) = 17.3 \text{ год.}$$

Пошто је разлика између почетног и крајњег периода већа од **1** године:

$$20 - 17.3 = 2.7$$

мора се урадити друга итерација.

II итерација:

Губитак употребљивости у временском периоду је:

$$20 - 2.7 / 2 = 18.7$$

$$\Delta P_{FH} = 0.01 * 35 * 1.0 * (1 - e^{-0.02 * 2 * 18.7}) = 0.184$$

Саобраћајно оптерећење изазива следећи губитак употребљивости:

$$\Delta P_{TR} = 1.8 - 0.175 = 1.616 \quad (\Delta P_{TR} = 1.607)$$

Пошто је овај губитак употребљивости врло близак израчуаном у претходној итерацији, са дијаграма се не може прочитати разлика. Због тога се може закључити да ће пројектовани век **прве етапе** бити око **17** година.

За другу етапу је потребно димензионисати ојачања (у **16** години употребе коловоза).

5.3 МЕТОД ИНСТИТУТА ЗА АСФАЛТ

Овај поступак се појавио 1955. У каснијим верзијама су обједињавана сва каснија искуства из практичних опита у Енглеској, AASHO и WASHO опита, метода инжењеријског корпуса САД, владиних агенција САД и најпознатијих нумеричких поступака.

У овом поступку, коловозна конструкција се посматра као вишеслојни еластични систем. Карактеристике материјала су у сваком слоју изражене помоћу модула еластичности и Поасоновог коефицијента. Саобраћај се приказује преко броја понављања једноосовинског оптерећења од 80 kN (две групе тандем точкова по осовини). За анализу су коришћени тандем точкови апроксимирани са две кружне плоче радијуса 115 mm, размака 345 mm и контактнoг притиска 483 kPa. Коловози код којих су сви слојеви од битуменом везаних материјала "Full-Depth", представљени су као трослојни систем, а остали као четворослојни систем.

За постелицу се претпоставља да је бесконачна у вертикалном и хоризонталном смеру. Остали слојеви су бесконачни у хоризонталном смеру. Претпоставља се пуна веза између слојева (максимално трење).

Са гледишта димензионисања, критичне су две дилатације које настају услед деловања оптерећења од возила:

- хоризонтална дилатација при затезању ε_t , настала у најнижем битуменом везаном слоју
- вертикална дилатација при притиску ε_c на површини постелице

Прекорачење ε_t изазива пукотине, а ε_c трајне деформације.

Рачунарски програм "DAMA", је развијен на Универзитету у Мериленду (САД) и служи за димензионисање коловозних конструкција по методу Института за асфалт (приручник MS-1, девета верзија). Коловозна конструкција се третира као вишеслојни еластични систем у функцији од оптерећења, дозвољене деформације и замора, услова средине и распореда оптерећења.

Добар део програма је преузет из два, до тада најпознатија програма - BISAR и CHEVRON.

С обзиром на сезонске промене флексибилних коловозних конструкција, програм "DAMA", омогућава праћење месечних промена напонских стања и разарања. Улазни подаци су:

- дебљине слојева
- карактеристике материјала (модул еластичне деформације, модул еластичности-крутости, Поасонов коефицијент)
- време распадања емулзије (ако је употребљена)
- месечно понављање оптерећења
- век трајања конструкције
- средња месечна температура ваздуха
- распоред оптерећења (једноосовинско, двоосовинско, један пнеуматик, два пнеуматика, радијус контактне површине и осовинско растојање контактних површина)
- однос модула и температуре

Излазни подаци су:

- табеларни приказ свих улазних података
- анализа замора
- анализа трајних деформација - колотрага
- месечне промене угиба
- дилатације при затезању и дилатације при притиску за сваки положај оптерећења (пнеуматика)
- месечне промене пропадања свих слојева коловозне конструкције

У излазним подацима се сумирају сва могућа оштећења у критичном слоју, анализира век трајања конструкције и прецизира укупан број дозвољених понављања оптерећења. На крају су дати подаци о критичном времену, када треба ојачати коловозну конструкцију.

5.4 МЕТОД КОНЦЕРНА ШЕЛ (SHELL)

Овај метод коловозну конструкцију посматра као линеарни еластични вишеслојни систем. Слојеви имају своје карактеристике изражене преко модула еластичности и Поасоновог коефицијента. Претпоставља се да је материјал хомоген, изотропан и бесконачан у хоризонталној равни.

Саобраћај је изражен преко ЕСО - еквивалентних стандардних осовина, које делује вертикално и подједнако је расподељено преко једне или више кружних површина на хоризонталну површину коловоза.

Коловозна конструкција се састоји из три слоја. Најнижи слој неограничених димензија у вертикалом смеру представља постељицу. Средњи слој чине невезана горња и доња подлога. Оне могу бити везане цементом или кречом

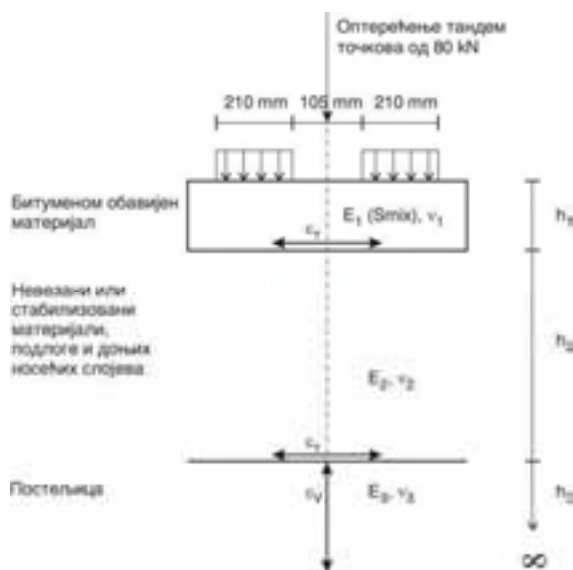
- стабилизоване подлоге. Горњи слој представља битуменом везане материјале.

Код коловозних конструкција - "FULL DEPTH", сви слојеви су од битуменом везаних материјала и директно постављени на постељицу. Дебљина подлоге од невезаних материјала је 0.

Основни принципи при димензионасању су:

- да превелике вертикалне дилатације на површини коловоза изазивају нагомилавање мањих трајних деформација на површини застора. Оне касније доводе до трајних деформација и лома целе конструкције
- да до лома у слојевима од битуменом везаних материјала може доћи због понављања оптерећења - замора и прекорачења хоризонталних еластичних деформација

Диспозиција оптерећења је приказана на слици 5.9.



Слика 5.9 Диспозиција оптерећења по методу Шел

Поступци при димензионасању су следећи:

- **корак 1:** Одредити еквивалентно саобраћајно оптерећење за пројектни период (осовина од 80 kN). Затим, одредити W-MAAT из MAAT-а. Потом одредити модуле постељице, горње и доње подлоге. Изабрати одговарајући код мешавине на основу крутости, замора и типа битумена

- **корак 2:** Очитати дебљине са дијаграма за различите вредности W-MAAT, N, E_3 и одговарајући код мешавине, проверити потребне модуле за невезани слој
- **корак 3:** Ако је неопходно, урадити интерполацију за дате вредности W-MAAT, N и E_3 , за одговарајући код мешавине
- **корак 4:** Приказати табеларно могуће конструкције у обрасцу **C**
- **корак 5:** Упоредити трајне деформације предложених конструкција

За нумеричко димензионисање коловозних конструкција се користи рачунарски програм "BISAR" (Bitumen Stress Analisis in Road) који је направљен и за "WINDOWS" окружење.

Улазни подаци су следећи:

- Јунгови модули еластичности
- Поасонови коефицијенти
- релативно хоризонтално померање два слоја у зависности од напона који делује на површини
- број слојева
- вертикална компонента оптерећења
- хоризонтална - тангенцијлна компонента оптерећења и угао који ова заклапа са x-осом
- радијус контактне површине оптерећења
- положај оптерећења (у правоуглом Декартовом координатном систему)

Излазни подаци су:

- вертикални и хоризонтални напони у посматраним тачкама
- вертикална и хоризонтална померања у посматраним тачкама
- одговарајући укупни напони
- одговарајуће дилатације

5.5 МЕТОД САВЕЗНЕ УПРАВЕ ВАЗДУХОПЛОВСТВА (САД) (FAA)

У зависности од масе авиона "FAA" је издала приручнике [5][6] за димензионисање коловозних конструкција.

На основу сопствене класификације тла, карактеристика материјала који улазе у састав коловозних конструкција, оптерећења меродавног авиона, понављања оптерећења и дејства мраза, одређује се дебљина коловозне конструкције.

У данашње време постоје рачунарски програми који су засновани на принципу коначних елемената (FEAFAA, FEDFAA), затим програм за повратни прорачун (BAKFAA) и програм за одређивање ACN броја (COMFAA).

Рачунарски програм FEAFAA (**F**inite **E**lement **A**nalysis - FAA) је развијен под патронатом Савезне управе ваздухопловства као алат за тродимензионалну анализу вишеслојних крутих коловозних конструкција и њихових ојачања, помоћу метода коначних елемената. Користан је за израчунавање прецизних утицаја (напона, дилатација и угиба) крутих коловозних конструкција, на које делује појединачно оптерећење точка из стајног трапа. Овај рачунарски програм није намењен за поступак пројектовања. Основне карактеристике су:

- модел од 9 плоча везаних спојницама
- до 6 слојева коловозне конструкције
- постелица је неограничених димензија
- могућност анализе унутрашњег и ивичног оптерећења
- могућност обликовања ојачања
- корисник дефинише величину плоче
- поседује базу података о карактеристичним авионима

Новија верзија рачунарског програма за димензионисање коловозних конструкција на аеродромима, још у фази развоја под патронатом Савезне управе ваздухопловства, FEDFAA (**F**inite **E**lement **D**esign - FAA) садржи у себи тродимензионалну анализу крутих коловозних конструкција помоћу методе коначних елемената и побољшану верзију линеарно еластичне теорије за анализу флексибилних коловозних конструкција. Овај тродимензионални модел коначних елемената задржава основне функције из FEAFAA, али је ограничен на анализу једне плоче, без спојница. Овај линеарно еластични поступак је уведен у стандарде за димензионисање коловозне конструкције у поглављу 7 Упутства AC 150/5320-6D (Chapter 7 of Advisory Circular AC 150/5320-6D, change 3). У овом програму, концепт пројектног авиона (design aircraft) је замењен прорачуном лома услед замора, који је изражен помоћу фактора кумулативног оштећења (CDF - cumulative damage factor), а према Минеровом правилу. Овај фактор се изражава помоћу израза:

$$CDF = \frac{\text{број понављања оптерећења}}{\text{број допуштених понављања оптерећења до лома}} \quad (5.25)$$

У табели 5.10 су приказана значења фактора кумулативног оштећења у односу на век трајања коловозне конструкције.

Табела 5.10

CDF = 1	Коловоз се може користити све до појаве оштећења услед замора
CDF < 1	Коловоз ће трајати дуже од предвиђеног времена, односно оштећења услед замора ће се појавити после пројектног века коловозне конструкције
CDF > 1	Цео животни век коловоза ће бити искоришћен и коловоз ће пући

Главна карактеристика материјала постељице је изражена помоћу еластичног модула, уместо CBR-а, за флексибилне коловозне конструкције (5.26), а преко k -вредности за круте коловозне конструкције (5.27) и (5.28).

$$E = 1500 \cdot CBR \text{ (psi)} \quad (5.26)$$

$$\log_{10}(E_{SG}) = 1.415 + 1.2841 \cdot \log_{10}(k) \quad (5.27)$$

или

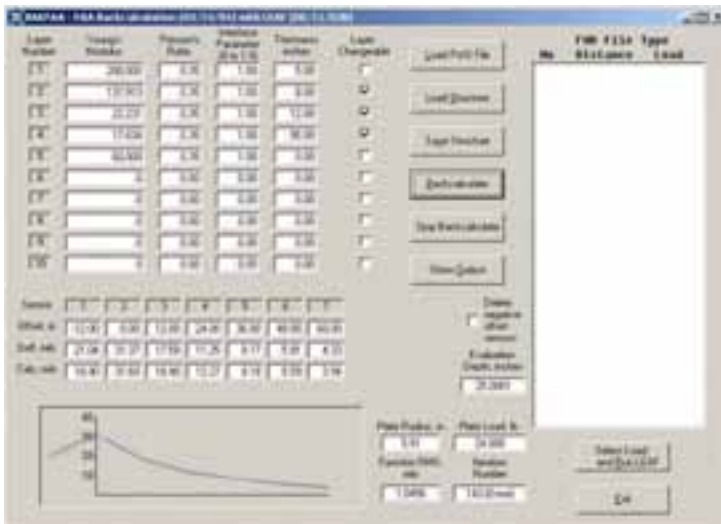
$$E_{SG} = 26 \cdot k^{1.284} \quad (5.28)$$

где је:

E_{SG} - повратни модул постељице (psi), 1 psi = 6.9 kN/m²

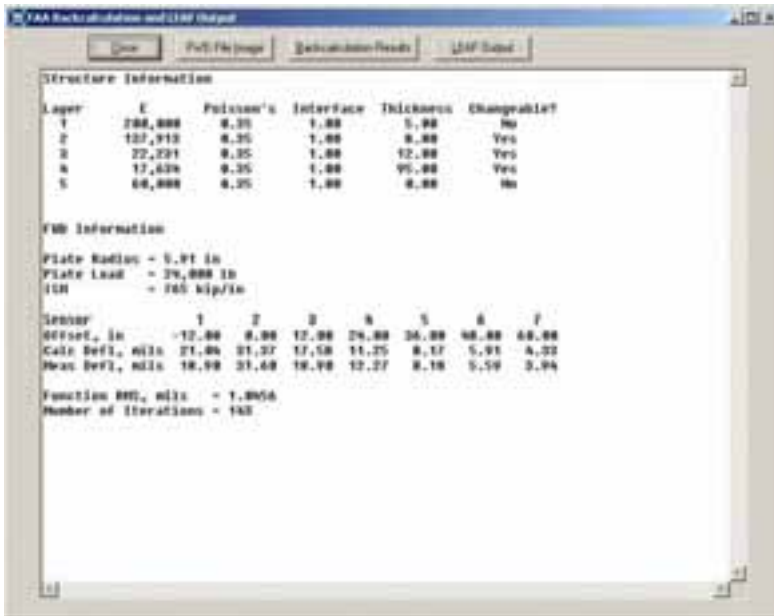
k - носивост подлоге (pci), 1 pci = 271.3 kN/m³

Димензионисање помоћу овог програма мора да се ради уз Упутство AC 150/5320-6D.



Слика 5.10 Прозор рачунарског програма BAKFAA

Рачунарски програм BAKFAA, слике 5.10 и 5.11, служи за обраду података добијених употребом HWD уређаја, уређаја за мерење дефлексија изазваних падајућим теретом. Резултати ових испитивања се обрађују статистички одређивањем хомогених деоница. Служе за одређивање карактеристичних угиба на хомогеним деоницама. Уз познато саобраћајно оптерећење, температуру коловоза и меродавни максимални угиб, процењује се модул постељице M_r , а затим одређује ефективни модул коловозне конструкције и ефективна носивост коловозне конструкције.



Слика 5.11 Пример излазних резултата рачунарског програма ВАКФАА

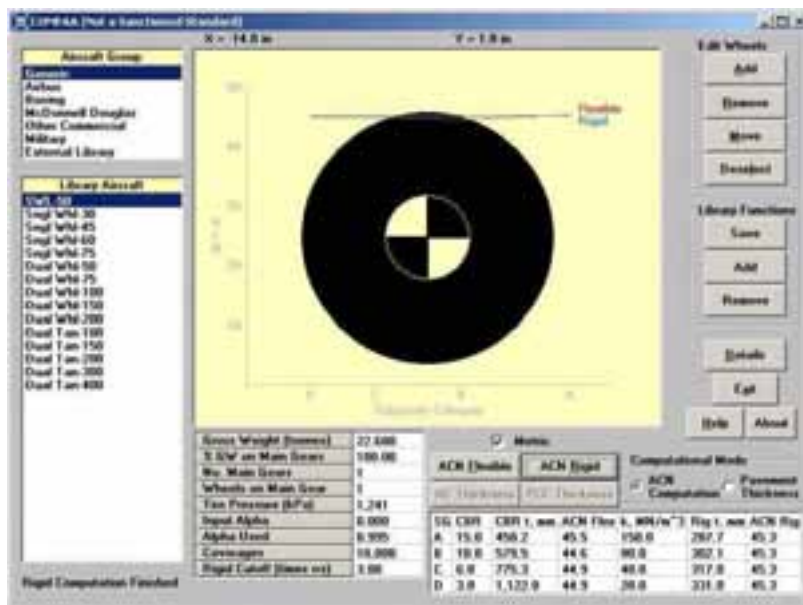
Рачунарски програм COMFAA служи за одређивање ACN-броја (Aircraft Classification Number) код флексибилних коловозних конструкција, и дебљине круте коловозне конструкције. Кад ради у ACN-моду, тада:

- израчунава ACN број за авион на флексибилној коловозној конструкцији
- израчунава ACN број за авион на крутој коловозној конструкцији
- израчунава дебљину флексибилне коловозне конструкције према методу за CBR у упутству AC 150/5320-6D за вредности CBR од 15, 10, 6 и 3%.
- израчунава дебљину бетонске плоче према поступку PCA за вредности носивости подлоге k од 552.6, 294.7, 147.4 и 73.7 lb/in³ (pci) (1 pci = 271.3 kN/m³)

Кад ради у моду за одређивање дебљине бетонске плоче, тада:

- израчунава дебљину флексибилне коловозне конструкције по методу за CBR у Упутству AC 150/5320-6D за вредности CBR које дефинише корисник
- израчунава дебљину бетонске плоче према Упутству AC 150/5320-6D за k вредности које дефинише корисник

ACN број се одређује према анексу 14 међународне организације за цивилну авијацију (ICAO, Annex 14).



Слика 5.12 Прозор рачунарског програма COMFAA

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., March 1986.
- [2] Research and Development of the Asphalt Institute Thickness Design Manual (MS-1) Ninth Edition No. 82-2 and RR-82-2, August 1982.
- [3] SHELL Pavement Design Manual, Shell International Petroleum Company Limited, London, 1978.
- [4] Addendum to the Shell Pavement Design Manual, Shell International Petroleum Company Limited, London, 1985.
- [5] Aerodrome Design Manual (Doc 9157-AN/901), Part 3 Pavements, ICAO, 1983.
- [6] Federal Aviation Administration, Airport Paving Advisory Circular, AC 150/5320-6A, US Department of Transportation, 1971.
- [7] FLEX-PAVE, A Software Program for the Design of Flexible Pavements, Neyer, Tiseo & Hindo, Ltd, Michigan, 1988.
- [8] A Computer Program for the Analysis (including seasonal variations) of Highways Pavements With Dual Wheel Loadings – DAMA, The Asphalt Institute, 1983.

6

ПОСТУПАК ЗА ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ФКК (AASHTO) 2004.

6.1 ПОСТУПАК ЗА ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ФЛЕКСИБИЛНИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА АМЕРИЧКЕ УПРАВЕ ЗА ЈАВНЕ ПУТЕВЕ И ТРАНСПОРТ (AASHTO) 2004. (НОВЕ И РЕКОНСТРУКЦИЈЕ) [17]

У овом поступку флексибилне коловозне конструкције су све нове, реконструисане и рехабилитоване конструкције на којима је постављен асфалтни застор.

Целокупни итеративни поступак димензионисања флексибилних коловозних конструкција, како нових, тако и реконструкција, је приказан на слици 6.1.



Слика 6.1 Шематски приказ димензионасања флексибилних коловозних конструкција

Основни кораци при димензионасању су:

1. Пробна димензионасања за специфичне услове који се очекују на деоницама предвиђене трасе - дефинисати носивост подлоге, дефинисати карактеристике материјала по слојевима, саобраћајно оптерећење, климатске услове, тип коловозне конструкције, вертикалне димензије коловозне конструкције, као и карактеристике током изградње
2. Установљење критеријума за прихватљиво понашање коловозне конструкције на крају пројектног периода (прихватљиви ниво колотрага, пукотине услед замора, термичке пукотине и IRI)
3. Одређивање жељеног нивоа поузданости за сваки од пројектних параметара (ниво поузданости за колотраге, пукотине и IRI)
4. Обрада улазних податка за месечне вредности саобраћајног оптерећења, сезонске варијације карактеристика материјала и климе, потребних за оцену стања коловозне конструкције током пројектног периода
5. Израчунавање конструктивних утицаја (напона и дилатација) употребом теорије вишеслојног еластичног система или применом методе коначних елемената за сваки тип осовинског оптерећења и за сваки инкремент израчунатог оштећења током пројектног периода

6. Израчунавање укупног оштећења на крају сваког анализираниог подпериода током целокупног пројектног периода
7. Предвиђање основних оштећења (колотрага, пукотина услед замора од површине ка дну и обратно, термичких пукотина) на крају сваког анализираниог подпериода током целокупног пројектног периода употребом калибрисаног механичко-емпиријског модела предвиђеног овим поступком
8. Предвиђање неравности (IRI) као функције почетне неравности, акумулисаних оштећења током времена и фактора на деоници на крају сваког анализираниог временског инкремента
9. Оцена очекиваних карактеристика у пробном прорачуну за задати ниво поузданости
10. Ако пробни прорачун не задовољава критеријуме, модификовати прорачун и понављати кораке од 4 до 9 све док се не задовоље критеријуми

Димензионасање које задовољава конструктивне критеријуме може се сматрати изводљивим у погледу конструктивних и функционалних параметара и може се користити за даље анализе, као што су нпр. трошкови.

6.1.1 УЛАЗНИ ПОДАЦИ

6.1.1.1 УЛАЗНИ ПОДАЦИ ЗА ПРОБНИ ПРОРАЧУН И УСЛОВИ НА ДЕОНИЦИ

Поступак димензионасања нуди могућност разматрања неколико типова попречних пресека флексибилне коловозне конструкције (слика 6.2а и 6.2б).

АВ - асфалт бетон	АВ - асфалт бетон	АВ - асфалт бетон
NA - горњи носећи слој невезани агрегат		АВ - везни слој
NA - доњи носећи слој невезани агрегат	NA - неvezани агрегат носећи слој	АВ - носећи слој
сабијена постељица	сабијена постељица	сабијена постељица
природна постељица	природна постељица	природна постељица

Слика 6.2а Типови флексибилне коловозне конструкције

АВ - асфалт бетон	АВ - асфалт бетон	АВ - асфалт бетон
битуменом стабилизован материјал носећи слој	цементом стабилизован материјал носећи слој	НА - горњи носећи слој неvezани агрегат
НА - доњи носећи слој неvezани агрегат	НА - доњи носећи слој неvezани агрегат	битумном или цементом стабилизован материјал носећи слој
сабијена постељица	сабијена постељица	сабијена постељица
природна постељица	природна постељица	природна постељица
полу крута КК стабилизација битуменом	полу крута КК стабилизација цементом	инверзна конструкција

Слика 6.2б Типови флексибилне коловозне конструкције

У пробном прорачуну су неопходни подаци о карактеристикама материјала који се налазе на локацији извођења радова. То су карактеристике постељице (присуство стене у постељици), саобраћајно оптерећење и климатски услови. Такође, потребни су и подаци који се односе на извођење радова, као што је почетна неравност (IRI), очекивани месец у коме ће се изводити радови и очекивани месец пуштања коловоза у саобраћај.

6.1.1.2 НИВОИ ПРОЈЕКТНИХ УЛАЗНИХ ПОДАТАКА

Постоје три квалитативна нивоа улазних података и то су:

1. **Ниво 1** - улазни подаци са карактеристикама материјала који су у зони трасе, а одређени су директним мерењима током лабораторијских испитивања, мерењем обима саобраћаја и његовог оптерећења
2. **Ниво 2** - захтевани улазни подаци су добијени корелацијом. На овакав начин се добијају подаци о повратном модулу постељице или неvezаном материјалу за носећи слој из вредности CBR-а или R вредности употребом емпиријских корелација
3. **Ниво 3** - улазни подаци су на нивоу националних или регионалних стандардних података. Тако је класификован земљани материјал по AASHTO поступку ради одређивања повратног модула, а и саобраћајно оптерећење према типу пута и типу камиона, због одређивања осовинског оптерећења

Избор нивоа улазних података зависи од низа фактора, а то су [18]:

- осетљивост карактеристика коловозне конструкције на задате улазне податке
- сложеност пројекта
- доступност информација током пројектовања
- извори и допуштено време пројектанту за формирање одговарајућих улазних података

6.1.1.3 ОБРАДА УЛАЗНИХ ПОДАТАКА ТОКОМ АНАЛИЗЕ ПРОЈЕКТНОГ ПЕРИОДА

Сирови улазни подаци треба да буду обрађени тако да прикажу сезонске вредности саобраћајног оптерећења, карактеристике материјала и климе, које су потребне за анализу сваког инкремента током пројектовања. Дужина периода инкремента код флексибилних коловозних конструкција је 14 дана. Анализа улазних података захтева:

- средњи дневни број за један точак, тандем, тридем или четири точка на свакој страни осовине према тежинским категоријама за сваки месец
- температуре у асфалтним слојевима. Средња температурна вредност за анализирани период се користи за одређивање крутости асфалта, за предвиђање колотрага и пукотина услед замора. Температурне вредности током једног сата су потребне ради предвиђања термичких пукотина. Потребни су, најмање, једногодишњи подаци са мерних станица
- средње вредности модула за слојеве од невезаних агрегата (носећи слој, доњи носећи слој, постељица) за сваки анализирани период

Температура и влажност у различитим деловима коловозне конструкције могу бити одређени употребом интегрисаног увећаног климатског модела (EICM), који је део рачунарског програмског пакета, а који прати овај поступак за димензионисање.

6.1.1.4 МОДЕЛИ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ УТИЦАЈА У КОЛОВОЗНОЈ КОНСТРУКЦИЈИ

Сврха ових модела је одређивање конструктивних утицаја у “сендвич систему” коловозне конструкције услед дејства околине и саобраћајног оптерећења. Утицаји околине могу бити директни (дилатације услед термичког ширења и/или контракције) и индиректни, преко ефеката које изазивају карактеристике материјала (промене крутости услед температурних варијација или утицаја влажности).

Излазни подаци из ових модела су напони, дилатације и померања у слојевима коловозне конструкције. Од посебног интереса су променљиви критични утицаји који се користе у моделу анализе оштећења у механичко емпиријском поступку димензионисања, а неки од тих су:

- хоризонтална дилатација при затезању на дну, односно врху слоја од асфалтног бетона
- вертикални напони при притиску и дилатације у слоју од асфалтног бетона (колотрази)
- вертикални напони при притиску и дилатације у носећим слојевима од неvezаног агрегата (колотрази у слојевима од неvezаног агрегата)
- вертикални напони при притиску и дилатације у постељици (колотрази у постељици)

Сваки од ових утицаја мора да буде одређен на критичном месту у слоју коловозне конструкције где се достиже максимална вредност.

У овај, AASHTO 2004, поступак су укључена два поступка за анализу коловозне конструкције. За случајеве кад се сви материјали из коловозне конструкције могу третирати као линеарно еластични, користи се теорија вишеслојног еластичног система за одређивање утицаја у коловозној конструкцији. Она је веома погодна због своје теоријске строгости и брзине израчунавања утицаја из линеарно еластичне анализе. У случајевима где се разматра нелинеарност неvezаног материјала, користи се поступак нелинеарних коначних елемената уместо познатог линеарног поступка. Овај поступак нелинеарних коначних елемената није још уведен у рутинске поступке димензионисања, већ се користи само у истраживачким активностима.

6.1.1.5 ИНКРЕМЕНТИ ОШТЕЋЕЊА И АЛУМУЛАЦИЈА ОШТЕЋЕЊА

У пробном прорачуну је довољно анализирати пројектни период издељен на мање временске подпериоде (инкременте). Почетни тренутак је месец пуштања саобраћаја. У сваком временском инкременту (сваки анализирани подпериод), сви фактори који утичу на понашање коловозне конструкције и оштећења су константни и то су:

- ниво саобраћаја
- модули асфалтно бетонских слојева
- модули носећих слојева
- модули постељице

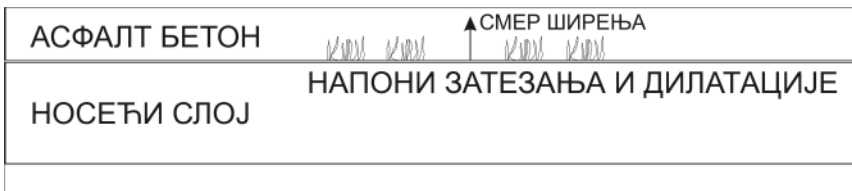
6.1.1.6 ПРЕДВИЂАЊЕ ОШТЕЋЕЊА

Оштећења представљају базу података за оцењивање и анализирање варијаната пробних прорачуна. Током анализирања коловозне конструкције разматрају се разне варијанте конструктивних оштећења, под која спадају:

- пукотине услед замора које настају у дну асфалтног слоја и шире се ка горњој површини - "алигатор пукотине". Овај тип пукотина услед замора је видљив прво у облику кратких подужних пукотина у трагу точка које се брзо шире и међусобно повезују у шаре облика

алигаторове коже. Ове пукотине настају у дну асфалтног слоја и шире се ка горњој површини услед понављања деловања оптерећења и понављаног ослањања асфалтног бетона на подлогу. У суштини, слој од асфалтног бетона се угиба под деловањем оптерећења од точкова, што резултује дилатацијама при затезању и напонима на дну асфалтног слоја. Код континуалног ослањања, напони затезања и коресподентне дилатације изазивају пукотине које настају на дну асфалтног слоја и шире се ка површини слоја. Овај механизам је приказан на слици 6.3 (Малела Ј. и други) [1] (Mallela J, et. al). Неки од узрока који изазивају високе напоне при затезању и дилатације на дну асфалтног слоја су:

- релативно танак и лоше изведен слој асфалтног бетона изложен великим магнитудама и броју понављања оптерећења од точка
- велико оптерећење од точка и високи притисци у пнеуматцима
- слабе тачке (мекана места) у невезаном агрегату у подлози или постелици
- лоше сабијен носећи слој од невезаног агрегата или повећање садржаја влаге или екстремно висок ниво подземне воде



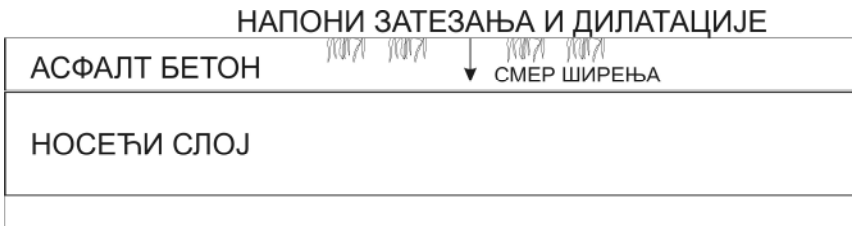
Слика 6.3. Пукотине услед замора које се шире од дна ка површини слоја асфалтног бетона

- пукотине услед замора које настају на горњој површини асфалтног слоја и шире се ка дубини - подужне пукотине. Овај тип пукотина формира се на површини и шири ка дну асфалтно бетонског слоја. Постоје различита мишљења о врсти механизма који изазива овај тип пукотина, али нема адекватних указујућих података на заступљеност неког од механизма. Неки од предложених механизма су кад:
 - оптерећење од точка изазива напоне затезања и дилатације услед затезања и дилатације које на површини изазивају пукотине које се шире услед затезања. Старење асфалтног бетона у хабајућем слоју убрзава процес настајања и ширења ових пукотина
 - смицање у асфалтној мешавини хабајућег слоја изазвано високим контактним притиском у пнеуматику преко ивица

пнеуматика. Ово изазива пукотине и услед смицања и услед затезања

- озбиљно старење асфалтно бетонских мешавина у близини површине хабајућег слоја резултује високим крутостима. Ове крутости у комбинацији са великим контактним притиском и уз оптерећење које се са возила преноси кроз пнеуматик, изазивају настајање пукотина и њихово ширење

Механизми оваквог типа пукотина су приказани на слици 6.4.



Слика 6.4. Пукотине услед замора које се шире од површине ка дну слоја асфалтног бетона

- замор хемијски стабилованих слојева (само код полукрутих коловозних конструкција)
- трајне деформације - колотрази
 - колотрази су улегнућа у путањама точкова изазвана пластичним деформацијама у једном или у свим слојевима коловозне конструкције и постелице. Ове пластичне деформације су типични резултат губитка запреминске масе или једнодимензионог притиска и консолидације, или бочног померања и пластичног течења материјала (асфалтног бетона, невезаног агрегата из носећег слоја и постелице). Они су категорисани у два типа:
 - а) *Једнодимензиона промена запреминске масе или вертикална компресија.* Дубина колотрага изазвана губитком запреминске масе је удубљење у околини осовине путање точка без придружених грба са обе стране удубљења, као што је приказано на слици 6.5а. Губитак материјала је изазван прекораченим шупљинама или неадекватним сабијањем, или слоја од везаног материјала, или слоја од невезаног материјала. Ово омогућава сабијање доњих слојева услед излагања саобраћајном оптерећењу. Овај тип колотрага најчешће спада у низак и средњи ниво оштећености



Слика 6.5. Типови колотрага
а) услед губитка запреминске масе

- б) *Бочно течење или пластично размицање.* Колотрази изазвани бочним размицањем материјала су удубљења у близини центра путање точка са уздигнућима са обе стране удубљења, као на слици 6.5б. Овај тип колотрага спада у умерен и висок ниво оштећености. Бочно течење је изазвано код мешавина, које имају неадекватну бочну чврстоћу или велике смичуће напоне услед саобраћајног оптерећења на специфичним попречним пресецима. Превелика густина асфалтно бетонског слоја изложеног врло тешком саобраћајном оптерећењу резултује излучевинама или испирањем у хабајућем слоју.



Слика 6.5. Типови колотрага
б) услед бочног пластичног размицања

- термичке пукотине у флексибилним коловозним конструкцијама настају као последица ниских температура или температурних циклуса. Оне се појављују као трансверзалне пукотине на коловозној површини управно на осовину пута. Ове пукотине могу бити изазване скупљањем асфалтно бетонског коловоза услед ниских температура, стврдњавањем асфалта или дневним температурним циклусима. Постоје два типа ових пукотина које нису последица оптерећења:
 - трансверзалне
 - блок пукотине

Ломови услед замора у хемијски стабилованим слојевима

Ломови услед замора, код полукрутих коловозних конструкција, настају у доњим слојевима који су хемијски стабиловани.

Материјали за хемијску стабилизацију су портланд цемент, летећи пепео и креч. Они омогућавају изградњу висококвалитетних слојева у коловозној конструкцији. Међутим, услед понављања оптерећења, јављају се микропрслине које доводе до редукције модула крутости и неизоставно до ломова услед замора. Овај процес значајно утиче на распростирање оштећења у асфалтним слојевима који се постављају преко хемијски стабилованих материјала (што треба избегавати). Дobar пројекат асфалтне мешавине и коловозне конструкције и добра пракса у извођењу

максимално смањују ломове услед замора хемијски стабилованих слојева. Најважнија чињеница је да хемијски стабиловани материјали у коловозној конструкцији доприносе њеном знатно бољем физичко механичком понашању, али је од суштинског значаја положај таквог слоја у конструкцији.

6.1.1.7 ПРЕДВИЂАЊЕ НЕРАВНОСТИ - IRI - МЕЂУНАРОДНИ ИНДЕКС НЕРАВНОСТИ

Овај индекс IRI, посматран кроз пројектни период, зависи од попречног профила коловозне конструкције, прорачунате почетне вредности IRI и развијања оштећења током пројектног периода. Оштећења код флексибилних коловозних конструкција обухватају колотраге, пукотине услед замора (од површине ка дну и од дна ка површини) и термичке пукотине. Овај модел користи почетну вредност IRI и поступке за одређивање неравности током пројектног периода. Поступци за одређивање неравности на терену обухватају мерења на постељици. Понашање материјала у постељици зависи од бубрења и скупљања тла услед деловања влаге и услова мржњења. Овај индекс IRI се процењује инкрементално током целог пројектног периода.

6.1.1.8 ПРОЦЕЊИВАЊЕ КАРАКТЕРИСТИКА И МОДИФИКОВАЊЕ ПРОРАЧУНА

Пробни прорачуни се раде итеративно. Овај процес обухвата следеће кораке:

1. установљавање граничних критеријума (ниво колотрага, пукотина, неравности на крају пројектног периода и жељени ниво поузданости за сваки од њих)
2. сакупљање пробних прорачуна
3. предвиђање понашања током пројектног периода
4. упоређивање предвиђених карактеристика са техничким условима
5. ако нису задовољени критеријуми, понављати пројектне кораке 3 и 4 све док се не задовоље технички услови

6.1.1.9 ПРОЈЕКТНА ПОУЗДАНОСТ

Велики број непознатих, а променљивих чинилаца се јавља током самог поступка димензионисања и изградње, као и током деловања саобраћајног оптерећења и климатских фактора у пројектном периоду. У механичко емпиријском поступку димензионисања, главни циљ су појединачне вредности по типовима оштећења (колотрази, пукотине услед замора и термичке пукотине). Због тога, предвиђена оштећења имају случајну променљиву која је од интереса за поузданост димензионисања. Квантификовање расподеле ове променљиве претпостављена је за све могуће средње вредности и од интереса је за поузданост очекивања. За

потребе димензионисања, поузданост је установљена на сазнању о варијацији задатој на основу предвиђене средње вредности.

Пројектна поузданост за појединачна оштећења коловоза је заснована на стандардној грешци од очекиване вредности за свако појединачно оштећење кроз калибрациони процес. Ова очекивана грешка укључује комбиновану улазну варијабилност, варијабилност у процесу извођења радова и модел чисте грешке.

6.1.1.10 ОЧЕКИВАНИ ТРОШКОВИ

Кад пробни прорачун задовољи конструктивне (оштећења) и функционалне (равност) захтеве, он постаје технички изводљиво алтернативно решење. После ове етапе при пројектовању, коловозна конструкција се посматра кроз трошкове на основу којих се пореди изводљивост решења. Генерални поступак за оцену трошкова је приказан у Додатку Ц Упутства за димензионисање AASHTO 2004. Предвиђена оштећења и IRI изводљивих пројектних алтернатива могу бити употребљени за оцењивање средњег трајања алтернативних решења и њихових стандардних одступања, током пројектом предвиђене политике трајања одржавања и рехабилитације у купној анализи трошкова.

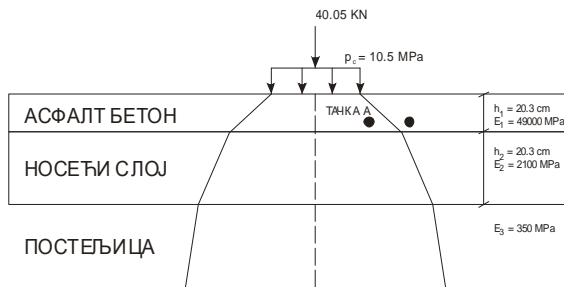
6.1.2 ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ НОВИХ ФЛЕКСИБИЛНИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА

6.1.2.1 УЛАЗНИ ПОДАЦИ

Улазни подаци који се користе за димензионисање нових флексибилних коловозних конструкција су категорисани на:

- опште податке који обухватају: пројектни период (године), годишње доба у ком је допуштена изградња доњег и горњег слоја; коловозни застор од асфалтног бетона захтева почетни месец чија је ознака $t = 0$, за модел старења и модел термичких пукотина; месец пуштања саобраћаја је месец када се очекује пуштање деонице у саобраћај, тип коловозне конструкције - флексибилна
- теренску идентификацију која обухвата следеће податке:
 - локацију објекта (пројекта)
 - идентификацију (пројекта, деоноце), односно додела ознаке ID, почетна и завршна стационажа, саобраћајни смер
 - функционални ниво пута који дефинише тип коловозне конструкције на почетку пројектовања и обухвата:
 - главне путне правце - међудржавни путеви
 - остале главне путне правце
 - путне правце нижег реда
 - главне сабирне путеве
 - мање сабирне путеве

- локалне путеве и градске улице
- анализу параметара
 - почетни IRI
 - критеријуме понашања
- саобраћај
 - основне информације (средњи годишњи дневни саобраћај тешких камиона за почетну годину - укупан број тешких теретних возила у саобраћајном току)
 - проценат камиона у пројектном смеру (фактор расподеле по смеровима)
 - проценат камиона у пројектној траци (фактор расподеле по тракама)
 - оперативна брзина возила - овај улазни податак је потребан за израчунавање модула битуменом везаних слојева (на слици 6.6 је приказана карактеристична коловозна конструкција и расподела напона у функцији од крутости слоја)



Слика 6.6 Расподела напона кроз коловозну конструкцију

- климу чији су улазни параметри:
 - сатне падавине током пројектног периода
 - сатне брзине ветра током пројектног периода
 - сатни проценат сунчаног времена током пројектног периода
 - сатна влажност околине
 - сезонска или константна дебљина водене плоче на месту извођења објекта
- дренажне и површинске карактеристике
- коловозну конструкцију чији су улазни подаци распоређени у следеће категорије:
 - дренажне и површинске карактеристике
 - способност апсорбовања застора током кратког временског периода
 - потенцијална инфилтрација
 - попречни нагиб конструкције
 - дужина дренажног пута

- карактеристике слојева који чине коловозну конструкцију, а који морају задовољити следећа ограничења, су:
 - код флексибилних коловозних конструкција, хабајући слој је увек од асфалтног бетона
 - код асфалтног бетона у пуној дебљини (асфалтног бетон положен на постељицу) то је минимална конструкција која може бити анализирана
 - само један слој од невезаног агрегата може бити постављен између два стабилизивана слоја
 - најнижа два слоја у коловозној конструкцији морају да буду од невезаног агрегата (због задовољавања овог ограничења, програмски пакет аутоматски раздваја слој постељице у два слоја, кад се анализира асфалтни бетон у пуној дебљини где је најнижи слој асфалтног бетона положен директно на постељицу)

АВ - асфалт бетон	12.7 mm 12.7 mm
	25.4 mm повећање до дебљине од 101.6 mm
BNS - битуменизирани носећи слој	од 101.6 mm од 203.2 mm
NA - носећи слој невезани агрегат	50.8 mm ако је $h_B > 152.4$ mm $n_B = (h_B - 50.8) / 4$ ако је $h_B > 152.4$ mm
NA - доњи носећи слој невезани агрегат	$n_{SB} = (h_{SB} / 4)$ ако је $h_{SB} > 203.2$ mm
сабијена постељица	$n_{CSG} = (h_{CSG} / 12)$ ако је $h_{CSG} > 304.8$ mm
природна постељица	$n_{SG} = (h_{SG} / 12)$ ако је $h_{SG} >$
стенска подлога	

Слика 6.7 Попречни пресек слојевите флексибилне коловозне конструкције (максималана дебљина доњих слојева је 2.4 m)

- потенцијална оштећења са карактеристикама за два типа:
 - блок пукотине (високи нивои оштећености дефинисани LTPP идентификационим упутством за оштећења), дефинисаним као проценат укупне површине саобраћајне траке
 - подужне пукотине изван трага точкова, дефинисане у метрима по километру (средњи и високи нивои)

оштећености дефинисани LTPP идентификационим упутством за оштећења)

6.1.2.2 ПОСТУПАК ЗА ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ФЛЕКСИБИЛНИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА

Суштина овог поступка је у механичко-емпиријском предвиђању различитих типова оштећења:

- ломова асфалтног бетона услед замора (од горње површине ка дну и обратно)
- трајних деформација (асфалтних слојева, носећег слоја од невезаног агрегата, постељице)
- термичких пукотина услед деловања околине
- хемијски стабилизованог материјала оптерећеног на замор до лома

Важно је напоменути да овај поступак за димензионисање не садржи механичко-емпиријски модел којим је дефинисан појам рефлектовања пукотина. Овим је, свакако, ограничен поступак за прорачунавање рехабилитација, али не и нових и реконструкција. Ипак, код прорачуна нових конструкција и реконструкција, рефлектовање пукотина из хемијски стабилованих слојева (полу-круте деонице) је главни фактор који диктира степен могућих пукотина у асфалтном застору.

Предвиђање оштећења применом механичко-емпиријског приступа је, такође, повезано са предвиђањем међународног индекса неравности (IRI), као функционални критеријум понашања конструкције који се може користити у поступку пројектовања.

6.1.2.2.1 ПАРАМЕТРИ ПРОБНОГ ПРОРАЧУНА

Овим поступком за димензионисање могу да се анализирају следећи типови коловозних конструкција:

- (1) - конвенционалне деонице са флексибилним коловозним конструкцијама
- (2) - деонице са дебљим слојевима асфалтног бетона
- (3) - деонице код којих је асфалтни бетон положен директно на постељицу
- (4) - полу круте деонице са хемијски стабилованим (цементна стабилизација) слојем

Уграђивање ових слојева може бити на конвенционалан начин уз смањење квалитета у зависности од дебљине (полагање асфалтног бетона преко слоја од невезаног агрегата и преко постељице или директно преко хемијски стабиловане постељице) или у инверзној конструкцији, где је асфалтни бетон (односно стабилизација) постављен између постељице и слоја од невезаног агрегата. На слици 6.2а и 6.2б су приказани различити типови коловозне конструкције.

При пробним прорачунима коловозне конструкције, кораци су следећи:

- избор попречног пресека, врсте материјала и дебљине слојева
- избор сезонских анализа (ако оне нису одабране, онда сви слојеви без битумена имају исти E_i и μ_i током целог пројектног периода). Међутим, ефекти сезонских варијација температуре и старења на крутост асфалтног бетона ће бити разматрани, иако сезонске анализе нису активирани у рачунарском програму. За ове анализе су доступне следеће опције:
 - одређивање EICM
 - месечне сезонске вредности
- избор критеријума за сваки тип оштећења
 - детерминистички поступак димензионисања
 - поступак који узима у обзир поузданост

6.1.2.2.2 МОДЕЛ РЕАКЦИЈА У КОЛОВОЗУ

Сврха овог модела је да се одреде утицаји у коловозној конструкцији које изазива саобраћајно оптерећење и околина. Утицаји околине могу бити директни (дилатације услед термичког ширења, односно скупљања) и индиректни преко утицаја на карактеристике материјала (промене у крутости услед температуре и влажности).

Улазни параметри за модел одређивања утицаја у флексибилној коловозној конструкцији су:

1. Геометрија коловозне конструкције
 - а. Дебљина слоја
2. Околина
 - а. Однос температуре и дебљине слоја за сваку од сезона
 - б. Однос влаге и дебљине слоја за сваку од сезона
3. Карактеристике материјала
 - а. Еластичне карактеристике
 - б. Нелинеарне карактеристике (где има смисла)
4. Саобраћај
 - а. Систем оптерећења - фреквенције деловања оптерећења у зависности од типова возила
 - б. Утицај контактнoг притиска на расподелу оптерећења и на контактну површину

Излазни подаци који одговарају наведеним улазним параметрима су напони, дилатације и померања у слојевима коловозне конструкције. Нарочиту важност имају променљиви критични утицаји, захтевани у моделу оштећења током механичко-емпиријског модела димензионисања. Примери таквих критичних утицаја су:

- хоризонталне дилатације при затезању на дну асфалтно бетонског слоја (пукотине услед замора)
- напони при вертикалном притиску / дилатација у слоју асфалтног бетона (колотрази)

- напони при вертикалном притиску / дилатација у носећем слоју и доњем носећем слоју (колотрази у слојевима од неvezаног агрегата)
- напони при вертикалном притиску / дилатација на врху постељице (колотрази у постељици)

Многе технике су доступне за одређивање ових утицаја, а неке од њих су:

- за линеарно еластичне вишеслојне системе - ЈУЛЕА (JULEA) рачунарски програм
- за нелинеарне средине попут неvezаних агрегата - ДСЦ2Д (DSC2D) модел нелинеарних коначних елемената за одређивање напона, дилатација и померања

Велика предност теорије о вишеслојном еластичном систему је у великој брзини израчунавања тражених параметара.

Сваки променљиви утицај у коловозној конструкцији мора бити одређен на критичној позицији у слоју, где утицајни параметри имају највеће вредности. Анализа положаја точка (точкова) за линеарно еластичну теорију (JULEA) и за метод коначних елемената је приказана на слици 6.8.

Положај по X-оси:

$$X1 = 0.0 \quad (\text{центар двојног точка / распон точкова})$$

$$X2 = ((T_{\text{растојање}} / 2) - T_{\text{радијус}}) / 2 \quad (T_{\text{растојање}} = \text{растојање точкова}; T_{\text{радијус}} = \text{контактни радијус})$$

$$X3 = ((T_{\text{растојање}} / 2) - T_{\text{радијус}})$$

$$X4 = T_{\text{радијус}} / 2$$

$$X5 = ((T_{\text{растојање}} / 2) + T_{\text{радијус}})$$

$$X6 = ((T_{\text{растојање}} / 2) + T_{\text{радијус}} + 10.16 \text{ cm})$$

$$X7 = ((T_{\text{растојање}} / 2) + T_{\text{радијус}} + 20.32 \text{ cm})$$

$$X8 = ((T_{\text{растојање}} / 2) + T_{\text{радијус}} + 40.64 \text{ cm})$$

$$X9 = ((T_{\text{растојање}} / 2) + T_{\text{радијус}} + 60.96 \text{ cm})$$

$$X10 = ((T_{\text{растојање}} / 2) + T_{\text{радијус}} + 81.28 \text{ cm})$$

Положај по Y-оси:

$$Y1: y = 0.0 \quad (\text{центар двојног точка / распон точкова})$$

$$Y2: y = S_{\text{тандем}} \quad (\text{осовинско растојање тандем точкова})$$

$$Y3: y = S_{\text{тандем}} / 2$$

$$Y4: y = S_{\text{тридем}}$$

$$Y5: y = S_{\text{тридем}} / 2$$

$$Y6: y = S_{\text{тридем}} \cdot 3/2$$

$$Y7: y = S_{\text{тридем}} \cdot 4/2$$

Наведене формулације се односе на анализе у x -у равни. Критични утицаји се одређују на различитим дубинама и положајима између горе наведених, у зависности од типа оштећења. Дубине на којима се врше анализе су:

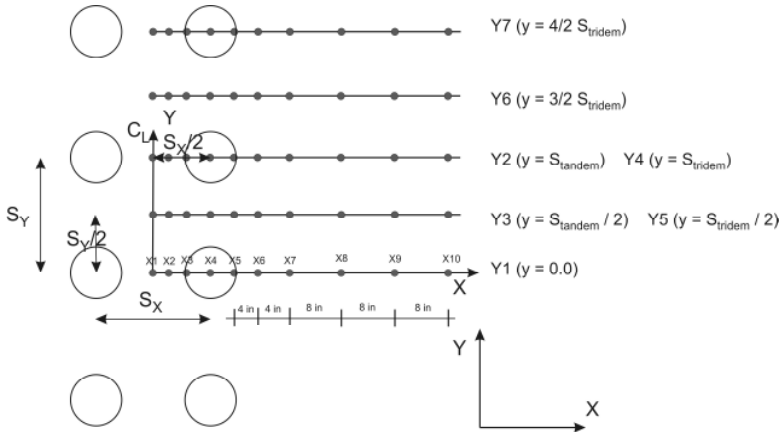
Дубине за замор:

1. површина коловоза ($z=0$)

2. 0.5 инча (1.27 cm) испод коловозне површине ($z=0.5$) ($z=1.27$ cm)
3. на дну сваког слоја од невезаног агрегата или стабилизованог слоја

Дубине за колотраге:

1. на средини сваког слоја / подслоја
2. на врху постелице
3. 6 инча (15.24 cm) изнад горње површине постелице



Израчунати утицаји:

- један точак:
 - утицај 1 = Y1
- тандем точкова:
 - утицај 1 = Y1 + Y2
 - утицај 2 = 2 x Y3
- тридем точкова:
 - утицај 1 = Y1 + 2 x Y4
 - утицај 2 = 2 x Y5 + Y6
- склоп точкова:
 - утицај 1 = Y1 x Y4 + Y7
 - утицај 2 = 2 x Y5 + 2 x Y6

Слика 6.8 Шематски приказ основе за анализу положаја точкова

6.1.2.2.3 ПРЕДВИЂАЊЕ ПОНАШАЊА КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

Димензионисање и анализирање задате коловозне конструкције је засновано на акумулацији оштећења, које је функција времена и саобраћајног оптерећења. Главна оштећења флексибилних коловозних конструкција су:

- а) трајна деформација (колотрази) у виду три основна типа деформација:

- примарни стадијум: високи почетни ниво колотрага, са повећањем пластичне деформације која доминантно мења запремину материјала
- секундарни стадијум: мањи ниво колотрага са константном променом која се, такође, манифестује променом запремине, али и повећаним смичућим деформацијама
- терцијарни стадијум: висок ниво колотрага са доминирајућим пластичним (смичућим) деформацијама, али без промене запремине

Укупна трајна деформација је за посматрани годишњи период, збир свих трајних деформација за сваки слој понаособ и математички је изражена помоћу:

$$RD = \sum_{i=1}^{n \text{ подслојева}} \varepsilon_p^i \cdot h^i \quad (6.1)$$

где је:

RD - трајна деформација коловозне конструкције

n подслојева - број подслојева

ε_p^i - укупна пластична деформација слоја i

h^i - дебљина слоја i

Значајан утицај на трајне деформације у флексибилној коловозној конструкцији имају:

- дебљина асфалтног слоја
- динамички модул асфалтног слоја
- проценат битумена у асфалтној мешавини
- садржај шупљина у асфалтном слоју
- ефективни садржај битумена у асфалтном слоју
- тип подлоге (носећег слоја)
- дебљина носећег слоја
- крутост носећег слоја
- саобраћајно оптерећење, контактна површина и притисак у пнеуматику
- оперативна брзина
- бочно кретање у саобраћајном току
- температура и утицај околине

Многи од ових параметара остају константни током прорачуна за одговарајући пројектни период (нпр. дебљина слоја), док многи од њих варирају сезонски, месечно, часовно или током старења коловозне конструкције.

Поступак предвиђања трајне деформације

1. Табулисање улазних података - сумирање свих неопходних података за предвиђање колотрага
2. Сређивање података о саобраћајном оптерећењу - одређивање коефицијената еквиваленције за један точак, тандем, тридем и склоп точкова (осовина)
3. Сређивање података о температури у коловозној конструкцији - часовне промене генерисане у моделу EICM (нелинеарна расподела) треба да буду преведени у линеарну расподелу према календарским месецима
4. Сређивање података о месечној влажности - ефекти сезонских промена влажности на модуле носећег слоја и постелице
5. Израчунавање стања напона и деформација - израчунавање одговарајућих напона за свако саобраћајно оптерећење, ниво оптерећења, положај оптерећења, температурну разлику за сваки месец током пројектног периода у средини и на дну сваког слоја. Употребом модула материјала и Поасоновог коефицијента одредити еластичне дилатације у свакој прорачунској тачки
6. Прорачун трајне деформације - израчунавање колотрага за сваку подсезону и сумирање колотрага за сваки слој за укупни временски период

Поузданост трајних деформација

Поузданост прорачуна се постиже одређивањем предвиђених колотрага на жељеном нивоу поузданости према:

$$RD_{-P} = \sum_i (RD_i) + \left(\sqrt{Se_{RDAC}^2 + Se_{RDGB}^2 + Se_{RDSG}^2} \right) \cdot Z_p \quad (6.2)$$

где је:

RD_{-P} - предвиђени колотраг са нивоом поузданости P (in) ($1 \text{ in} = 0.0254 \text{ m}$)

RD_i - предвиђени колотраг заснован на средњој вредности ($P = 50\%$) (in)

Se_{RD_i} - стандардна грешка за колотраге на предвиђеном нивоу средње вредности колотрага

Z_p - стандардна нормална девијација (нормална расподела)

i - тип слоја, асфалтног бетона, носећи слој или постелица

- б) пукотине услед замора (од површине ка дну и обратно), које изазивају губитак конструктивне целовитости слојева коловозне конструкције. Максимална дилатација при затезању у коловозној конструкцији не мора да буде и најкритичнији фактор оштећења. Одређивање оштећења услед замора је засновано на Минеровом закону. Фактори који утичу на количину пукотина услед замора у асфалтним слојевима су:

- дебљина асфалтних слојева

- динамички модули асфалтних слојева
- проценат везива у асфалтној мешавини
- шупљине у асфалтном слоју
- ефективни садржај битумена у асфалтном слоју
- дебљина носећег слоја
- модул постелјице
- конфигурација саобраћајног оптерећења
- саобраћајно оптерећење, контактна површина и притисак у пнеуматику
- понављање саобраћајног оптерећења
- температура и утицај околине

Због тачности резултата, све променљиве које изазивају значајно различите утицаје у коловозној конструкцији (напони, дилатације) морају бити одређене одвојено. На пукотине услед замора утичу:

- старост коловозне конструкције (промене динамичког модула и отврдњавање битумена)
- месечне варијације температуре коловозне конструкције, промене влажности како у носећем слоју, тако и у постелјици (промене динамичког модула)
- брзина саобраћајних токова
- конфигурација саобраћајног оптерећења, температура и утицаји околине

Процедура предвиђања пукотина услед замора

1. Табулисање улазних података за предвиђање пукотина
2. Сређивање података о саобраћајном оптерећењу - одређивање коефицијената еквиваленције за један точак, тандем, тридем и склоп точкова (осовина)
3. Сређивање података о температури у коловозној конструкцији - часовне промене генерисане у моделу EICM (нелинеарна расподела) треба да буду преведене у линеарну расподелу према календарским месецима
4. Сређивање података о месечној влажности - ефекти сезонских промена влажности на модуле носећег слоја и постелјице
5. Израчунавање стања напона и деформација - израчунавање одговарајућих напона за свако саобраћајно оптерећење, ниво оптерећења, положај оптерећења, температурну разлику за сваки месец током пројектног периода у средини и на дну сваког слоја
Употребом модула материјала и Поасоновог коефицијента одредити еластичне дилатације у свакој тачки која се анализира
6. Израчунавање пукотина услед замора за сваки од слојева на основу срачунатих оштећења

Поузданост пукотина услед замора

Поузданост димензионисања је заснована на одређивању предвиђених оштећења услед замора са траженим нивоом поузданости:

$$FC_P = (FC_i + Se_{FC_i} \cdot Z_p) \quad (6.3)$$

где је:

FC_P - предвиђене пукотине са нивоом поузданости P (%) или (ft/mile)
(1feet/mile = 18493 cm/km)

FC_i - предвиђене пукотине засноване на средњој вредности ($P=50\%$) (%) или
(ft/mile) (1feet/mile = 18493 cm/km)

Se_{FC_i} - стандардна грешка за пукотине на предвиђеном нивоу средње
вредности пукотина

Z_p - стандардна нормална девијација (нормална расподела)

i - тип слоја, асфалтног бетона, носећи слој или постелица

ц) термичке пукотине (попречне пукотине) настају управно на осовину коловозне конструкције услед деловања температурних циклуса топло-хладно. Фактори који утичу на магнитуду термичких пукотина у асфалтно бетонском слоју су:

- однос температуре и дубине у профилу асфалтног слоја
- течење
- опит температуре при течењу
- чврстоћа при затезању
- шупљине у минералном агрегату у мешавини
- коефицијент термичке контракције агрегата
- коефицијент термичке контракције мешавине
- дебљина асфалтно бетонског слоја
- шупљине испуњене ваздухом
- шупљине испуњене битуменом
- одсечак на битуменском дијаграму вискозитет - температура после жарења на 163°C RTFO (Rolling Thin Film Oven)
- пенетрација на 25°C

Док већина наведених параметара остаје константна током прорачуна (дебљине слоја), остали варирају сезонски или са старењем конструкције. Због тачности анализе термичких података, у свим случајевима у којима значајно утичу на различите напоне, они морају бити одређивани одвојено. Инкремент термичких пукотина дефинисан у овом Упутству је одређен на месечном нивоу ради израчунавања следећих случајева:

- односа температуре и дубине у профилу асфалтног слоја - Основна методологија приступа, који је употребљен у предвиђању модела оштећења од термичких пукотина, предвиђа коришћење EICM модела као климатског алгоритма за одређивање односа температуре и дубине у асфалтном слоју, у сатним интервалима током целог пројектног периода (20 до 30 година). Допушта предвиђање

термичких напона на било којој задатој дубини и времену у асфалтном слоју

- течења - одређивање на температурама од 0, -10 и -20°C. Израчунавају се виско-еластичне карактеристике на којима су засноване анализе термичких пукотина. Допушта одређивање параметара лома за израчунавање повећања дужине термичких пукотина
- чврстоће при затезању - индиректна мера којом се мере линеарне виско-еластичне карактеристике на којима су засноване анализе термичких пукотина. Допушта одређивање параметара лома за израчунавање повећања дужине термичких пукотина

Модел за термичке пукотине

Количина попречних пукотина које се очекују у коловозној конструкцији је предвиђена дужином пукотине која се преводи у количину пукотина (фреквенција пукотина) помоћу следеће једначине:

$$C_f = \beta_1 \cdot N \cdot \left(\frac{\log \frac{C}{h_{ac}}}{\sigma} \right) \quad (6.4)$$

где је:

C_f - опажена количина термичких пукотина

β_1 - теренски регресиони коефицијент

$N(z)$ - стандардна нормална расподела (z)

σ - стандардна девијација логаритма дубине пукотине у коловозној конструкцији

C - дубина пукотине

h_{ac} - дебљина асфалтно бетонског слоја

Количина насталих пукотина изазваних термичким циклусима топло-хладно је предвиђена употребом Парисовог закона (Paris) за ширење пукотина:

$$\Delta C = A \cdot \Delta K^n \quad (6.5)$$

где је:

ΔC - промена дубине пукотине услед циклуса хлађења

ΔK - промена у интензитету фактора напона услед циклуса хлађења

A, n - параметри лома за асфалтне мешавине

Приступ употребљен за оцењивање параметара A и n је заснован на радовима [11], [12] и [13]. Мастер крива течења се изражава помоћу експоненцијалне функције:

$$D(\zeta) = D_o + D_1 \cdot \zeta^m \tag{6.6}$$

Вредност m , изведена из криве течења је употребљена за израчунавање параметра лома n помоћу једначине:

$$n = 0.8 \cdot \left(1 + \frac{1}{m} \right) \tag{6.7}$$

Када је вредност n позната, параметар лома A се израчунава из једначине:

$$A = 10^{(\beta \cdot (4.389 - 2.52 \cdot \log(E \cdot \sigma_m \cdot n)))} \tag{6.8}$$

где је:

E - крутост мешавине

σ_m - крутост непоремећене мешавине

β - калибрациони параметар

У систему националне калибрације, за три хијерархијска нивоа приказани су калибрациони параметри у табели 6.2, чији је детаљан опис приказан у Додатку XX [29].

Табела 6.2 Национални калибрациони параметри за модел термичких пукотина

Хијерархијски ниво	β_1	σ	E	β
1	400	0.769	10000	5.0
2	400	0.769	10000	1.5
3	400	0.769	10000	3

Поступак предвиђања термичких пукотина

Одређивање количине термичких пукотина се обавља на следећи начин:

1. Обједињавање улазних података неопходних за предвиђање термичких пукотина
2. Формирање мастер криве течења (рачунарски програм МАСТЕР (MASTER))
3. Предвиђање термичких напона - употребом виско-еластичне трансформационе теорије, течење се може повезати са повратним модулом асфалтне мешавине. Познавање ових параметара повезаних са подацима о температури из ЕИЦМ (EICM) модела, омогућава предвиђање термичких напона у било којој дубини и у било ком временском тренутку у асфалтном слоју. Ово је постигнуто у ТЦМОДЕЛ (TCMODEL) рачунарском програму
4. Повећање дужине термичких пукотина према Парисовом закону (Paris' law)
5. Прорачун дужине термичких пукотина

Корак 1: Обједињавање улазних података

Развијени приступ термичким пукотинама захетва карактеристике асфалтних мешавина у моду индиректног затезања. Анализа термичких ломова је заснована на линеарној виско-еластичности, те се због тога мере основне виско-еластичне особине асфалтне мешавине. Ове мерене карактеристике спадају у течење, употребом индиректних затезних опита на једној или три температуре, у зависности од нивоа анализе (0, -10 и -20°C), а индиректна чврстоћа при затезању се одређује само на -10°C. Детаљна објашњења су приказана у Додатку XX [29].

Технички захтеви за специфична лабораторијска испитивања која се примењују у рачунарском програму ТЦМОДЕЛ (TCMODEL) морају пажљиво пратити протокол који је развио Роке са сарадницима (Roque et al.) [14].

Течење $D(t)$ идеализованог стања напона је изражено помоћу Хуковог закона:

$$D(t) = \frac{\varepsilon_x}{\sigma_x - \mu \cdot \sigma_y} \quad (6.9)$$

Фактор корекције у тродимензионалном моделу коначних елемената који је развио Роке је изражен помоћу једначине:

$$D(t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma} = \frac{H_m(t) \cdot D \cdot t}{P \cdot GL} \cdot (C_{CMPL}) \quad (6.10)$$

где је:

$$C_{CMPL} = \frac{1.071 \cdot \pi \cdot C_{BX}}{2 \cdot (C_{SX} + 3 \cdot \mu \cdot C_{SY})} \quad (6.11)$$

$D(t)$ - течење у тренутку t

$H_m(t)$ - мерена хоризонтална дефлексија у тренутку t

GL - дужина мерача (= 25.4 mm за пречник од 101.6 mm, = 38.1 mm за пречник од 152.4 mm)

P - оптерећење које изазива течење

t - дебљина узорка

D - пречник узорка

μ - Поасонов коефицијент

C_{CMPL} , C_{SX} , C_{SY} , C_{BX} - корекциони фактори за бездимензионално течење, корекциони фактор за хоризонтални напон, корекциони фактор за вертикални напон и корекциони фактор за хоризонтално избочавање

Једначине за корекционе факторе су:

$$C_{C MPL} = 0.6354 \cdot \left(\frac{X}{Y}\right)^{-1} - 0.332 \quad (6.12)$$

са ограничењем вредности за фактор на:

$$0.20 \leq \frac{t}{D} \leq 0.65 \quad (6.13)$$

$$\left[0.704 - 0.213 \cdot \left(\frac{t}{D}\right)\right] \leq C_{C MPL} \leq \left[1.566 - 0.195 \cdot \left(\frac{t}{D}\right)\right] \quad (6.14)$$

$$C_{SX} = 0.948 - 0.01114 \cdot \left(\frac{t}{D}\right) - 0.2693 \cdot (\mu) + 1.436 \cdot \left(\frac{t}{D}\right) \cdot (\mu) \quad (6.15)$$

$$C_{SY} = 0.901 + 0.138 \cdot (\mu) + 0.287 \cdot \left(\frac{t}{D}\right) - 0.251 \cdot (\mu) \cdot \left(\frac{t}{D}\right) - 0.246 \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^2 \quad (6.16)$$

и

$$C_{BY} = 1.03 - 0.191 \cdot \left(\frac{t}{D}\right) - 0.081 \cdot (\mu) + 0.089 \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^2 \quad (6.17)$$

Вредност $\left(\frac{X}{Y}\right)$ представља апсолутну вредност коефицијента мерене хоризонталне и вертикалне дефлексије. Овај однос је искоришћен и за израчунавање Поасоновог коефицијента за материјал током опита:

$$\mu = -0.10 + 1.480 \cdot \left(\frac{X}{Y}\right)^2 - 0.778 \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^2 \cdot \left(\frac{X}{Y}\right)^2 \quad (6.18)$$

са $0.05 \leq \mu \leq 0.50$.

Нови ревидовани протокол за одређивање течења је заснован на трајању опита од 100 секунди. За Ниво 1, испитивања се врше на три идентична узорка на три температуре, а за Ниво 2 на једној температури. За анализе на Нивоу 3, течење је засновано на корелацијама запремине и карактеристика мешавине.

Вредност течења у тренутку t је:

$$D(t) = D_1 \cdot t^m \quad (6.19)$$

где је:

D_1 , m - коефицијенти лома

t - време трајања оптерећења у секундама

За параметар D_1 употребљен је следећи корелациони однос:

$$\log(D_1) = -8.5241 + 0.01306 \cdot T + 0.7957 \cdot \log(V_a) + 20103 \cdot \log(VFA) - 1.923 \cdot \log(A_{RTFO}) \quad (6.20)$$

где је:

T - температура испитивања ($^{\circ}\text{C}$), (0, -10 и -20 $^{\circ}\text{C}$)

V_a - шупљине испуњене ваздухом (%)

$$VFA - \text{шупљине испуњене битуменом (\%)} = \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \cdot 100$$

V_{beff} - ефективни садржај битумена (%)

A_{RTFO} - одсечак на дијаграму вискозитет - температура после жарења битумена на 163 $^{\circ}\text{C}$ RTFO (Rolling Thin Film Oven)

За параметар m , корелациона једначина је:

$$m = 1.1628 - 0.00185T - 0.04596V_a - 0.01126VFA + 0.00247Pen_{77} + 0.001683Pen_{77}^{0.4605} \cdot T \quad (6.21)$$

где је:

T - температура испитивања ($^{\circ}\text{C}$), (0, -10 и -20 $^{\circ}\text{C}$)

V_a - шупљине испуњене ваздухом (%)

$$VFA - \text{шупљине испуњене битуменом (\%)} = \frac{V_{beff}}{V_{beff} + V_a} \cdot 100$$

$$pen_{77} - \text{пенетрација на } 77^{\circ}\text{F (25 }^{\circ}\text{C)} = 10^{290.5013 - \sqrt{81177.288 + 257.0694 \cdot 10^{(A + 2.72973 \cdot VTS)}}$$

A_{RTFO} - одсечак на дијаграму вискозитет - температура после жарења битумена на 163 $^{\circ}\text{C}$ RTFO (Rolling Thin Film Oven)

VTS - нагиб линије на дијаграму вискозитет - температура после жарења битумена на 163 $^{\circ}\text{C}$ RTFO (Rolling Thin Film Oven)

Доња граница за m је 0.01.

Једначина за одређивање индиректне чврстоће при затезању је:

$$S_t = \frac{2 \cdot P_f \cdot C_{SX}}{\pi \cdot D_i} \quad (6.22)$$

где је:

P_f - оптерећење које изазива лом

C_{SX} - корекциони фактор за хоризонтални напон

t - дебљина узорка

D - пречник узорка

Корелациона једначина за чврстоћу при затезању је:

$$S_i = 7416.712 - 114.016 \cdot V_a - 0.304 \cdot V_a^2 - 122.592 \cdot VFA + 0.704 \cdot VFA^2 + 405.71 \cdot \log(\text{pen}_{77}) - 2039.296 \cdot \log(A_{RTFO}) \quad (6.23)$$

где је:

S_i - чврстоћа при затезању (psi), (1psi = 6900 N/m²)

Излазна једначина је подешена тако да је доња граница 100 (psi). Детаљна објашњења су приказана у Додатку XX [29].

Корак 2: Формирање мастер криве течења

Једначина за одређивање мастер криве течења је дефинисана Пронијевим низом (Prony):

$$D(\xi) = D(0) + \sum_{i=1}^N D_i \cdot \left(1 - e^{-\frac{\xi}{\tau_i}} \right) + \frac{\xi}{\eta_v} \quad (6.24)$$

са

$$\xi = \frac{t}{\alpha_T} \quad (6.25)$$

где је:

ξ - редуковано време

t - стварно време

α_T - смичући фактор температуре

$D(\xi)$ - течење у редукованом времену

$D(0)$, D_i , τ_i , η_v - параметри Пронијевог низа

Резултати течења приказани помоћу мастер криве могу бити изражени и помоћу експоненцијалне функције:

$$D(\xi) = D_0 + D_1 \cdot \xi^m \quad (6.26)$$

Разлог за употребу овог додатног модела је, што помоћу параметра нагиба експоненцијалне функције m , могу бити одређени параметри за многе пукотине (ширење пукотина) у моделу лома.

Корак 3: Одређивање термичких напона

Употребом виско-еластичне трансформационе теорије, течење $D(t)$, може бити повезано са модулом релаксације E_r асфалтне мешавине. Модул релаксације се може израчунати генерализованим Максвеловим моделом израженим помоћу Пронијевог низа:

$$E(\xi) = \sum_{i=1}^{N-1} E_i \cdot e^{-\frac{\xi}{\tau_i}} \quad (6.27)$$

где је:

$E(\xi)$ - релаксациони модул у редукованом времену t

E_i, λ_i - параметри Пронијевог низа за релаксационе модуле мастер криве

Познавање ових модула омогућава одређивање термичких напона помоћу конститутивних једначина:

$$\sigma(\xi) = \int_0^{\xi} E(\xi - \xi') \frac{d\varepsilon}{d\xi'} d\xi' \quad (6.28)$$

где је:

$\sigma(\xi)$ - напони у редукованом времену ξ

$E(\xi - \xi')$ - релаксациони модул у редукованом времену $\xi - \xi'$

ε - дилатација у редукованом времену $\xi (= \alpha(T(\xi') - T_0))$

α - линеарни коефицијент термичке контракције

$T(\xi')$ - температура коловозне конструкције у редукованом времену ξ'

T_0 - температура коловозне конструкције кад је $\sigma = 0$

ξ' - интеграциона променљива

Корак 4: Прорачун повећања дужине термичких пукотина

Параметар интензитета напона K је:

$$K = \sigma \cdot (0.45 + 1.99 \cdot C_o^{0.56}) \quad (6.29)$$

где је:

K - фактор интензитета напона

σ - напон у коловозној конструкцији на дубини пукотине

C_o - тренутна дужина пукотине (feet) (1ft = 0.30 m)

Модел за ширење термичких пукотина који се користи у моделу термичких ломова је:

$$\Delta C = A \cdot \Delta K^n \quad (6.30)$$

где је:

ΔC - промена дубине пукотине услед циклуса хлађења

ΔK - промена фактора интензитета напона услед циклуса хлађења

A, n - параметри лома асфалтне мешавине

У изразу 6.31, вредност m се изводи из линије течења и користи се за рачунање за n параметара лома из једначине:

$$n = 0.8 \cdot \left(1 + \frac{1}{m} \right) \quad (6.31)$$

Када је вредност n позната, параметар лома A се израчунава помоћу једначине:

$$A = 10^{(\beta \cdot (4.389 - 2.52 \log(E \cdot \sigma_m \cdot n)))} \quad (6.32)$$

где је:

E - крутост мешавине (psi), (1 psi = 6900 N/m²)

σ_m - чврстоћа при затезању непоремећене мешавине (psi)

β - параметар корекције

Корак 5: Прорачун дубине термичких пукотина

Једначина за израчунавање дубине пукотине у односу на количину пукотина је:

$$C_f = \beta_1 \cdot P_R (\log C > \log h_{ac}) \quad (6.33)$$

$$C_f = \beta_1 \cdot N \cdot \left(\frac{\log C / h_{ac}}{\sigma} \right) \quad (6.34)$$

где је:

C_f - опажена количина термичких пукотина

β_1 - регресиони коефицијент одређен кроз теренску калибрацију

N () - стандардна нормална расподела оцењена на ()

σ - стандардна девијација логаритма дубине пукотина у коловозној конструкцији

C - дубина пукотине

h_{ac} - дебљина асфалтног слоја

д) пукотине услед замора хемијски стабилованих мешавина су резултат следећих разматрања:

- ако је слој од хемијски стабилованог материјала постављен директно испод асфалтног бетона, свака пукотина настала као последица замора хемијски стабилованог материјала ће изазвати пукотине у слоју од асфалтног бетона
- ако је слој за амортизовање пукотина (слојеви од невезаног агрегата) постављен између асфалтно бетонског слоја и слоја од хемијски стабилованог материјала, постоји могућност да рефлектовање пукотина кроз асфалтно бетонски слој буде минимално или потпуно елиминисано
- пошто је слој од хемијски стабилованог материјала предодређен за повећање нивоа оштећења услед замора, еквивалентни модул цемента стабилованог материјала (E_{CSM}) може бити значајно

деградиран. Оваква подлога за ове пукотине услед замора служи да смањи модул хемијски стабилизованог материјала, што изазива веће дилатације при затезању у слоју од асфалтног бетона. Ово изазива убрзање настајања "алигаторских пукотина" од дна ка површини у самом слоју асфалтног бетона

Постоји више модела којима се описује понашање хемијски стабилованих мешавина, а једначина која се користи у овом Упутству је:

$$\log CTB_Damage = \frac{\left(0.972 \cdot \beta_{c1} - \left(\frac{\sigma_t}{MR}\right)\right)}{(0.0825 \cdot \beta_{c2})} \quad (6.35)$$

где је:

CTB - оштећење хемијски стабилизованог материјала

N_f - број понављања оптерећења до појаве пукотина услед замора слоја од хемијски стабилизованог материјала (XCM)

σ_t - максимални саобраћај који изазива напоне затезања на дну слоја од XCM (psi), (1psi = 6900 N/m²)

MR - модул лома после 28 дана (чврстоћа на савијање), (psi)

β_{c1} , β_{c2} - теренски калибрациони фактори

Прорачунска анализа пукотина услед замора се ради за редефинисани временски период од 2 до 4 недеље. Као резултат, инкременти оштећења за анализирани период се израчунавају на следећи начин:

$$E_{CSM}(t) = E_{CSM}(\min) + \frac{(E_{CSM}(\max) - E_{CSM}(\min))}{(1 + e^{(-4+14D)})} \quad (6.36)$$

где је:

$E_{CSM}(t)$ - нови модул слоја од хемијски стабилизованог материјала са нивоом оштећености D (psi), (1psi = 6900 N/m²)

$E_{CSM}(\max)$ - максимални модул слоја од хемијски стабилизованог материјала за нетакнути слој (psi)

$E_{CSM}(\min)$ - минимални модул слоја од хемијски стабилизованог материјала за нетакнути слој (psi)

D - ниво оштећености хемијски стабилизованог слоја у децималној форми (D = 0.60)

Емпиријска веза којом су повезани ниво оштећености и пукотине у слоју је:

$$C = \frac{1000}{(1 + e^{(1-D)})} \quad (6.37)$$

где је:

- C - пукотине у хемијски стабилизованом слоју изражене дужином у дужини пукотина у стопама на 500 стопа дугој деоници
- D - ниво оштећености хемијски стабилизованог слоја у децималној форми (D = 0.60)

Резултат теренске калибрације су фактори:

$$\beta_{c1} = 1.0$$

$$\beta_{c2} = 1.0$$

Поступак предвиђања пукотина услед замора хемијски стабилизованог материјала

Предвиђање оштећења услед пукотина насталих замором материјала у полукрутним коловозним конструкцијама је следећи:

1. Табулисање улазних података за предвиђање ефеката оштећења слојева од хемијски стабилизованог материјала
2. Сређивање података о саобраћајном оптерећењу - одређивање коефицијената еквиваленције за један точак, тандем, тридем и склоп точкова (осовина)
3. Сређивање података о температури у коловозној конструкцији - часовне промене генерисане у моделу EICM (нелинеарна расподела) треба да буду преведени у линеарну расподелу према календарским месецима
4. Сређивање података о месечној влажности - ефекти сезонских промена влажности на модуле носећег слоја и постелјице
5. Израчунавање стања напона и деформација - израчунавање одговарајућих напона за свако саобраћајно оптерећење, ниво оптерећења, положај оптерећења, температурну разлику за сваки месец током пројектног периода у средини и на дну слоја од хемијски стабилизованог материјала. Израчунати оштећење за сваку подсезону и сабрати их ради одређивања укупног оштећења слоја. Овако израчунато оштећење је основа за доказивање модула оштећеног хемијски стабилизованог слоја за следећи анализирани период
6. Израчунати пукотине услед замора у слоју од хемијски стабилизованог материјала (ако није постављен слој за акумулисање рефлектовања пукотина) - Употребити ове податке за прорачунавање количине рефлектованих пукотина у асфалтно бетонском слоју. Ако постоји слој за акумулисање рефлектованих пукотина, употребити акумулисану оштећења за редуковање модула у следећем интервалу анализирања, а за предвиђање повећања дилатације при затезању у слоју од асфалтног бетона

е) модел неравности IRI (International Roghness Index)

На основу неколико истраживачких студија успешно је направљен модел неравности који користи кључне типове оштећења [7], [15] и [16]. Ове студије су откриле да неравност може значајно да утиче на колотраге, промену дубине колотрага и пукотине услед замора.

Многа оштећења која су у корелацији са неравношћу, а повезана су са оптерећењем и климом, могу да буду израчуната механичко-емпиријским моделима (пукотине услед замора, трајне деформације, термичке пукотине). Остала оштећења, као што су рупе, блок пукотине и подужне пукотине, такође утичу на равност. Према овом Упутству (AASHTO 2004), пројектанту је омогућено да директно унесе потенцијална оштећења док моделира неравност. Поред овога, опадање равности услед померања тла и осталих климатских фактора (депресије, ледена сочива, слегање) су такође, разматрани у предвиђању равности кроз употребу термина "фактор на лицу места - фактор ин ситу". Детаљна објашњења су приказана у Додатку ОО[26].

Невезани агрегати - носећи и доњи носећи слој

$$IRI = IRI_o + 0.0463 \cdot \left[SF \cdot (e^{\frac{age}{20}} - 1) \right] + 0.00119 \cdot (TC_L)_T + 0.1834 \cdot (COV_{RD}) + \\ + 0.00384 \cdot (FC)_T + 0.00736 \cdot (BC)_T + 0.00115 \cdot (LC_{SNWP})_{MH} \quad (6.38)$$

где је:

IRI - IRI у било ком временском тренутку (m/km)

IRI_o - почетна вредност IRI (m/km)

SF - теренски фактор (6.39)

($e^{\frac{age}{20}} - 1$) - временски термин (старост (age) изражена у годинама)

COV_{RD} - коефицијент варијације за дубину колотрага (%)

(TC_L)_T - укупна дужина трансферзалних пукотина (низак, средњи и висок ниво оштећености) (m/km)

(FC)_T - пукотине услед замора у трагу точка као проценат укупне површине саобраћајне траке

(BC)_T - површинске блок пукотине као проценат укупне површине саобраћајне траке

(LC_{SNWP})_{MH} - дужина средњег и високог нивоа заливених подужних пукотина изван трага точка (m/km)

$$SF = \left(\frac{(R_{SD}) \cdot (P_{0.075} + 1) \cdot (PI)}{2 \cdot 10^4} \right) + \left(\frac{\ln(FI + 1) \cdot (P_{02} + 1) \cdot [\ln(R_m + 1)]}{10} \right) \quad (6.39)$$

где је:

R_{SD} - стандардна девијација месечних падавина (mm)

P_{0.075} - проценат пролаза на ситу 0.075 mm

PI - индекс пластичност тла (%)

FI - индекс мраза (дана-степени)
 P₀₂ - проценат пролаза на ситу 0.02 mm
 R_m - средње годишње падавине (mm)

Предвиђање IRI за асфалтно бетонске коловозе преко подлоге од невезаног агрегата уз ниво поузданости је:

$$IRI_P = IRI + STD_{IRI} \cdot Z_p \leq 100\% \quad (6.40)$$

где је:

IRI_P - предвиђен IRI са нивоом поузданости P (m/km)
 IRI - предвиђени IRI заснован на средњој вредности P=50% (m/km)
 STD_{IRI} - стандардна девијација са предвиђеном средњом вредношћу IRI
 Z_p - стандардна нормална девијација

Стандардна нормална девијација за IRI у асфалтно бетонским коловозима са подлогом од невезаних агрегата је изведена из варијансе:

$$\begin{aligned} Var[IRI] = & Var[IRI_0] + \{(0.0367 \cdot (e^{\frac{age}{20}}) - 0.0367)\}^2 \cdot Var[SF] + \\ & + 1.05625 \times 10^{-5} \cdot Var[(FC)_T] + 1.67445 \times 10^{-5} \cdot Var[COV_{RD}] + \\ & + 1.1236 \times 10^{-6} \cdot Var[(TC_L)_T] + 4.9562 \times 10^{-5} \cdot Var[BC_T] + \\ & + 2.4336 \times 10^{-6} \cdot Var[(LC_{SNWP})_{MH}] + S_e^2 \end{aligned} \quad (6.41)$$

где је:

Var [IRI] - варијанса IRI са предвиђеном средњом вредношћу IRI
 Var [IRI₀] - варијанса почетне вредности IRI
 Var [SF] - варијанса теренског фактора
 Var [(FC)_T] - варијанса пукотина услед замора у трагу точка
 Var [COV_{RD}] - варијанса коефицијента варијације дубине колотрага
 Var [(TC_L)_T] - варијанса укупне дужине трансферзалних пукотина
 Var [(BC)_T] - варијанса површине блок пукотина
 Var [(LC_{SNWP})_{MH}] - варијанса дужине средњег и високог нивоа заливених пукотина ван трага точка
 Se² = 0.15 (m/km)² - варијанса укупне грешке

Битуменизирани носећи слојеви

$$\begin{aligned} IRI = & IRI_0 + 0.0099947 \cdot (age) + 0.005183 \cdot (FI) + 0.00235 \cdot (FC)_T + \\ & + 18.36 \cdot \left[\frac{1}{(TC_S)_H} \right] + 0.9694 \cdot (P)_H \end{aligned} \quad (6.42)$$

где је:

(TC_S)_H - средње растојање високог нивоа трансферзалних пукотина (m)

$(P)_H$ - површина високог нивоа закрпљености у процентима од укупне површине (%)

Предвиђена вредност за IRI, за асфалтно бетонске коловозе постављене преко битуменом везаних агрегата, са жељеном поузданошћу се одређује помоћу једначине 6.40. Стандардна девијација за једначину 6.40 је изведена из варијансе:

$$\begin{aligned} \text{Var}[IRI] = \text{Var}[IRI_0] + 3.047 \times 10^{-5} \cdot \text{Var}[(FC)_T] + \left[\frac{-33.59}{((TC_S)_H + 1)^2} \right]^2 \cdot \text{Var}[(TC_S)_H] \\ + 0.90802 \cdot \text{Var}[P_H] + S_e^2 \end{aligned} \quad (6.43)$$

где је:

$[(TC_S)_H]$ - варијанса средњег растојања високог нивоа трансферзалних пукотина (m)

$[(P)_H]$ - варијанса површина високог нивоа закрпљености у процентима од укупне површине (%)

Остале променљиве су раније објашњене.

Хемијски стабилизовани носећи слојеви

$$\begin{aligned} IRI = IRI_0 + 0.00732 \cdot (FC)_T + 0.07647 \cdot (SD_{RD}) + 0.0001449 \cdot (TC_L)_T + \\ + 0.00842 \cdot (BC)_T + 0.0002115 \cdot (LC_{NWP})_{MH} \end{aligned} \quad (6.44)$$

Ове променљиве су раније објашњене.

Предвиђена вредност за IRI за асфалтно бетонске коловозе постављене преко хемијски стабилизованих материјала са жељеном поузданошћу се одређује помоћу једначине 6.40. Стандардна девијација за једначину 6.40 је изведена из варијансе:

$$\begin{aligned} \text{Var}[IRI] = \text{Var}[IRI_0] + 5.358 \times 10^{-5} \cdot \text{Var}[(FC)_T] + 5.548 \times 10^{-3} \cdot \text{Var}[SD_{RD}] + \\ + 2.0996 \times 10^{-8} \cdot \text{Var}[(TC_L)_T] + 7.0896 \times 10^{-5} \cdot \text{Var}[(BC)_T] + \\ + 4.473 \times 10^{-8} \cdot \text{Var}[(LC_{NWP})_{MH}] + S_e^2 \end{aligned} \quad (6.45)$$

Све променљиве су раније објашњене.

Средња дубина колотрага је предвиђена механичким принципима током времена потребног за варирање дубине колотрага, који се користи у моделу равности. Овим моделом се предвиђа колотраг:

$$SD_{RD} = 0.665 + 0.2126 \cdot (RD) \quad (6.46)$$

где је:

SD_{RD} - стандардна девијација за дубину колотрага (mm)

RD - средња дубина колотрага (mm)

Поступак одређивања IRI

Када се одреде улазни подаци о оштећењима (блок пукотине, закрпе) онда је веома лако одредити IRI. Кораци су следећи:

1. Предвидети оштећења коловозне конструкције
2. Одредити почетну вредност за IRI и одредити потенцијална оштећења (типична вредност за почетни IRI је распона од 50 до 100 (in/mi), односно од 0.78 до 1.58 (m/km))
3. Предвидети IRI

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Mallela J, H.Von Quintus, L. Titus-Glover, M.E. Ayers, A.E. Eltahan, S.P. Rao, W.O. Tam, *"Introduction to Mechanistic-Empirical Pavement Design"*, Reference Manual, NHI Course 131064, Publication No. NHI-02-048, National Highway Institute, Federal Highway Administration, Washington, D.C., March 2002.
- [2] Barksdale R, *"Laboratory Determination of Resilinet Modulus for Flexible Pavement Design: Final Report"*, NCHRP Web Doc 14, National Cooperative Highway Research Program, Washington, D.C., 1997.
- [3] HRB (1962) *The AASHO Road Test*, Report 5: Pavement Research, Report 6: Special Studies and Report 7: Summary Report., Highway Research Board.
- [4] Huang Y.H. (1993) *Pavement Analisis and Dessign*, Prentice-Hall, Inc, Englewood Cliffs, NY.
- [5] Asphalt Institute (1991) *DAMA (CP-1/1991 Revision) – Pavement Structural Analisis Using Multy-Layered Elastic Theory*, Lexington, KY.
- [6] Leahy, R.B, *Permanent Deformation Characteristics of Asphalt Concrete*, Ph.D. Dissertation, University of Maryland, College Park, 1989.
- [7] Ayers, M. and Witzcak, M. (1998) *"AYMA – A Mechanistic Probabilistic System to Evaluate Flexible Pavement Performance"*, Transpotation Research Board, 77th Annual Meeting, Paper No. 980738, Washington D.C.
- [8] Kaloush, K.E. and Witzcak, M. W. (2000) *"Development of a Permanent to Elastic Strain Ratio Model for Asphalt Mixtures". Development of 2002 Guide for the Design of New and Rehabilitated Pavement Structures*. NCHRP 1-37 A. Inter Team Technical Report. Sept. 2000.
- [9] Tseng K. and Lytton R. (1989) *Prediction of Permanent Deformation in Flexible Pavement Materials*. Implication of Aggregates in the Design, Construction, and Performance in Flexible Pavements, ASTM STP 1016, ASTM, pp. 154-172.
- [10] Asphalt Institute. 1991. *Thickenss Design – Asphalt Pavements for Hihgways and Streets*. Manual Series No.1 (MS-1), Lexington, KY.
- [11] Sharpery R.A, *"A Theory of Crack Growth in Viscoelastic Media"*, ONR Contract No.N00014-68-A-0308-003, Technical Report No.2, MM 2764-73-1, Mechanics and Materials Research Center, texas A&M University, Colledge Station, Texas, March 1973.
- [12] Lytton R.L, Shanmughamm U. and B.D. Garrett, *"Design of Asphalt Pavements for Thermal Fatigue Cracking"*, Research Report No.FHWA/TX-83/06+284-4, Texas A&M University, Colledge Station, Texas, January 1983.

- [13] Molenaar A.A.A, "Fatigue and Reflection Cracking Due to Traffic Loads", Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 53, pp. 440-474, 1984.
- [14] Roque R. and W.G. Buttlar, "Development of a Measurement and Analysis System to Accurately Determine Asphalt Concrete Properties Using the Indirect Tensile Test", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 61, pp. 304-332, 1992.
- [15] Carey W.N. and P.E. Irick, "The Pavement Serviceability-Performance Concept", Highway Research Bulliten 250, Washington, DC: Hoghway Research Board, 1990.
- [16] *ILLI-PAVE PC Version User's Manual*, NCHRP Project 1-26, Transportation Facilities Group, University of Illinois, Urbana-Champaign, IL, 1990.
- [17] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Reconstructed Pavement Structures 1-37A*, Final Report, Part 3. Design Analysis. Chapter 3 Design of New and Reconstructed Flexible Pavements, NCHRP, March 2004.
- [18] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Reconstructed Pavement Structures 1-37A*, Final Report, Part 2. Design Inputs. Chapter 2. Material Characterization, NCHRP, March 2004.
- [19] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Reconstructed Pavement Structures 1-37A*, Final Report, Part 2. Design Inputs. Chapter 4. Traffic, NCHRP, March 2004.
- [20] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Reconstructed Pavement Structures 1-37A*, Final Report, Part 2. Design Inputs. Chapter 3. Environmental Effects, NCHRP, March 2004.
- [21] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Reconstructed Pavement Structures 1-37A*, Final Document, Appendix DD-1. Resilient Modulus as Function of Soil Moisture-Summary of Predictive Models, NCHRP, March 2004.
- [22] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Reconstructed Pavement Structures 1-37A*, Final Report, Part 3. Design Analysis. Chapter 3. Design of New and Reconstructed Flexible Pavements, NCHRP, March 2004.
- [23] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Reconstructed Pavement Structures 1-37A*, Final Document, Appendix CC-1. Correlation of CBR Values with Siol Index Properties, NCHRP, March 2004.
- [24] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Reconstructed Pavement Structures 1-37A*, Final Document, Appendix II-1. Calibration of Fatigue Cracking Models for Flexible Pavements, NCHRP, March 2004.

-
- [25] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Reconstructed Pavement Structures 1-37A*, Final Report, Part 3. Design Analysis. Chapter 1. Drainage, NCHRP, March 2004.
- [26] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Reconstructed Pavement Structures 1-37A*, Final Document, Appendix OO-1. Background and Preliminary Smoothness Prediction Models for Flexible Pavements, NCHRP, March 2004.
- [27] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Reconstructed Pavement Structures 1-37A*, Final Document, Appendix GG-1. Calibration of Permanent Deformation Models for Flexible Pavements, NCHRP, March 2004.
- [28] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Reconstructed Pavement Structures 1-37A*, Final Document, Appendix BB. Design Reliability, NCHRP, March 2004.
- [29] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Reconstructed Pavement Structures 1-37A*, Final Document, Appendix HH. Field Calibration of the Thermal Cracking Model, NCHRP, March 2004.

7

УТИЦАЈИ СРЕДИНЕ НА ФКК

7.1 АНАЛИЗА ФАКТОРА СРЕДИНЕ

7.1.1 УТИЦАЈИ ТЕМПЕРАТУРЕ И ВОДЕ НА ФЛЕКСИБИЛНЕ КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

Под природном средином (environment) подразумевамо простор у коме треба изградити пројектом предвиђену коловозну конструкцију. Фактори којима природна средина делује на коловозну конструкцију доводе до следећих промена у материјалима и међу материјалима од којих је она сачињена:

- мењају се физичкомеханичке карактеристике материјала - чврстоћа на притисак (compressive strength) и затезање (tensile strength)
- мењају се особине хемијских веза у везиву (битумену) и везе између везива и агрегата од кога је сачињена мешавина, као и време физичкохемијске разградње
- мења се запремина као и резултујући унутрашњи напони

Коловозна конструкција, посматрана као физичко тело, прима и емитује топлоту (Фуријеов закон):

$$\frac{dT}{dt} = \left(\frac{\lambda}{c \cdot \rho} \right) \cdot \left[\left(\frac{d^2T}{dx^2} \right) + \left(\frac{d^2T}{dy^2} \right) + \left(\frac{d^2T}{dz^2} \right) \right] \quad (7.1)$$

где је:

T - температура тела - коловозне конструкције [°C]

t - време [сати]

c - специфична топлота тела [J/kg°K]

ρ - густина масе [kg/cm³]

λ - термичка проводљивост тела [W/m°K]

x, y - координате у равни [m]

z - координата управна на раван (x, y) [m]

Због практичних потреба наведена једначина може бити сведена само на вертикални правац и тада је:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\lambda}{c \cdot \rho \cdot \left(\frac{d^2T}{dz^2} \right)} \quad (7.2)$$

односно:

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \cdot \left(\frac{d^2T}{dz^2} \right) \quad (7.3)$$

где је:

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} \quad (7.4)$$

Пошто је промена температуре синусоидна линија, интегралњем претходног израза добија се следећа једначина [4] за вредност температуре на дубини z :

$$T_{zt} = t_M + t_o \cdot e^{\left[-z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\alpha T}} \right]} \cdot \sin \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot t}{T} - z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\alpha T}} \right] \quad (7.5)$$

где је:

T_{zt} - температура на дубини z у тренутку t

t_M - просечна температура на дну или површини или обе, у оквиру интервала од 24 сата [°C]

t_o - разлика између највише и најниже температуре у току 24-сатног интервала [°C]

α - коефицијент продирања [m²/sec]

T - период цикличне промене (86400 секунди у току дана) температуре

За временски период од појаве сунца ($t=0$) до највише тачке сунца на небу ($t=Sh$), заменом у претходном изразу, добија се вредност температуре на коловозу:

$$T_{ot} = t_M + t_o \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot (2 \cdot t - Sh)}{2 \cdot Sh} \right] \quad (7.6)$$

где је:

T_{ot} - температура на површни коловоза у тренутку t

t_M - просечна температура на површини коловоза, у оквиру интервала од 24 сата [°C]

t_o - разлика између највише и најниже температуре у току 24-сатног интервала на површини коловоза [°C]

У постзенитном периоду, од зенитног времена до заласка сунца ($T-Sh = 24$ сата), температура на површини коловоза може бити израчуната из израза:

$$T_{ot} = t_M + t_o \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot (4 \cdot (t + Sn) - Sa)}{2 \cdot Sh} \right] \quad (7.7)$$

где је:

Sn - интервал између заласка и изласка сунца [сати]

Sh - тренутак када је сунце у зениту - највиша тачка на небу [сати]

$Sa = 2[Sh + Sn]$

Оквирне вредности наведених временских параметара су:

- у летњем периоду $Sh = 10$ сати
 $Sn = 7$ сати
 $Sa = 38$ сати
- у зимском периоду $Sh = 8$ сати
 $Sn = 10$ сати
 $Sa = 36$ сати

Због тих вредности су екстремне вредности температуре фазно померене на дубини z :

$$T_{zt} = t_M + t_o \cdot e^{\left[-z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\alpha \cdot S_{zh}}} \right]} \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot (2 \cdot t - Sh)}{2 \cdot Sn} - z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\alpha \cdot S_{zh}}} \right] \quad (7.8)$$

и

$$T_{zt} = t_M + t_o \cdot e^{\left[-z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\alpha \cdot S_{za}}} \right]} \cdot \sin \left[\frac{\pi \cdot (4 \cdot (t + S_n) - S_a)}{2 \cdot S_n} - z \cdot \sqrt{\frac{\pi}{\alpha \cdot S_{za}}} \right] \quad (7.9)$$

У претходна два израза важе следеће једнакости:

$$S_{zh} = z^2 S_n^2 / \alpha \pi u_z^2 \quad (7.10)$$

$$S_{za} = z^2 S_a^2 / \alpha \pi u_z^2 \quad (7.11)$$

$$u_z = (z/2) * (T/\alpha \pi)^{0.5} \quad (7.12)$$

$$t_M = t_A + t_i \quad (7.13)$$

$$t_o = \Delta t_o + t_i \quad (7.14)$$

t_A - температура ваздуха [°C]

t_i - повећање температуре у току осунчавања [°C]

$$t_i = \left(\frac{0.6 \cdot \alpha \cdot I_o}{h} \right) - 3.9$$

Δt_o - промене у температури ваздуха

α - нормална апсорпција (претпоставља се да је једнака 0.65 код преношења топлоте)

h - коефицијент преношења топлоте са честице на честицу (за бетон је приближно 20 W/°K²)

I_o - сунчева константа (приближно једнака 1300 W/m²)

Сви претходни изрази су искоришћени за прављење рачунарског програма ТЕМП1 [4], који даје веома поуздане резултате распростирања температуре у коловозној конструкцији.

Приликом димензионисања флексибилних коловозних конструкција доминирају изрази емпиријског порекла. Неки од таквих су:

- Витцаков образац [5]

$$MPT = 1.07 MAT + 4.53 \quad (7.15)$$

где је:

MPT - температура асфалтног коловоза [°C]

MAT - температура ваздуха [°C]

Пример:

$$\text{Дато: } MAT = 19.5 \text{ } ^\circ\text{C} \gg \gg MPT = 1.07 \times 19.5 + 4.53 = 25.4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

- Томпсонов образац [6]

$$T_{AC} = (0.76 \times Z - 1.7) + (1.18 - 0.017 \times Z) \times MMAT \quad (7.16)$$

где је:

Z - дубина у асфалт бетону [in] (1 in = 2.54 cm)

T_{AC} - температура у асфалт бетону [°F] (°F = (9/5)(°C) + 32)

MMAT - средња месечна температура ваздуха [°F]

Пример:

Дато: $MMAT = 17.5\text{ }^{\circ}\text{C} = (9/5) \times 17.5 + 32 = 63.5\text{ }^{\circ}\text{F}$; $Z = 8\text{ cm} = 8 / 2.54 = 3.14\text{ in}$

>>>

$$>>> T_{AC} = (0.76 \times 3.14 - 1.7) + (1.18 - 0.017 \times 3.14) \times 63.5 = 72.23\text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$>>> T_{AC} = (72.23 - 32) \times 5 / 9 = 22.4\text{ }^{\circ}\text{C}$$

- образац Института за асфалт [7]

$$MMPT = MMAT \times [1 + 1/(Z+4)] - 34/(Z+4) + 6 \quad (7.17)$$

где је:

MMPT - средња месечна температура асфалтног коловоза [$^{\circ}\text{F}$]

($^{\circ}\text{F} = (9/5)(^{\circ}\text{C}) + 32$)

MMAT - средња месечна температура ваздуха [$^{\circ}\text{F}$]

Z - дубина у асфалт бетону [in] (1 in = 2.54 cm)

Пример:

Дато: $MMAT = 17.5\text{ }^{\circ}\text{C} = (9/5) \times 17.5 + 32 = 63.5\text{ }^{\circ}\text{F}$; $Z = 8\text{ cm} = 8 / 2.54 = 3.14\text{ in}$

>>>

$$>>> MMPT = 63.5 \times [1 + 1 / (3.14 + 4)] - [34 / (3.14 + 4)] + 6 = 73.63\text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$>>> MMPT = (73.63 - 32) \times 5 / 9 = 23.13\text{ }^{\circ}\text{C}$$

- Хвенгов образац [8]

$$T_{P1} = T_a \times [1 + 3/(h_1 + 12)] - [102/(h_1 + 12)] + 6 \quad (7.18)$$

$$T_{P2} = T_a \times [1 + 3/(3 \times h_1 + h_2 + 12)] - [102/(3h_1 + h_2 + 12)] + 6 \quad (7.19)$$

где је:

T_{P1} и T_{P2} - температура првог и другог слоја асфалтног коловоза [$^{\circ}\text{F}$]

($^{\circ}\text{F} = (9/5)(^{\circ}\text{C}) + 32$)

T_a - температура ваздуха [$^{\circ}\text{F}$]

h_1 - дебљина застора [in] (1 in = 2.54 cm)

h_2 - дебљина подлоге [in]

Пример:

Дато: $T_a = 17.5\text{ }^{\circ}\text{C} = (9/5) \times 17.5 + 32 = 63.5\text{ }^{\circ}\text{F}$; $h_1 = 8\text{ cm} = 8 / 2.54 = 3.14\text{ in}$

>>>

$$>>> h_2 = 25\text{ cm} = 25 / 2.54 = 9.84\text{ in}$$

$$T_{P1} = 63.5 \times [1 + 3/(3.14 + 12)] - [102/(3.14 + 12)] + 6 = 75.35\text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$T_{P1} = (75.35 - 32) \times 5 / 9 = 24.08\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{P2} = 63.5 \times [1 + 3/(3 \times 3.14 + 9.84 + 12)] - [102/(3 \times 3.14 + 9.84 + 12)] + 6 = 72.33\text{ }^{\circ}\text{F}$$

$$T_{P2} = (72.33 - 32) \times 5 / 9 = 22.4\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Сваки од наведених израза се користи на одређени начин у неколиким

поступцима за димензионисање.

На продирање температуре кроз коловозну конструкцију утичу следеће карактеристике материјала од којих је она сачињена:

- специфични топлотни капацитет по јединици запремине и термичка проводљивост за различите слојеве конструкције
- коефицијент сунчеве рефлексије од површине застора
- ниво посматране тачке у коловозу и величина временског интервала
- температура на дну везаних слојева
- почетна температура застора и постелјице

У следећим табелама (табела 7.1 и табела 7.3) наведене су термичке особине асфалт бетона и неке карактеристичне вредности појединих материјала, док су у табели 7.2 приказане оријентационе вредности капацитета загревања по јединици запремине:

У табели 7.1, у четвртој колони, дописане су примедбе које се тичу температура при којима су обављана испитивања асфалт бетона.

Табела 7.1. Термичке особине асфалт бетона

К [W/m°C]	α [m ² /s]	ρ^*c [J/m ³ °C]	Примедбе
1.454	-	1.44 x 10 ⁶	-
2.88	14.4 x 10 ⁻⁷	2.00 x 10 ⁶	18 °C, сув
2.28	11.5 x 10 ⁻⁷	1.97 x 10 ⁶	38 °C, сув
1.21	5.75 x 10 ⁻⁷	-	из Института за асфалт
0.74 - 0.76	-	-	20 °C – 56 °C
0.167 - 0.172	-	-	чист битумен 20 °C – 80 °C
0.65 - 0.75	-	-	асфалтна мешавина употребљена на улици
1.37 - 1.75	7.8 x 10 ⁻⁷	C = 879-963	-
		C = 879	100 °C
1.21	-	C = 920	-
1.2	5.9 x 10 ⁻⁷	2.07 x 10 ⁶	80 °C – 149 °C
		C = 921	
1.5	-	-	-
0.85 - 2.32	-	-	-
0.14 - 0.17	-	C = 1852 - 2561	битумен без парафина 0 °C – 300 °C

К [W/m°C] – топлотна проводљивост слојева

с [J/kg°C] – специфични топлотни капацитет

ρ [kg/m³] – густина

α [m²/s] = К/(ρ с) – коефицијент распрострањања

Топлотна проводљивост слојева од неvezаног агрегата (unbound aggregate) (они се налазе испод битуменом везаних слојева) може бити одређена на основу емпиријске једначине коју је дао Керстен:

- за прашинасте и глиновите незаmrзнуте материјале

$$K = 0.144 \times (0.9 \times \log(\text{количина влажности}) - 0.2) \times 10^{0.000625d} \text{ [W/m}^\circ\text{C]} \quad (7.20)$$

- за незаmrзнут песак

$$K = 0.144 \times (0.7 \times \log(\text{количина влажности}) + 0.4) \times 10^{0.000625d} \text{ [W/m}^\circ\text{C]} \quad (7.21)$$

где је влажност изражена у процентима од масе сувог земљаног материјала, а “d” је сува густина у kg/m^3 .

Табела 7.2. Оријентационе вредности капацитета загревања и термичке проводљивости

Слој у коловојној конструкцији	Капацитет загревања по јединици запремине	Густина слоја	Процента по маси појединих саставних елемената			Специфични топлотни капацитет појединих саставних елемената			Термичка проводљивост
			VI	Ve	Ag	VI	Ve	Ag	
			[MJ/m ³ °C]	[Mg/m ³]				[kJ/kg°С]	
Застор (хабајући и везни слој)	1.93	2.40		6.4	9.36		1.75	0.76	2.28
Горња подлога од битуменом везаног шљунка	1.95	2.40		5.4	94.6		1.75	0.76	1.79
Доња подлога -тампон од шљунковито материјала	2.30	2.29	7		93	4.19		0.76	2.47
Глиновита постељица	2.83	2.25	1.45		85.5	4.19		0.76	2.08

За доњу подлогу, топлотна проводљивост може бити одређена из израчунатих вредности за песак и глину.

Топлотну проводљивост битуменом везаних материјала можемо израчунати за одређену дневну амплитуду синусоидне промене просечних дневних температура (последња колона у табели 7.2).

Установљено је да се вредност коефицијента рефлексије сунчеве радијације

са површине коловоза налази између 0.06 и 0.07.

Температуру у коловозној конструкцији, у најчешћем броју случајева, региструјемо на сваких 10 mm и на 1 m од површине коловоза у интервалима од 1 сата.

Установљено је да температура у тлу на 1 m дубине у току зимског периода варира од 7 °C до 11 °C.

Температурни утицај на битуменом везане материјале је манифестован преко промене модула крутости (stiffness modulus), односно носивости.

На цементном везане материјале, температурни утицај је исказан преко појаве "термичких напона".

Дилатирање асфалтног застора је веома мало и креће се приближно око $\alpha = 2.3 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$.

Али, при оштрим зимама, када су температуре ниже од -15 °C, може доћи до појаве термичких напона и у флексибилним коловозним конструкцијама. Максимални напон на затезање је од 50 до 100 kPa.

У табели 7.3 приказане су неке оријентационе вредности термичких особина агрегатног материјала.

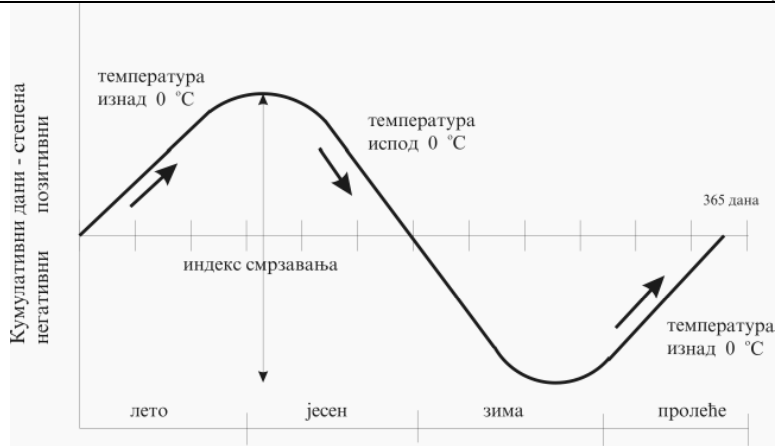
7.1.2 ПРОДИРАЊЕ МРАЗА КРОЗ КОЛОВОЗНУ КОНСТРУКЦИЈУ

Мраз делује не коловозну конструкцију на два начина. Током смрзавања, од воде која је продрла у коловозну конструкцију формирају се кристали леда. Услед тога се повећава запремина и издиже коловозни застор. Током отопљавања, лед се топи смањујући запремину и повећавајући влажност. Тиме бивају изазване трајне деформације коловозне конструкције и њен лом.

Мржњење тла зависи од трајања ниских температура. Температура и дужина њеног трајања изражена је у дан-степенима. Један дан-степен приказан је једним даном са средњом температуром ваздуха од 1 °C испод температуре мржњења. Јединица је прилично неодређена јер, 10 дана-степен може бити 10 дана са температуром ваздуха од -1 °C, а може бити и 1 дан са температуром од -10 °C.

Табела 7.3. Термичке особине агрегата

Агрегат	К [W/m°C]	α [m ² /s]	с [J/kg°C]
Калцит 0 °C 200 °C			790 1000
Доломит 60 °C			930
Кварц 0 °C 200 °C			698 969
Кречњак 58 °C Кречњак, ср. вредност од 3 °C до 50 °C			1000 680
Кречњак, ср. вредност од 10 °C до 65 °C			830
Кварцит 0 °C 200 °C			700 970
Гранит 0 °C 200 °C			650 950
Базалт 0 °C 200 °C			850 1040
Пешчар 59 °C			930
Дијабаз 0 °C 200 °C			700 870
Шкриљац 0 °C 200 °C			710 1000
Просечна вредност за песак и шљунак	1.82		
Калцит 100 °C	2.86		
Кварц 100 °C	6.45		
Гранит 100 °C	2.37		
Базалт	1.82 – 2.2		
Компактан кречњак	2.0 – 3.4		
Порозни кречњак	1.1 – 2.2		
Шкриљац 100 °C	1.8		
Доломит 100 °C	3.99		
Кварцит 100 °C	5.2		
Гранит - гнајс	1.8 – 2.8		
Гранит - шкриљац	2.7		
Тврди пешчар	2.6 – 4.5		



Слика 7.1. Одређивање индекса мрза

На основу очитавања разлике између максимума и минимума на дијаграму дана-степени (слика 7.1), може бити одређен индекс смрзавања. Дубина дејства мрза може бити изражена и преко Олдричове формуле [9], која гласи:

$$Z = L \cdot \sqrt{\frac{(1000 \cdot k \cdot F)}{L}} \quad (7.22)$$

где је:

Z - дубина дејства мрза у униформној средини [cm]

k - топлотна проводљивост [W/cm °C]

F - индекс смрзавања [дан - степен]

L - латентна запреминска топлота

То је количина топлоте која се ослобађа при замрзавању јединице запремине тла [J/cm³] и одређујемо је помоћу израза:

$$L = 3335.25 \times W \times \gamma_d$$

W - природна влажност [%]

γ_d - јединична маса тла [kg/m³]

Λ - корекциони коефицијент (слика 7.2)

Корекциони коефицијент израчунавамо помоћу формула и дијаграма на слици 7.2:

$$L = \frac{(V_o \cdot t)}{F} \quad (7.23)$$

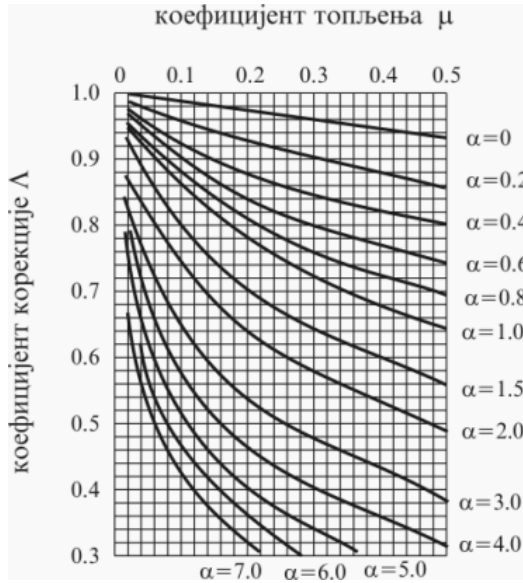
$$\mu = \frac{(C \cdot F)}{(L \cdot t)} \quad (7.24)$$

где је:

V_0 - разлика између средње годишње температуре и тачке смрзавања тла
[°C]

t - трајање мрза [дан]

C - запреминска топлота [J/cm³ °C]



Слика 7.2. Корекциони коефицијенти за Олдричову формулу

Корекционим коефицијентом се коловозна конструкција апроксимира у једнолику средину, што она у суштини није, јер је вишеслојна и од различитих материјала. Затим, уз већ познате дебљине слојева и њихове термичке карактеристике, одређујемо латентне запреминске топлоте по слојевима, као и однос L/K из израза:

$$L/K = (2 / Z^2) \times [(h_1 / k_1) \times (0.5 \times L_1 \times h_1 + SL_1 h_1) + (h_2 / k_2) \times (0.5 \times L_2 \times h_2 + SL_2 h_2) + \dots + (h_n / k_n) \times (0.5 \times L_n \times h_n)] \quad (7.25)$$

h_i - дебљине слојева у коловозној конструкцији [cm]

Ломови коловозне конструкције настају услед дејстава замора (последица саобраћајног оптерећења, понављања температурних циклуса), дејства ледених сочива у коловозној конструкцији, рефлектовања пукотина испод коловозне конструкције и услед деловања ниских температура.

Термичким дејством изазвани ломови у флексибилној коловозној конструкцији су проблем, како у климатским подручјима са ниским температурама, тако и у климатским зонама где је велико варирање дневних температура.

Два различита типа термички изазваних ломова су занимљива за посматрање:

- ломови који су настали услед термичког замора материјала од којих је сачињена коловозна конструкција,
- ломови као последица ниских температура.

Наиме, температурним дејством изазвани напони у коловозној конструкцији су током дана углавном испод чврстоће употребљених материјала, те стога нема последица по коловоз. Међутим, долази до појаве заосталих напона. Акумулисањем тих заосталих напона изазваних дневним температурама и после довољно дугог временског периода може доћи до појаве лома у конструкцији. Тај процес називамо термичким замором материјала.

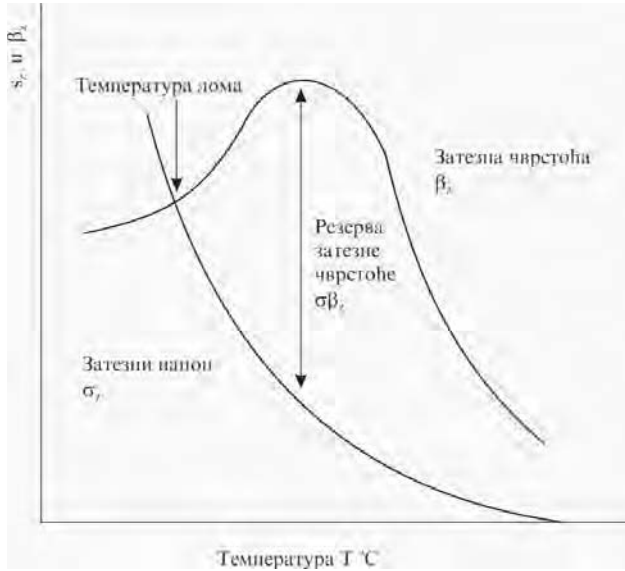
Услед дејства ниских температура, термички напони бивају изједначени са чврстоћом при затезању материјала од којих је коловоз сачињен. На тај начин долази до кидања веза у битумену и веза битумена и агрегата - лома конструкције.

Упркос чињеници да истраживања деловања ниских температура на флексибилне коловозне конструкције трају више од пола века, садашња знања су недовољна да би тај проблем могао бити контролисан. Употреба досад познатих особености проблема и процедура испитивања, не пружају адекватну могућност спречавања ломова флексибилних коловоза при ниским температурама.

Кад се температура снизи, сви материјали се скупе. Кад су померања посматраних материјала спречена, што је случај у коловозним конструкцијама, пад температуре узрокује развијање термичких напона. Ако се скупљање јавља на довољно високој температури, термички напон у асфалту, будући да је асфалт по природи вискоеластичан, може се растерити релаксацијом. На ниским температурама капацитет релаксације је ограничен и делимичан остатак термичких напона је неминован. Са даљим опадањем температуре, термички напони расту. На одређеној температури, температури лома, термички напони (thermal stress) се изједначе са чврстоћом при затезању (tensile strength) материјала и долази до појаве лома на површини коловоза. Тада се пукотине проширују по целој дебљини коловозне конструкције, као последица термичких циклуса.

Температура лома је графички приказана на слици 7.3. Чврстоћа при затезању асфалтне мешавине, као функција температуре може бити експериментално одређена у лабораторији, употребом како директног тако и индиректног опита на затезање (Винсон 1989). Веза термичког напона показана на слици 7.3 може бити приказана експериментално и теоријски, употребом поступка који су описали Хилс и Брин 1966. Утврђивање је базирано, поред осталог, на одређивању чврстоће везива помоћу Ван дер Поеловог номографа и чврстоће одговарајуће мешавине, употребом релације коју су прописали Хукелом и Кломп 1964. Један каснији предуслов теоријском поступку додали су Хилс и Брин са сазнањем о термичком

контракционом коефицијенту. Обадве линије су приказане на слици 7.3. Тај концепт може бити сматран као мера капацитета асфалтног коловоза да издржи напоне изазване саобраћајем на температури лома.



Слика 7.3. Одређивање чврстоће при затезању у зависности од температуре

7.1.3 ФАКТОРИ КОЈИ УТИЧУ НА ЛОМОВЕ КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ ПРИ НИСКИМ ТЕМПЕРАТУРАМА

Током година, велики број ефеката различитог типа је уочен приликом посматрања понашања флексибилних коловоза при ниским температурама. У табели 7.4 приказана је комбинација фактора и значајност утицаја ниских температура на сваки од фактора.

Примера ради, истраживањима рађеним на Краљевском Институту за Технологију (Шведска) и Орегонском Државном Универзитету (САД), посебна пажња је посвећена деловању материјала једног на други у коловозној конструкцији.

Установљено је да се асфалтне мешавине (asphalt mixtures) са побољшаним карактеристикама битумена (додавани су полимери), боље понашају на ниским температурама од асфалтних мешавина са битуменима без додатака. То се нарочито примећује код старијих мешавина. Код њих, полимери одређеног типа могу да сниже температуру лома, иако се по природи ствари старија мешавина лакше ломи.

Сем тога, установљено је да највећи утицај на температуру лома има степен старости мешавине. Код старијих мешавина температура лома је виша него код млађих асфалтних мешавина.

Табела 7.4. Утицајни фактори на ломове при ниским температурама

Фактори	Утицаји
1. Материјал <ul style="list-style-type: none"> Асфалтно везиво - битумен (нпр. густина, вискозитет и пенетрација) Температурна остељивост Врста агрегата (нпр. оштроивичност, површинска текстура и порозност) Асфалтна мешавина Садржај везива Гранулација агрегата Садржај филера Садржај порног ваздуха Својства асфалтне мешавине Чврстоћа на притисак Чврстоћа на затезање Коефицијент термичке контракције Додаци везиву (нпр. полимери) 	 врло висок врло висока низак до незнатан низак низак (свеж агрегат) висок (стар агрегат) виши садржај везива, виши напони при затезању низак (свеж агрегат) висок (стар агрегат) врло висок низак висок средњи
2. Утицаји околине <ul style="list-style-type: none"> Температура Степен хлађења Старост коловоза 	 врло висок висок врло висок
3. Утицаји коловозне конструкције <ul style="list-style-type: none"> Ширина коловозне конструкције Дебљина коловозне конструкције Коефицијент трења између асфалтног слоја и слоја од невезаног агрегата Постељница 	 непозната средњи до висок средњи низак
4. Остали фактори <ul style="list-style-type: none"> Конструкциони ефекти (нпр. пукотине) Утицај саобраћаја 	 непознат непознат

Значајан утицај на температуру лома има и тип мешавине. Коришћене су: ситнозрна мешавина (АБТ), порозна мешавина (АБД) и камено пунило (АБЦ). Употребљено је пет типова полимера (SBS1, APP, EVA, Styrelf и SBS2) за побољшање битумена, као и битумени из Русије, Венецуеле, Кувајта и Мексика.

На слици 7.4 су приказане вредности температуре на границама слојева у различитим временским интервалима и у различитим годишњим добима.

Коловозни застор је направљен од асфалт бетона дебљине 7 см, битуменског носећег слоја од 25 см, суво везаног макадама од 20 см и слоја од неvezаног агрегата (песка и шљунка) дебљине 20 см.

Посматрано је кретање температурних промена кроз битуменом везане слојеве, застор и носећу подлогу, у неколико сатних интервала.

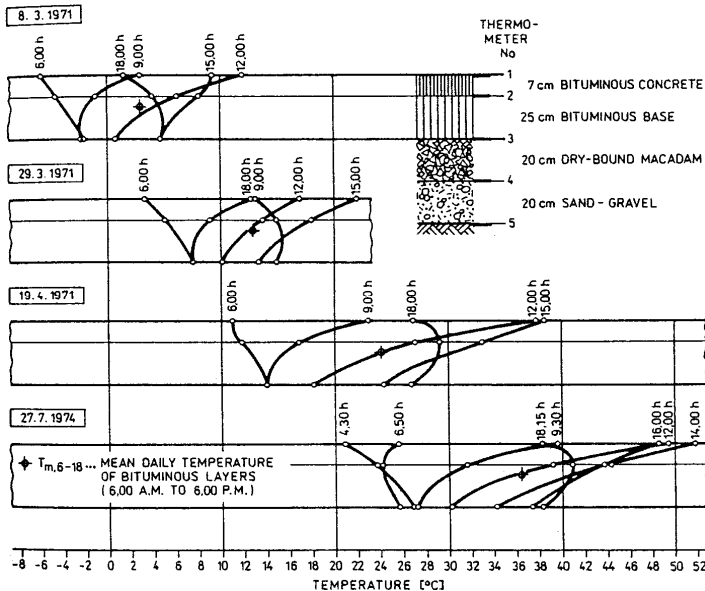
У доба раста температуре, у марту и априлу месецу, мерена је температура у 6⁰⁰, 9⁰⁰, 12⁰⁰, 15⁰⁰ и 18⁰⁰ сати.

У јутарњем термину, као што се види на слици 7.4, разлика на границама слојева је 2 до 4 степена. Међутим, нагла промена је уочена у 9⁰⁰ када долази до наглог загревања ваздуха, а самим тим и површинског слоја. Таква крива линија може бити објашњена проводљивим карактеристикама везивног материјала. У 18⁰⁰, крива је последица хлађења од површине ка дубини. Током дана, када је температура стабилизована, температурна разлика износи 6 до 8 степени.

У априлу, током дана, разлика међу слојевима износи око 20 степени. Приближно иста разлика је и током летњег месеца, јула. Разлика је у јутарњем периоду када је загревање у ранијим јутарњим сатима.

Промене дневне температуре битуменом везаних слојева одговарају њиховој средњој дневној температури у периоду од 6⁰⁰ до 18⁰⁰.

Ефекат промена температуре у битуменом везаним слојевима се репрезентује у променама њихових физичко-механичких особина.



Слика 7.4. Линије промене температуре у асфалтним слојевима

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Александар Цветановић, *КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ*, Научна књига, Београд 1992.
- [2] I. Gschwend and I. Poliaciek, *PAVEMENT DESIGN OPTIMIZATION BY AN ANALYTICAL METHOD*, Mechanical Tests for Bituminous Materials, A.A. BALKEMA / ROTTERDAM / BROOKFIELD / 1997
- [3] Ulf Isacsson, Ted S.Vinson, Huayang Zeng, *The influence of material factors on the low temperature cracking asphalt*, FIFTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE STRUCTURAL DESIGN OF ASPHALT PAVEMENTS, The University of Michigan and The Delft University of Technology 1982.
- [4] Faraggi V., Jofre C. and Kraemer, *Combined Effect of Traffic Loads and Thermal Gradients on Concrete Pavement Design*, Transportation Research Record, TRR 1136, Washington, 1987.
- [5] Witzcak M., *Design of Full-Depth Airfield Pavements*, Proceedings, Third International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements, Ann-Arbor, MI, 1972, pp. 552-553
- [6] Thompson M., Dempsey B., Hill H. and Vogel J., *Characterizing Temperature Effects for Pavement Analysis and Design*, Transportation Research Record, TRR 1121, Washington, 1987.
- [7] Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual (MS-1) Ninth Edition, Research Report 82-2. The Asphalt Institute, College Park, Md, 1982.
- [8] Hwang D. and Witzcak M., *Program DAMA: User's Manual*, University of Maryland, College Park, 1979.
- [9] Aldrich H., *Frost Penetration Below Highway and Airfield Pavements*, HRB 135/1956.

8

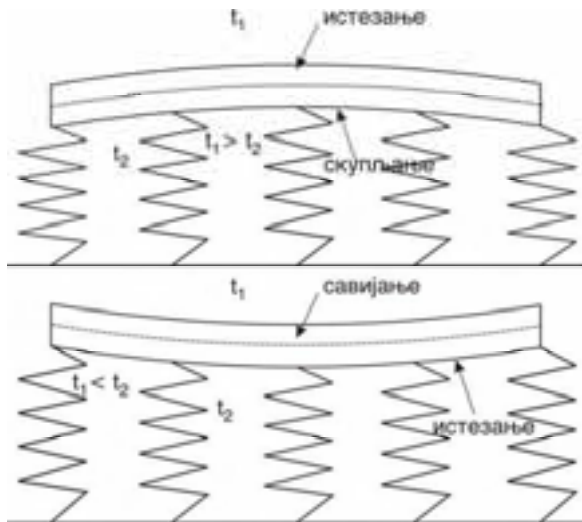
НАПОНИ И ДЕФОРМАЦИЈЕ У КРУТИМ КОЛОВОЗНИМ КОНСТРУКЦИЈАМА

8.1 НАПОНИ И ДЕФОРМАЦИЈЕ У КРУТИМ КОЛОВОЗНИМ КОНСТРУКЦИЈАМА

8.1.1 НАПОНИ УСЛЕД САВИЈАЊА

Током дана, кад је температура на горњој површини плоче већа него на доњој, горња половина плоче се издужује у односу на неутралну осу, док се доња половина скраћује. Међутим, тежина плоче се супротставља овим последицама деловања температуре и због тога долази до појаве напона притиска изнад неутралне осе у плочи, а затезања испод неутралне осе. Током ноћи, кад је температуре нижа на врху плоче него на дну, горњи део плоче тежи да се скрати, а доњи издужи. Сопствена тежина плоче делује и у овом случају и изазива напоне затезања изнад, а притиска испод неутралне осе.

Друго објашњење напона савијања је приказано помоћу теорије коју је развио Винклер (Winkler) - плоча на еластичној подлози. Овакву подлогу чини серија опруга које су прикачене за плочу, као на слици 8.1



Слика 8.1 Модели плоче на Винклеровој подлози

Када је температура на врху плоче већа од оне на дну, влакна изнад неутралне осе се издужеју и плоча се савија на доле. Опруге на крајевима се сабијају (притискају) и гурају плочу навише, а у средини плоче издужеју (затезу) и вуку плочу на доле. Резултат тога је излагање горњег дела плоче напону затезања, а доњег дела напону притиска. Када је температура на врху плоче нижа него на дну, плоча се савија на горе. Тада, спољне опруге вуку плочу на доле, а унутрашње гурају плочу на горе. Услед тога се јављају напони који притискају горњи део плоче, а затезу доњи део плоче. Вестрегард (Westergaard)[1] је 1926. године развио веома сложен систем једначина за израчунавање напона савијања у цемент бетонским коловозима, заснованим на теорији плоче.

8.1.2 ОСЛАЊАЊЕ НЕОГРАНИЧЕНЕ ПЛОЧЕ

Разлика између штапа и плоче је у томе што је штап изложен напрезању само у једном смеру, а плоче у два. За напоне у два смера, дилатација ε_x , у x смеру, је одређена на основу Хуковог закона:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_y}{E} \quad (8.1)$$

где је:

E - модул еластичности бетона

Из овог израза се може закључити да је дилатација у x смеру настала услед деловања напона у x смеру и напона у y смеру. Слично томе, дилатација у y смеру је последица деловања напона у y смеру и напона у x смеру.

$$\varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \nu \cdot \frac{\sigma_x}{E} \quad (8.2)$$

Кад је плоча ослоњена у x смеру, ε_y треба да буде једнака 0, јер је плоча толико широка да никаква дилатација не може да се јави, осим у непосредној близини ивице. Када је:

$$\sigma_y = \nu \cdot \sigma_x \quad (8.3)$$

и заменом у једначини 8.1, а решавањем по σ_x , је:

$$\sigma_x = \frac{E \cdot \varepsilon_x}{1 - \nu^2} \quad (8.4)$$

Једначине 8.3 и 8.4 указују да су напони у смеру ослањања ортогонални.

Када се плоча ослања у оба смера, као што је то случај код савијања услед деловања температуре, напони из оба смера морају бити урачунати у тотални напон. Максимални напон, код плоче слободних димензија, услед савијања од температурног дејства може бити објашњен претпоставком да је дилатирање целе плоче, у оба смера x и y , потпуно ограничено (спречено).

Нека је Δt разлика у температури измђу врха и дна плоче и α_t коефицијент термичког ширења бетона ($7 \cdot 10^{-6}$ cm/cm/°C). Ако се плоча слободно помера и ако је температура на врху плоче већа него на дну, врх плоче ће бити изложен термичкој дилатацији издужења, а дно скупљања (слика 8.2).



Слика 8.2 Температурни градијент у бетонској плочи

Ако је плочи спречено померање, дилатација притиска ће се јавити на врху, а затезања на дну. Максимална дилатација износи:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \frac{\alpha_t \cdot \Delta t}{2} \quad (8.5)$$

Из једначине 8.4, напон у x смеру услед ослањања у x смеру је:

$$\sigma_x = \frac{E \cdot \alpha_t \cdot \Delta t}{2 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (8.6)$$

$$\sigma_y = \frac{E \cdot \alpha_t \cdot \Delta t}{2 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (8.6a)$$

Једначина 8.6 је напон, а према аналогiji, и једначина 8.6a је напон у y смеру због ослањања у y смеру. Према једначини 8.3, напон у x смеру услед ослањања у y смеру је:

$$\sigma_x = \frac{\nu \cdot E \cdot \alpha_t \cdot \Delta t}{2 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (8.7)$$

Тотални напон је збир ова два напона из једначина 8.6 и 8.7:

$$\sigma_x = \frac{E \cdot \alpha_t \cdot \Delta t}{2 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot (1 + \nu) = \frac{E \cdot \alpha_t \cdot \Delta t}{2 \cdot (1 - \nu)} \quad (8.8)$$

Ова анализа је заснована на претпоставци да је расподела температуре линеарна кроз целу дебљину плоче. Ово је апроксимација, зато што стварна расподела температуре није линеарна, што је доказано и теренским мерењима 1987. године у Илиноису (Топмсон и др.) (Thompson et al.) [2] и на Флориди (Ричардсон и Армагани) (Richardson and Armaghani) [3]. Нумеричке поступке је развио Харик са сарадницима (1994) [4] за израчунавање ефеката нелинеарног градијента на напоне савијања. Затворенију форму су представили Мохамед и Хансен (1997) [5].

8.1.3 НАПОНИ САВИЈАЊА У ПЛОЧАМА СЛОБОДНИХ ДИМЕНЗИЈА

Код плоче унутар слободних спољних димензија, L_x у x смеру и L_y у y смеру, тотални напон у x смеру је:

$$\sigma_x = \frac{C_x \cdot E \cdot \alpha_t \cdot \Delta t}{2 \cdot (1 - \nu^2)} + \frac{C_y \cdot \nu \cdot E \cdot \alpha_t \cdot \Delta t}{2 \cdot (1 - \nu^2)} = \frac{E \cdot \alpha_t \cdot \Delta t}{2 \cdot (1 - \nu)} \cdot (C_x + \nu \cdot C_y) \quad (8.9)$$

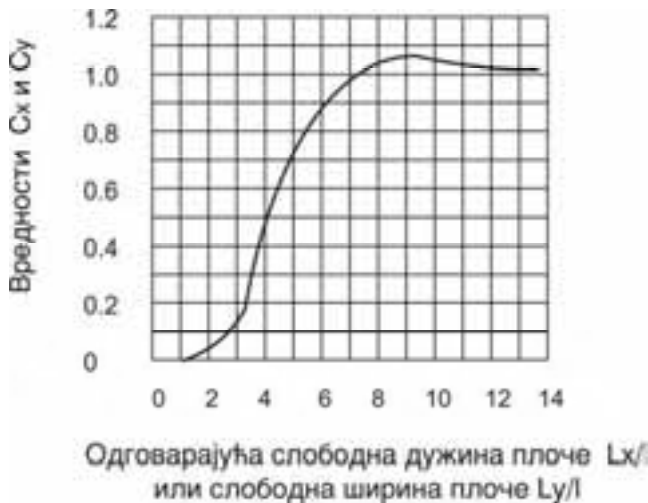
где су C_x и C_y фактори корекције плоче. У y смеру је:

$$\sigma_y = \frac{E \cdot \alpha_t \cdot \Delta t}{2 \cdot (1 - \nu)} \cdot (C_y + \nu \cdot C_x) \quad (8.10)$$

а на ивици плоче је:

$$\sigma = \frac{E \cdot \alpha_t \cdot \Delta t}{2} \cdot C \quad (8.11)$$

Бредбери (Bredbury)[6] је развио једноставан дијаграм за одређивање корекционих фактора C_x и C_y , слика 8.3.



Слика 8.3 Корекциони фактори за напоне код плоча ограничених димензија

Корекциони фактори зависе од односа слободних димензија плоче (L_x , L_y) и радијуса релативне крутости (l) који износи:

$$l = \sqrt[4]{\frac{E \cdot (h^3)}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot k}} \quad (8.12)$$

где је:

E - модул еластичности бетона [N/m^2]

h - дебљина плоче [m]

ν - Поасонов коефицијент

k - модул реакције подлоге [N/m^3]

l - радијус релативине крутости [m]

C , C_x , C_y - коефицијенти који се одређују са слике 8.3

Са слике 8.3 се може видети да корекциони фактор C расте са повећањем односа L/l до вредности $C=1.0$ за $L=6.7 \times l$. За $L=8.5 \times l$ достиже максималну вредност $C=1.084$, а затим опада до $C=1$ са повећањем односа L/l . То што коефицијент C може имати вредност већу од јединице, може бити објашњено чињеницом да код плоча дужих од $6.7 \times l$, реакција подлоге више извија плочу него деловање температуре.

8.1.4 ТЕМПЕРАТУРНА РАЗЛИКА

Напони савијања варирају услед температурних разлика између врха и дна плоче. Ако није мерењима друкчије доказано, разумно је очекивати максимални температурни градијент од 0.055 до 0.077 °C/mm током дана и око половине ове вредности током ноћи.

Испитивања су показала да је максимална температурна разлика између горње и доње површине плоче током априла и маја, када је највећи број савијања током године (Телер и Сатерланд)[7].

Током 1962. године (AASHO Road Test)(Highway Research Board), температуре су мерене у плочи дебелој 165 mm. Разлика у температури измереној у тачки 6.4 mm испод горње површине плоче и 12.7 mm изнад доње површине је сматрана стандардном температурном разликом. Максимална стандардна температурна разлика током месеца јуна и јула је била око 10.2 °C, када се плоча савијала на доле и -4.9 °C, када се плоча савијала на горе. Ове вредности одговарају температурном градијенту од 0.07 °C/mm и 0.03 °C/mm. Мерења су показала да температурна разлика није пропорционална дебљини плоче; пре се промени дебљина плоче, а знатно спорије температурна разлика за одговарајућу дебљину плоче. Већи температурни градијенти се употребљавају код тањих плоча.

8.1.5 КОМБИНОВАНИ НАПОНИ

Напони услед савијања могу бити доста велики и изазвати ломове плоча ако се комбинују са напонима услед оптерећења. Ипак, није уобичајено да се они анализирају приликом одређивања дебљине плоче и то из више разлога:

1. Спојнице и арматура (можданици) се користе да приме напоне савијања. Напони услед савијања се смањују (нестају) приликом пуцања бетона. Такве пукотине не ремете носивост коловозне конструкције докле год постоји пренос оптерећења кроз пукотине.
2. Кад се користи принцип замора за димензионисање, није практично комбиновати напоне од оптерећења и напоне услед савијања. Коловоз може бити изложен милионима понављања оптерећења током пројектног периода, али број услед савијања је ограничен.

3. Напони услед савијања се додају или одузимају напонима од оптерећења ради приказивања комбинованих напона. Ако је за димензионисање меродаван ивични напон, напон услед савијања се додаје током дана, али одузима од напона од оптерећења током ноћи. Услед ових компензативних ефеката и чињенице да је велики број тешких камиона у ноћном саобраћају, можда не би било критично игнорисати напоне услед савијања.

Да ли напоне услед савијања треба разматрати током димензионисања - врло је контроверзно. Асоцијација за Портланд цемент не разматра напоне услед савијања при анализирању замора, али многе друге институције кажу да их треба анализирати. Најсвежија искуства су показала да су пукотине које настају у дужим плочама последица напона услед савијања (краће плоче имају много мање напоне услед савијања). Током ААШО опита, на неоптерећеним деоницама није било никаквих пукотина. Међутим, када је деоница измерена после 16 година, на плочама дугим 12.2 m су биле пукотине, али не и на плочама дугим 4.6 m (Дартер и Баренберг)(Darter and Barenberg)[8].

Приликом димензионисања бетонског коловоза са спојницама, који неће бити одржаван, Дартер и Баренберг су предложили сабирање напона услед савијања и напоне услед оптерећења приликом анализе замора. Ово је неопходно, јер збирни напон комбинације напона услед савијања и напона од оптерећења је толико велики, да може изазвати пуцање плоче чак и после неколико понављања оптерећења. Пукотине у плочама захтевају прописано одржавање, те је стога концепт без одржавања изгубио смисао. Ако су напони услед савијања толико важни, разумније је анализирати оштећења услед замора појединачно; прво од оптерећења, а затим од савијања, а потом, њихову комбинацију.

Градијент влаге у цемент бетонским плочама изазива напоне услед извијања. Одређивање градијента влаге је тешко јер зависи од више фактора. Неки од тих су релативна влажност, слободна вода у бетону, садржај влаге у подлози и постељици. Влажност на површини плоче је нижа него на дну плоче. Услед тога је доњи део плоче у зони притиска, што се компензује са напонима затезања које изазива оптерећење на ивицама плоче. Осим тога, ефекат влаге је сезонског карактера и остаје непромењен дуже време, што изазива врло мале напоне растерећења и врло мала оштећења услед замора. Због тога се напони извијања, настали као последица градијента влаге, не разматрају приликом димензионисања цемент бетонских коловоза.

8.2 НАПОНИ И ДЕФЛЕКСИЈЕ УСЛЕД ОПТЕРЕЋЕЊА

Постоје три метода за одређивање напона и дефлексија у цемент бетонским коловозима:

- помоћу једначина

- помоћу утицајних дијаграма
- помоћу рачунарског програма базираном на методу коначних елемената

Оригиначне једначине је развио Вестергард (Westergaard) и оне се примењују за оптерећење од једног точка преко кружне, полукружне, елиптичне и полуелиптичне контактне површине.

Утицајни дијаграми, које су развили Пикет и Реј (Pickett and Ray)[9], могу бити примењени на оптерећења која праве различите комбинације тачкова. Оба ова поступка се односе на велике плоче које се налазе на еластичној подлози. Ако су, пак, оптерећења на плочама повезаним можданицима, које се налазе на еластичној подлози или чврстом тлу, треба користити метод коначних елемената. Еластична подлога се приказује помоћу система еластичних независних опруга. Дефлексија у било којој тачки је пропорционална сили у тој тачки и силама у осталим тачкама. Ова претпоставка је нереална и не представља понашање тла. Али због своје једноставности, употребио ју је Вестергард у својој анализи.

8.2.1 ЈЕДНАЧИНЕ ЗА ОДРЕЂИВАЊЕ НАПОНА И ДЕФЛЕКСИЈА

Ове једначине се примењују само код анализе великих плоча на које делује оптерећење од једног точка у углу, средини и дуж ивице плоче.

Угаоно оптерећење

Ако је оптерећење концентрисано у углу плоче (слика 8.4а), тада је једначина 8.13 тачно решење јер, у попречном пресеку у близини оптерећења, кад је $x \approx 0$, реакција подлоге је веома мала и може се занемарити.

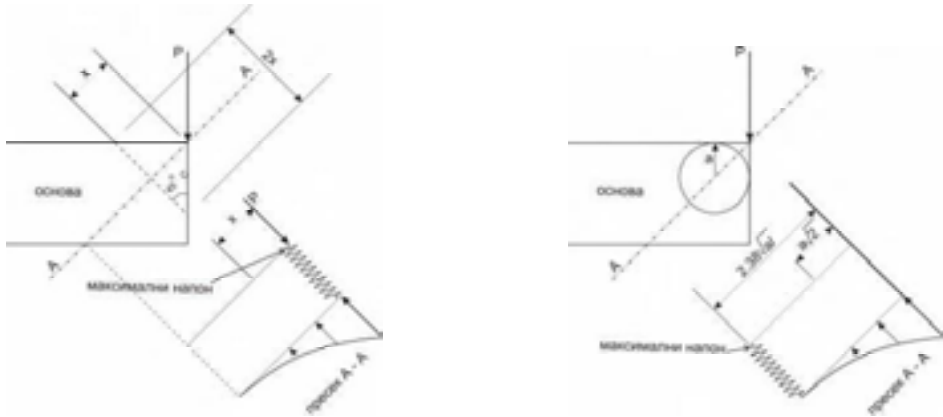
$$\sigma_c = \frac{P \cdot x}{\frac{1}{6} \cdot (2 \cdot x) \cdot (h)^2} = \frac{3 \cdot P}{h^2} \quad (8.13)$$

где је:

P - концентрисана сила [N]

h - дебљина плоче [m]

σ_c - напон у углу плоче [Pa]



Слика 8.4 а) Концентрисано оптерећење у углу плоче
 б) Кружно оптерећење у близини угла плоче

Кад је, пак, кружно оптерећење концентрисано у близини угла плоче (слика 8.4б), подручје максималног напона није близу угла плоче и укупна реакција подлоге је врло велика и не може бити занемарена. Вестергард [10] је применио метод узастопних апроксимација и добио једначину:

$$\sigma_c = \frac{3 \cdot P}{h^2} \cdot \left[1 - \left(\frac{a \cdot \sqrt{2}}{l} \right)^{0.6} \right] \quad (8.14)$$

и

$$\Delta_c = \frac{P}{k \cdot (l)^2} \cdot \left[1.1 - 0.88 \cdot \left(\frac{a \cdot \sqrt{2}}{l} \right) \right] \quad (8.15)$$

где је:

- Δ_c - дефлексија у углу плоче [m]
- l - радијус релативне крутости [m]
- a - контактни радијус [m]
- h - дебљина плоче [m]
- k - модул реакције подлоге [N/m³]
- P - оптерећење [N]

Он је, такође, открио да максимални моменат зависи од одстојања $2.38 \cdot \sqrt{a \cdot l}$, од угла плоче. За концентрисано оптерећење, кад је $a=0$, једначина 8.14 је идентична једначини 8.13.

Јоанидес је са сарадницима [11] применио метод коначних елемената да би прерачунао Вестергардово решење. Они су предложили следеће решење:

$$\sigma_c = \frac{3 \cdot P}{h^2} \cdot \left[1 - \left(\frac{c}{l} \right)^{0.72} \right] \quad (8.16)$$

и

$$\Delta_c = \frac{P}{k \cdot (l)^2} \cdot \left[1.205 - 0.69 \cdot \left(\frac{c}{l} \right) \right] \quad (8.17)$$

где је:

Δ_c - дефлексија у углу плоче [m]

l - радијус релативине крутости [m]

a - контактни радијус [m]

h - дебљина плоче [m]

c - страница квадратне контактне површине [m]

k - модул реакције подлоге [N/m³]

P - оптерећење [N]

Открили су да максимални моменат зависи од растојања $1.80 \cdot c^{0.32} \cdot l^{0.59}$, од угла плоче. Ако је примењено оптерећење преко кружне контактне површине, вредност c мора бити прерачуната на полупречник круга:

$$c = 1.772 \cdot a \quad (8.18)$$

Оптерећење у унутрашњости плоче

Вестергардова једначина је приказивала напон у унутрашњости плоче (слика 8.5) под деловањем кружног оптерећења радијуса a :

$$\sigma_i = \frac{3 \cdot (1 + \nu) \cdot P}{2 \cdot \pi \cdot h^2} \cdot \left(\ln \left(\frac{l}{b} \right) + 0.6159 \right) \quad (8.19)$$

где је:

l - радијус релативне крутости [m]

ν - Поасонов коефицијент

и:

$$b = a, \text{ кад је } a \geq 1.724 \cdot h \quad (8.20)$$

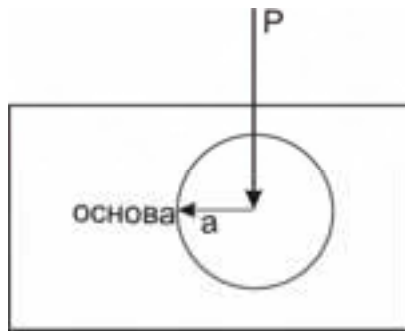
$$b = \sqrt{1.6 \cdot a^2 + h^2} - 0.675 \cdot h, \text{ кад је } a < 1.724 \cdot h \quad (8.21)$$

За Поасонов коефицијент $\nu = 0.15$ и уз услов декадног логаритма, једначина 8.19 може бити написана:

$$\sigma_i = \frac{0.316 \cdot P}{h^2} \cdot \left(4 \cdot \log\left(\frac{l}{b}\right) + 1.069 \right) \quad (8.22)$$

Дефлексија се одређује према Вестергардовој [12] једначини:

$$\Delta_i = \frac{P}{8 \cdot k \cdot l^2} \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{2 \cdot \pi} \left[\ln\left(\frac{a}{2 \cdot l}\right) - 0.673 \right] \cdot \left(\frac{a}{l}\right)^2 \right\} \quad (8.23)$$



Слика 8.5 Оптерећење у унутрашњости плоче

Јоанидес [11] је прилагодио једначине 8.19 и 8.23 за случај када a (радијус контактнoг оптерећења) не прелази l и тада је, због математичке тачности:

$$\sigma_i = \frac{3 \cdot P \cdot (1 + \nu)}{2 \cdot \pi \cdot h^2} \cdot \left(\ln\left(\frac{2 \cdot l}{a}\right) + 0.5 - \gamma + \frac{\pi}{32} \cdot \left(\frac{a}{l}\right)^2 \right) \quad (8.24)$$

$$\Delta_i = \frac{P}{8 \cdot k \cdot l^2} \cdot \left\{ 1 + \frac{1}{2 \cdot \pi} \left[\ln\left(\frac{a}{2 \cdot l}\right) + \gamma - 1.25 \right] \cdot \left(\frac{a}{l}\right)^2 \right\} \quad (7.25)$$

где је:

γ - Ојлерова (Euler) константа (0.577215)

Ивично оптерећење

Напоне које изазива ивично оптерећење је приказао Вестергард у више различитих радова [10][13][14]. У свом раду из 1948. године [14] приказао је генерализована решења за максималне напоне и дефлексије које изазива оптерећење преко елиптичне и полуелиптичне контактне површине на ивици плоче (слика 8.6). Постављање полуоса елипсе на контактни полупречник круга, води до одговарајућих решења за кружну и полукружну контактну површину. У случају полукружне контактне површине, права

линија је ивица плоче. Резултати ових нових једначина се значајно разликују од оних приказаних 1926. [10] и 1933. [13] године. Према Јоанидесу [11], следеће једначине су коректне за употребу:

$$\sigma_{e_{krug}} = \frac{3 \cdot (1+\nu) \cdot P}{\pi \cdot (3+\nu) \cdot h^2} \cdot \left[\ln \left(\frac{E \cdot h^3}{100 k \cdot a^4} \right) + 1.84 - \left(\frac{4 \cdot \nu}{3} \right) + \frac{1-\nu}{2} + \frac{1.18 \cdot (1+2 \cdot \nu) \cdot a}{l} \right] \quad (8.26)$$

$$\Delta_{i_{krug}} = \frac{\sqrt{2+1.2 \cdot \nu} \cdot P}{\sqrt{E \cdot h^3 \cdot k}} \cdot \left[1 - \frac{(0.76+0.4 \cdot \nu) \cdot a}{l} \right] \quad (8.27)$$

$$\sigma_{e_{polukrug}} = \frac{3 \cdot (1+\nu) \cdot P}{\pi \cdot (3+\nu) \cdot h^2} \cdot \left[\ln \left(\frac{E \cdot h^3}{100 k \cdot a^4} \right) + 3.84 - \left(\frac{4 \cdot \nu}{3} \right) + \frac{(1+2 \cdot \nu) \cdot a}{2 \cdot l} \right] \quad (8.28)$$

$$\Delta_{i_{polukrug}} = \frac{\sqrt{2+1.2 \cdot \nu} \cdot P}{\sqrt{E \cdot h^3 \cdot k}} \cdot \left[1 - \frac{(0.323+0.17 \cdot \nu) \cdot a}{l} \right] \quad (8.29)$$

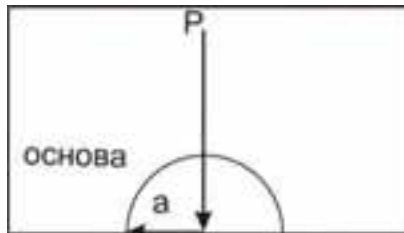
За $\nu=0.15$ и помоћу декадних логаритама, једначине 8.26 до 8.29 се могу записати и као:

$$\sigma_{e_{krug}} = \frac{0.803 P}{h^2} \cdot \left[4 \cdot \log \left(\frac{l}{a} \right) + 0.666 \left(\frac{a}{l} \right) - 0.034 \right] \quad (8.30)$$

$$\Delta_{i_{krug}} = \frac{0.431 \cdot P}{k \cdot l^2} \cdot \left[1 - 0.82 \cdot \left(\frac{a}{l} \right) \right] \quad (8.31)$$

$$\sigma_{e_{polukrug}} = \frac{0.803 P}{h^2} \cdot \left[4 \cdot \log \left(\frac{l}{a} \right) + 0.282 \left(\frac{a}{l} \right) + 0.650 \right] \quad (8.32)$$

$$\Delta_{i_{polukrug}} = \frac{0.431 \cdot P}{k \cdot l^2} \cdot \left[1 - 0.349 \cdot \left(\frac{a}{l} \right) \right] \quad (8.33)$$



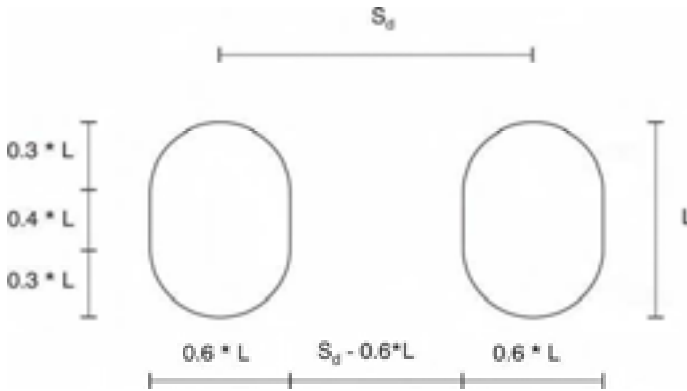
Слика 8.6 Оптерећење на ивици плоче

Двојни точак

Изузев једначина 8.28, 8.29, 8.32 и 8.33 за полукружну контактну површину, све приказане једначине у затвореној форми су приказане за кружну контактну површину. Када се оптерећење преноси преко склопа двојних

точкова треба га конвертовати на оптерећење једног точка преко кружне површине, тако да могу бити примењене једначине за оптерећење једног точка преко кружне површине. Ако је укупно оптерећење исто, а контактна површине једнака оној за два точка, што се често догађа код флексибилних коловозних конструкција, резултујући напони и дефлексије би били исувише велики. Због тога се за круте коловозне конструкције, за дато укупно оптерећење, користи много већа контактна површина.

На слици 8.7 је приказана комбинација двојног точка.



Слика 8.7 Двојни точак

Задовољавајући резултати се добијају ако је контактна површина једнака збиру површина од два точка и површини између точкова. Ако је P_d оптерећење од точка и q контактни притисак, површина једне гуме је:

$$\frac{P_d}{q} = \pi \cdot (0.3 \cdot L)^2 + (0.4 \cdot L) \cdot (0.6 \cdot L) = 0.5227 \cdot L^2 \quad (8.34)$$

или:

$$L = \sqrt{\frac{P_d}{0.5227 \cdot q}} \quad (8.35)$$

Површина еквивалентног круга је тада једнака:

$$\pi \cdot a^2 = 2 \cdot 0.5227 \cdot L^2 + (S_d - 0.6 \cdot L) \cdot L \quad (8.36)$$

Заменом L из једначине 8.35 следи да је:

$$\pi \cdot a^2 = \frac{0.8521 \cdot P_d}{q} + S_d \cdot \sqrt{\frac{P_d}{0.5227 \cdot q}} \quad (8.37)$$

Тада је радијус контактне површине једнак:

$$a = \sqrt{\frac{0.8521 \cdot P_d}{q \cdot \pi} + \frac{S_d}{\pi}} \cdot \sqrt{\frac{P_d}{0.5227 \cdot q}} \quad (8.38)$$

Утицајни дијаграми - метод Пикета и Реја

Утицајни дијаграми на еластичној подлози [15] су засновани на Вестергардовој теорији за цемент бетонске плоче, а са Поасоновим коефицијентом $\nu=0.15$. Доступни су дијаграми за ивично и унутрашње оптерећење, за моменте и дефлекције. Дијаграми за унутрашње оптерећење су коришћени за димензионисање крутих коловозних конструкција на аеродромима (Асоцијација за портланд цемент)(PCA) [16], а за ивично оптерећење за димензионисање крутих коловозних конструкција на аутопутевима (Асоцијација за портланд цемент)(PCA) [17].

Оптерећење у унутрашњости плоче

На слици 8.8 је приказан утицајни дијаграм за одређивање момента у унутрашњости плоче, када је подлога од густог флуида или чврста.

Поступак рада је:

1. За одговарајућу постелицу (подлогу - слој непосредно испод бетонске плоче) израчуна се дужина l , тј. радијус релативне крутости.

- a. Ако је постелица (подлога) густ флуид, тада је:

$$l = \sqrt[4]{\frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot k}} = \sqrt[4]{\frac{D}{k}} \quad (8.39)$$

- b. Ако је постелица (подлога) чврста, тада је:

$$l = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot D}{C}}, \quad D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (8.40)$$

где је:

D - крутост на савијање плоче [Nm]

h - дебљина плоче [m]

E - модул еластичности бетона [N/m²]

ν - Поасонов коефицијент

k - модул реакције подлоге [N/m³]

C - крутост претпостављене чврсте постелице (подлоге), при чему се E_c и ν_c односе на еластичну чврсту постелицу (подлогу)

2. Нађе се коефицијент сразмере из односа "l" датог на слици 8.8 и "l" израчунатог.
3. Контактне површине пнеуматика се нацртају у размери, тако да се контурама површина покрије максималан број поља, тј. да се средиште једне контактне површине поклопи са централном тачком дијаграма.

Поља покривена контактном површином се преброје, па се број негативних одузме од броја позитивних јер, негативна поља дају напоне затезања у горњој површини плоче. Ако гранична линија контактне површине сече поље (сегмент), мора се проценити део који покрива додирна површина и тај део узети у прорачун (нпр. 0.8 од сегмента).

4. Моменат савијања се израчунава из једначине:

$$M = \frac{q \cdot l^2 \cdot N}{10000} \quad (8.41)$$

где је:

q - притисак у пнеуматику [N/m²]

l - радијус релативне крутости [m]

N - број прекривених поља

5. Напон на затезање на доњој страни плоче износи:

$$\sigma_i = \frac{M}{W} = \frac{M}{\frac{h^2}{6}} = \frac{6 \cdot M}{h^2} \quad (8.42)$$

W - отпорни моменат за јединицу ширине [m³]

Дефлексија у унутрашњости плоче се одређује помоћу утицајног дијаграма за дефлексије, на исти начин као и моменат, и помоћу једначине:

$$\Delta_i = \frac{0.0005 \cdot q \cdot l^4 \cdot N}{D} \quad (8.43)$$

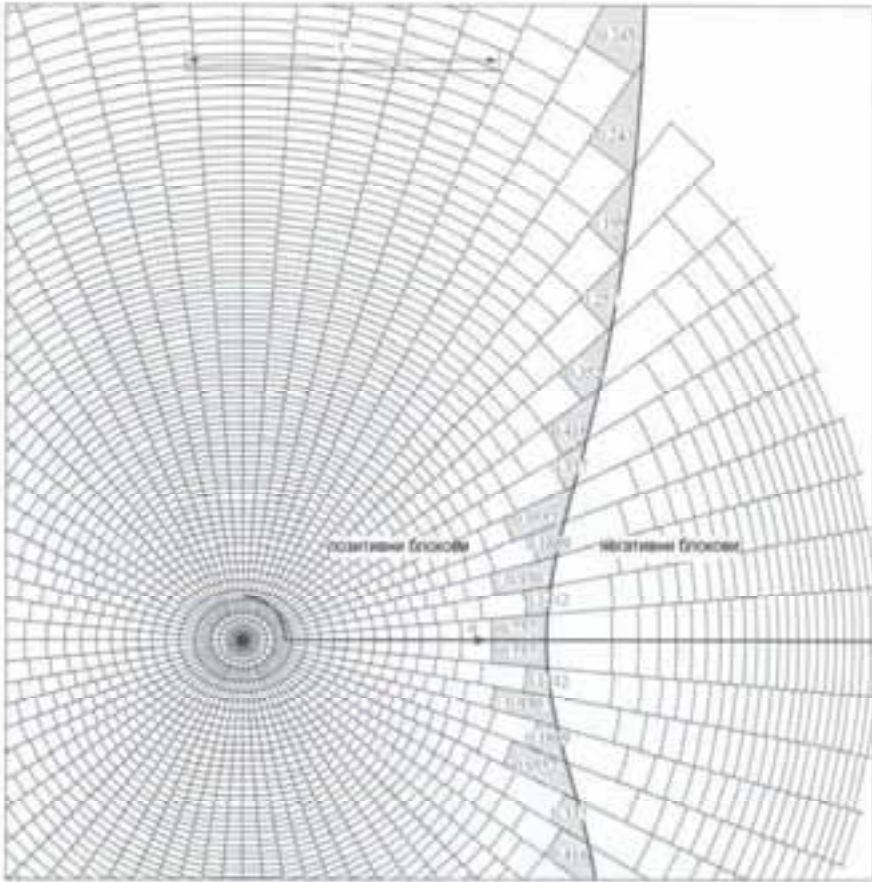
где је:

Δ_i - дефлексија у унутрашњости плоче

D - крутост на савијање плоче [Nm]

l - радијус релативне крутости [m]

N - број прекривених поља



Слика 8.8 Утицајни дијаграм за одређивање напона у унутрашњости плоче [15]

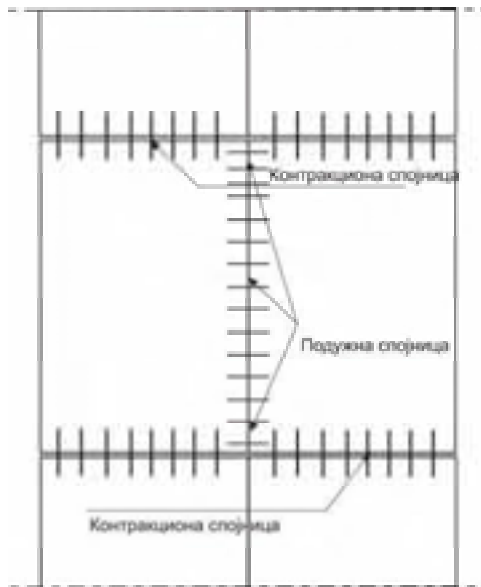
Ивично оптерећење

Ивично оптерећење се, такође, одређује помоћу утицајних дијаграма, а принцип је истоветан као и за оптерећење у унутрашњости плоче.

8.3 НАПОНИ УСЛЕД ТРЕЊА

Трење између бетонске плоче и подлоге изазива напоне затезања у бетону, у арматури, ако је има, и у можданицима. За равне бетонске коловозе, растојање између контракционих спојница мора бити одабрано тако да напони услед трења не изазову пуцање бетона. Број можданика зависи,

такође, од трења. На слици 8.9 је приказан распоред можданика у једном бетонском коловозу.



Слика 8.9 Распоред можданика у бетонском коловозу

8.3.1 ЕФЕКТИ ЗАПРЕМИНСКЕ ПРОМЕНЕ КОД БЕТОНА

Промену запремине бетона изазива варирање температуре и влажности. Температура утиче на стварање напона затезања који изазивају пуцање бетона. Влажност код отворених спојница изазива смањење ефикасности преношења оптерећења.

8.3.1.1 НАПОНИ У БЕТОНУ

На слици 8.10 је приказан бетонски коловоз изложен смањењу температуре. Услед симетрије, оба краја плоче теже да се помере ка центру, али подлога то спречава. Између бетонске плоче и подлоге се јављају напони услед трења. Количина трења зависи од релативног померања. У центру плоче померања нема, али је оно највеће на слободним крајевима.

На основу дефиниције трења:

$$F = W \cdot f \quad (8.44)$$

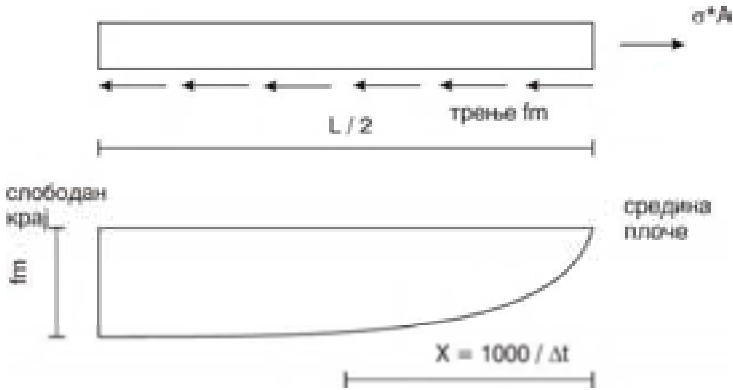
где је:

F - подужна сила [N]

f - коефицијент трења између плоче и подлоге

W - нормална сила (маса плоче помножена са гравитационим убрзањем) [N]

може се комбиновањем изразити следећа формула за напон трења.



Слика 8.10 Напони услед трења

Ако силу F изразимо у виду производа напона σ и попречног пресека плоче $A = d \times L_y$, а нормалну силу W као производ попречног пресека, дужине плоче и запреминске масе бетона, добија се следећи израз:

$$\sigma \cdot d \cdot L_y = \gamma_c \cdot d \cdot L_y \cdot \frac{L}{2} \cdot f \quad (8.45)$$

где је:

d - дебљина бетонске плоче [m]

L_y - ширина плоче [m]

$L/2$ - половина дужина плоче [m]

γ_c - запреминска маса бетона [kg/m^3]

Сређивањем претходног израза се добија:

$$\sigma = \gamma_c \cdot \frac{L}{2} \cdot f \quad (8.46)$$

8.3.1.2 ШИРЕЊЕ ПЛОЧА

Да би дошло до лома плоче, напон на затезање мора бити критичан. Ако је:

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta t \quad (8.47)$$

где је:

σ - напон у бетону коме није остављен простор за ширење [N/m^2]

α - коефицијент линеарне термичке дилатације [$1/^\circ\text{C}$]

Δt - разлика у температури у току посматраног периода [$^\circ\text{C}$]

То значи да је највећи напон при притиску, услед ширења бетонске плоче, знатно мањи од чврстоће на притисак. Према Енглеским прописима [18], најмања чврстоћа на притисак бетона за путеве, минималне дебљине од 15 cm, после 28 дана износи 28 MN/m^2 или на затезање при савијању 2.3 MN/m^2 . У пракси је чест случај да чврстоћа на притисак у просеку износи око 40 MN/m^2 . До издизања коловоза може доћи само при екстремним температурама и погрешно постављеним експанзионим спојницама.

У климатским условима сличним нашим, важи принцип да се експанзионе спојнице обавезно граде у периоду од октобра до априла.

У летњем периоду, када је разлика између температуре уграђивања и најтоплијег дела године мања од $10 \text{ }^\circ\text{C}$, напон при притиску је мањи од 3.5 MPa . С обзиром да не постоји ризик од издизања плоча, експанзионе спојнице у овом случају могу бити изостављене.

У табели 8.1 су приказани коефицијенти термичког ширења бетона, а у табели 8.2 коефицијент трења на контакту између бетонске плоче и подлоге.

Табела 8.1 Коефицијенти термичког ширења бетона

Агрегат	Коефицијент термичког ширења α ($^\circ\text{C} \cdot 10^{-6}$)	
	од	до средина
кварцит	11.7 - 14.6	13.2
кварц	9.0 - 13.2	11.1
пешчар	9.2 - 13.3	11.3
мермер	4.1 - 7.4	5.8
силикатни кречњак	8.1 - 11.0	9.6
гранит	8.1 - 10.3	9.2
базалт	7.9 - 10.4	9.2
кречњак	4.2 - 10.3	7.3
шљунак	9.0 - 13.7	11.4

Табела 8.2 Коефицијенти трења на контакту између бетонске плоче и подлоге

Тип подлоге	Коефицијент трења
површинска обрада	2.2
стабилизација битуменом	1.8
стабилизација цементом	1.8
шљунковити песковит материјал	1.5
дробљени агрегат	1.5
песак	1.2
природна постељица	0.9

8.3.1.3 СКУПЉАЊЕ ПЛОЧА

Током скупљања плоча бивају изазвани напони затезања услед трења између плоче и подлоге, израз 8.46.

На слици 8.10 је приказан смер деловања напона при скупљању плоче.

Тачнији прорачун, помоћу коригованог коефицијента трења услед његове неједнаке ангажованости по посматраној половини плоче, је:

за $X < L / 2$:

$$f_K = f \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot x}{3 \cdot L}\right) \quad (8.48)$$

за $X > L / 2$:

$$f_K = \frac{2 \cdot f}{3} \cdot \sqrt{\frac{L}{2 \cdot x}} \quad (8.49)$$

Ако плоча не би имала спојнице, на дужини "L" би дошло до појаве пукотина услед прекорачења напона затезања. Природни интервал између пукотина насталих због скупљања бетона износи око $2 \times L$. Али, непосредно при уграђивању када бетон има малу чврстоћу на затезање, под утицајем температуре могу се јавити пукотине на 6.5 m. Због тога у року од 16 часова по уграђивању бетона спојнице морају да буду исечене.

Моћ бетона да "гура" је око 10 пута већа од "способности вучења". Ако бетон има чврстоћу на притисак 20 MN/m^2 у стању је да гура 900 t коловоза у оба смера од посматране тачке. Нормални интервал између издигнутих или тешко изломљених спојница износи од 1800 до 2750 метара (чврстоћа на притисак је 30 MN/m^2). Наизменични циклуси "гурања" и "вучења", до којих долази сваког дана, доводе до замора ако настали напони превазилазе пола чврстоће на затезање.

8.3.2 ПРИТАЈЕНИ НАПОНИ У БЕТОНУ

Упадањем страних материјала у спојнице, као што су песак, камена ситнеж или нешто слично, који се користе у зимском периоду за борбу против поледице, спречава се ширење плоча - пројектовани размак се вишеструко смањује. Услед тога настају попречне пукотине и локална оштећења на ивицама спојница.

8.3.3 ТЕРМИЧКЕ ПУКОТИНЕ У СВЕЖЕМ БЕТОНСКОМ КОЛОВОЗУ

Ова врста пукотина током првих неколико дана по уграђивању бетона првенствено зависи од доба дана и годишњег доба, па тек онда од дужине плоча и коефицијента термичког ширења агрегата у мешавини. У свежем бетонском коловозу настају следеће пукотине без утицаја саобраћаја:

- пластичне пукотине, које настају непосредно по уграђивању бетона као резултат превеликог испаравања воде из површине бетона, наглог губљења влаге у доњој зони и због лошег уграђивања финишером
- љуспање застора које, у суштини, представља низ малих неправилних пукотина
- контракционе и витоперне пукотине, које настају у периоду очвршћавања бетона као резултат промене запремине због варирања влажности и температуре

Време “очвршћавања” бетона је време за које бетон постиже одређену крутост, тј. престаје да буде пластичан.

По конвенцији [19] време “очвршћавања” представља време за које бетон постиже 5% од 7-дневне чврстоће, што одговара старости од око 10 часова при температури од 20°C.

Опасност од термичких пукотина у свежем неармираном бетонском коловозу може се изразити коефицијентом лома:

$$C_F = \frac{T_O}{T_L} = \frac{(R_S \cdot T_l + R_W \cdot T_W + R_i \cdot T_i)}{T_L} \quad (8.50)$$

где је:

C_F - коефицијент лома

T_O - ефективна промена температуре, која се добија прорачуном међусобно зависних температура у време “очвршћавања” бетона

T_L - гранична промена температуре

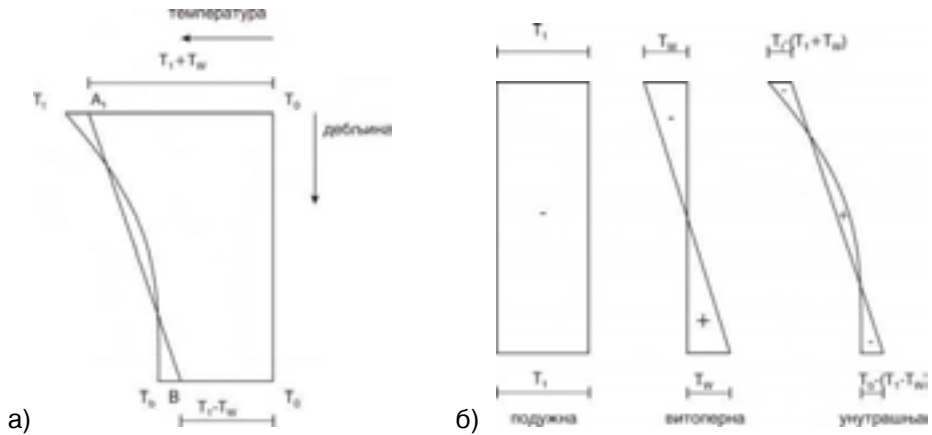
T_1 - средња температура у бетонској плочи која утиче на подужно ширење или скупљање плоче. Овом кретању се супротставља трење између плоче и подлоге

T_W - разлика у температури на површини и дну бетонске плоче, која проузрокује њено савијање или извијање

T_i - нелинеарна промена температуре по дубини плоче која изазива напоне као резултат различитог запреминског ширења појединих делова унутар плоче

R_S, R_W, R_i - коефицијенти који ограничавају подужно померање плоча преко подлоге, савијање и унутрашње напоне због промене запремине [20][21]

На слици 8.11а) је приказана расподела температуре кроз коловозну конструкцију, а на слици 8.11б) различити облици расподеле температуре.



Слика 8.11 а) Распдела температуре кроз коловозну конструкцију
б) Различити облици распделе температуре

Табела 8.3 Коефицијенти којима подлога ограничава кретање плоче

Дужина плоче [m]	Модул еластичности [N/mm ² * 10 ⁴]	Коефицијент ограничавања подлоге, R _S *	
		Коефицијент трења 1.0 за померање од 5 [mm]	Коефицијент трења 2.0 за померање од 0.75 [mm]
30	2.1	0.04 - 0.05	0.13 - 0.23
	3.4	0.02 - 0.03	0.08 - 0.14
60	2.1	0.10 - 0.15	0.26 - 0.48
	3.4	0.06 - 0.09	0.16 - 0.30
150	2.1	0.30 - 0.48	0.66 - 0.98
	3.4	0.18 - 0.31	0.40 - 0.74
300	2.1	0.60 - 0.95	1.0
	3.4	0.38 - 0.64	0.79 - 1.00

* Израчунат за слободно термичко дилатирање између 120 и 240 x 10⁻⁶.

Табела 8.4 Коефицијенти који ограничавају савијање (извијање)

Дужина плоче [m]	Модул еластичности [N/mm ² X 10 ⁴]	Коефицијент ограничавања подлоге, R _w *		
		Модул реакције тла [N/mm ²]		
		0.0271	0.109	0.191
6.6	2.1	0.53 - 0.70	0.58 - 0.80	0.65 - 0.88
	3.4	0.32 - 0.48	0.38 - 0.59	0.40 - 0.64
7.6	2.1	0.80 - 0.95	0.88 - 1.00	0.94 - 1.00
	3.4	0.51 - 0.73	0.60 - 0.85	0.63 - 0.92
9.1	2.1	1.0	1.0	1.0
	3.4	0.77 - 1.00	0.84 - 1.00	0.90 - 1.00

* Израчунат за дебљину плоче од 0.25 m и слободно термичко дилатирање између 120 и 240 x 10⁻⁶.

Важне напомене за употребу коефицијената:

За коловозе, код којих се на сваких приближно 6.0 метара налазе попречне спојнице треба узети:

$$R_s = 0, R_w = 0.5 \text{ и } R_i = 1;$$

код армираних коловоза са размаком спојница од 30 метара, треба узети:

$$R_s = 0.10, R_w = R_i = 1;$$

код непрекидно армираних коловоза, са дужином плоча од 400 метара (нормални дневни учинак), треба узети:

$$R_s = R_w = R_i = 1.$$

За граничну промену температуре T_i треба узети:

- 5°C за бетоне који садрже кварцни агрегат
- 8°C за бетоне који садрже гранитни агрегат
- 15°C за бетоне који садрже кречњачки агрегат

Да би смањили могућност настајања пукотина у свежег бетонском коловозу, треба се придржавати следећих препорука:

- применом рефлектујућих пигмената и мембрана за негу бетона, треба смањити апсорпцију сунчевих зрака
- највеће температурне разлике на горњој и доњој површини бетонске плоче се јављају у току пролећа и раног лета
- примена покривки у сваком случају даје ефекте
- укупно повећање температуре и разлике у температури између горње и доње површине највеће су код плоча бетонираних у току јутра
- у току првих 24 сата по уграђивању, најчешћи узрок појави термичких пукотина су различите температуре на горњој и доњој површини, које изазивају савијање плоча. Овој нормалној појави супротстављају се маса плоче и адхезија између плоче и подлоге
- ако је плоча дужа од 400 метара и садржи кварцни агрегат, у току првих 24 сата при ведром јутру у пролеће или лети, доћи ће до појаве термичких пукотина и поред покривања. Ово важи и за плоче дужине од 30 метара
- код краћих плоча, око 6 метара, ране термичке пукотине могу да се јаве једино под изразито неповољним условима средине и застора који добро упија сунчеве зраке
- жљебове спојница обавезно треба резати у раној фази очвршћавања бетона
- ризик од термичких пукотина код свежег бетонског коловоза може се значајно смањити, ако се примене мембране са рефлектујућим особинама и агрегати са малим коефицијентом термичког ширења (кречњак или гранит)

8.3.4 СУПЕРПОЗИЦИЈА НАПОНА КОД КРУТИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА

У поступку димензионисања, поред напона од оптерећења, треба водити рачуна и о напонима од температуре, јер ти напони могу бити истог реда величине, а по некад и већи.

Поступак комбиновања напона од оптерећења и температуре, према Лабораторији за путеве из Лондона (Transport and Road Research Laboratory)[18], је приказан на следећем примеру:

- А.** Одреди се промена температуре на површини коловоза у току године. Затим се израчунају напони од савијања - извијања за различите периоде дана и године. Ови напони се комбинују са подацима расподеле учешћа теретних возила у току дана (табела 8.6) да би се добио годишњи просек прелаза возила у току дана. У периодима највећих напона од температуре, саобраћајно оптерећење је приказано у табели 8.5.

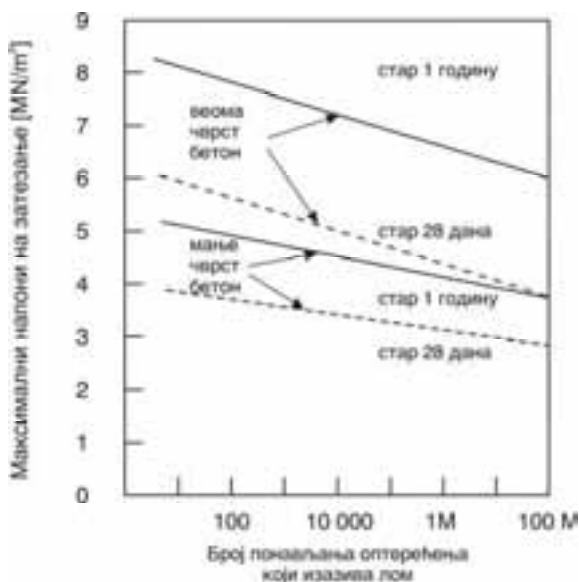
Табела 8.5 Расподела учешћа теретних возила у току дневног саобраћајног тока по једној саобраћајној траци

Час	Проценти учешћа теретних возила у 24 часовном саобраћајном току
24 - 1	1.3
1 - 2	0.8
2 - 3	0.8
3 - 4	0.8
4 - 5	0.8
5 - 6	0.8
6 - 7	2.4
7 - 8	4.4
8 - 9	5.4
9 - 10	5.6
10 - 11	6.4
11 - 12	7.0
12 - 13	7.0
13 - 14	6.5
14 - 15	6.5
15 - 16	6.1
16 - 17	6.7
17 - 18	7.0
18 - 19	6.6
19 - 20	4.4
20 - 21	3.9
21 - 22	2.6
22 - 23	3.5
23 - 24	2.6
Σ	100 %

Табела 8.6 Проценти прелаза теретних возила (дневни годишњи просек) који одговарају одређеном нивоу напона при савијању (термички напони)

Напони при савијању на дну плоче [MN/m ²]	Проценти пролаза теретних возила при овом термичком напону при савијању
Напони при затезању	
1.2 - 1.4	7
0.9 - 1.2	12
0.5 - 0.9	22
0 - 0.5	36
Напони при притиску	
1.2 - 1.4	0.1
0.9 - 1.2	2
0.5 - 0.9	5
0 - 0.5	16

Б. Ако се комбинују напони од оптерећења (табела 8.7) са напонима од температуре (табела 8.6) и дозвољеним напонима (слика 8.12), очигледно је да оптерећење од једне половине осовине (оптерећење точкава једне и друге стране осовине од 2x40 kN се не суперпонирају) не изазива критична напрезања са гледишта замора.



Слика 8.12 Максимални напони на затезање у зависности од чврстоће бетона

Табела 8.7 Напони при затезању од оптерећења у бетонској плочи дебљине 18 cm на шљунковито песковитој подлози

Половина осовинског оптерећења [kN]	Процент прелаза осовина по саобраћајној траци	Највећи напони на затезање [MN/m ²]
4.5	14.0	0.17
13.6	38.9	0.49
22.7	24.2	0.85
31.8	9.7	1.19
40.8	7.9	1.54
49.9	3.8	1.88
59.0	1.25	2.22
68.0	0.19	2.56
77.1	0.02	3.02
86.2	0.04	3.25

Ц. Комбинујући податке из табела 8.6 и 8.7 добијају се понављања суперпонираних напона на затезање (од оптерећења и температуре) у односу на милион прелаза осовина, а у оквиру одређених граница (табела 8.8).

Табела 8.8 Број понављања суперпонираних напона на затезање (од оптерећења и температуре) на милион прелаза теретних возила, у оквиру одређених нивоа напона

Оптерећење од половине осовине* [kN]	Број прелаза милион осовина**	Одговарајући број понављања суперпонираних напона у оквиру одређених граница [MN/m ²]				
		2.5 - 3.0	3.0 - 3.5	3.5 - 4.0	4.0 - 4.5	4.5 - 5.0
40.8	79000	15010***				
49.9	38000	4560	2660			
59.0	12500	2750	2375			
68.0	1900	684	418	361		
77.1	200	32	72	68	14	
86.2	400	84		232	48	28
Укупно		23120	5525	661	62	28

* Подаци преузети из колоне I табеле 8.7

** Подаци преузети из колоне II табеле 8.7

*** Напони при затезању из табеле 8.6 се суперпонирају са напонима на затезање од оптерећења из табеле 8.7 [1.4 MN/m^2 (7%) + $1.54 \text{ MN/m}^2 = 2.94 \text{ MN/m}^2$ и 1.2 MN/m^2 (12%) + $1.54 \text{ MN/m}^2 = 2.74 \text{ MN/m}^2$]. Резултујући напон се налази у границама 2.5 - 3.0 MN/m² и сагласан је са процентом прелаза теретних возила (7 + 12 = 19%) при овим термичким напонима. Број прелаза на милион осовина 79000 се множи са 19% и добија одговарајући број понављања суперпонираних напона од 15010.

Д. Ако се упореде подаци из табеле 8.8 са дозвољеним напонима са слике 8.12, види се да и код бетона мање чврстоће, напони од 2.5 до 3.0 MN/m², не могу да изазову пукотине у плочи - коловозној конструкцији. Напони између 3.0 и 3.5 MN/m² могу у раној фази

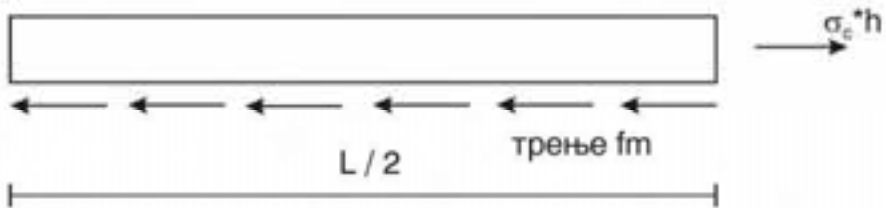
(првих 28 дана старости бетона) да изазову по неку пукотину. Напони већи од 3.5 MN/m^2 могу у првих 6 месеци да изазову, такође, тек по неку пукотину, али у принципу анализирани бетонски коловоз може да одоли суперпонираним напонима од оптерећења и температуре.

8.3.5 НАПОНИ У ЧЕЛИКУ

У бетонским коловозним конструкцијама челик се користи за армирање и можданике у подужним и попречним спојницама. Димензионисање уздужне и попречне арматуре и можданика у подужним спојницама зависи од напона који се јављају услед деловања трења између подлоге и бетонске плоче. Димензионисање можданика у попречним спојницама није засновано на напонима услед деловања трења.

Армирање

За армирање се најчешће користе арматурне мреже. Њихова улога није носиве природе. Ове мреже служе за контролисање рада прслина у бетонским плочама и за повећање отвора спојница. У случајевима када се бетонски коловоз армира, све напоне затезања прима челик.



Слика 8.13 Одређивање површине арматуре

На слици 8.13 се види да ако се $\sigma_c \cdot h$ замени са $A_s \cdot f_s$, тада једначина 8.46 постаје:

$$A_s = \frac{\gamma_c \cdot h \cdot L \cdot f_a}{2 \cdot f_s} \quad (8.51)$$

где је:

A_s - потребна површина челика по јединици ширине [m^2]

f_s - допуштени напон у челику [N/m^2]

f_a - средњи коефицијент трења између плоче и подлоге

h - дебљина плоче [m]

L - дужина плоче [m]

Из ове једначине се види да је потребна површина арматуре пропорционална дужини плоче.

Арматура се најчешће поставља у средини дебљине плоче, са прекидима на местима где треба да буду спојнице.

Можданици у подужним спојницама

Ови можданици се постављају у подужне спојнице и њихова улога је да споје плоче и осигурају пренос оптерећења с једне на другу. Потребна површина арматуре се одређује на исти начин као у претходном случају:

$$A_s = \frac{\gamma_c \cdot h \cdot L' \cdot f_a}{2 \cdot f_s} \quad (8.52)$$

где је:

A_s - потребна површина челика по јединици дужине [m^2]

f_s - допуштени напон у челику [N/m^2]

f_a - средњи коефицијент трења између плоче и подлоге

h - дебљина плоче [m]

L' - растојање од спојнице до слободног краја плоче где нема можданика [m]

За аутопутеве са две и три саобраћајне траке, L' је ширина саобраћајне траке. Ако су можданици постављени у све три подужне спојнице коловоза са четири саобраћајне траке, L' је ширина траке од једне (уз средњи разделни појас) до друге (уз банкину) спољне спојнице [22].

Дужина можданика је одређена допуштеним напоном у челику. За деформабилне можданике, допуштени напон у челику је 2.4 МПа. Дужина можданика се одређује једначном:

$$t = 2 \cdot \left(\frac{A_1 \cdot f_s}{\mu \cdot \sum o} \right) \quad (8.53)$$

где је:

t - дужина можданика [m]

μ - допуштени напон у челику [N/m^2]

A_1 - површина попречног пресека једног можданика [m^2]

$\sum o$ - обим можданика [m]

8.3.6 ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ МОЖДАНИКА И ПОПРЕЧНИХ СПОЈНИЦА

Димензионисање можданика и спојница се најчешће ради на основу искуства, мада постоје и теоријски поступци. Величина можданика зависи од дебљине плоче. У табели 8.9 су приказане величине и дужине можданика за различите дебљине плоча које препоручује Удружење за

портланд цемент (РСА)[23]. Може се видети да је пречник можданика једнак једној осмини дебљине плоче. У актуелном поступку за димензионисање можданика Удружење за портланд цемент (РСА)[24] препоручује употребу можданика пречника 32 mm за коловозне конструкције дебљина мањих од 25.4 cm и 38 mm за коловозне конструкције дебљина већих од 25.4 cm. Због контроле слегања и смањења контактнoг напона, минимални пречник можданика треба да буде између 32 и 38 mm.

Табела 8.9 Препоручене димензије можданика

Дебљина плоче [mm]	Пречник можданика [mm]	Дужина можданика [mm]
127	15.875	304.8
152.4	19.05	355.6
177.8	22.22	355.6
203.2	25.4	355.6
228.6	28.575	406.4
254	31.75	457.2
279.4	24.925	457.2
304.8	38.1	508

Међутим, потпуно задовољење конструктивних карактеристика се постиже следећим димензијама можданика (табела 8.10) [25].

Табела 8.10 Димензије и растојања можданика код експанзионих и контракционих спојница

h_{pl} [mm]	Експанзионе спојнице			Контракционе спојнице			Дужина можданика ако се машински уграђују [mm]
	d [mm]	l [mm]	Међусобно растојање [mm]	d [mm]	l [mm]	Међусобно растојање [mm]	
150-189*	20	550	300	12	400	300	400
190-239	25	650	300	20	550	300	400
240 и више	32	750	300	25	650	300	400

* - за плоче које су тање од 150 mm, не препоручује се употреба можданика

8.3.6.1 ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ МОЖДАНИКА

Ови можданици се користе за повезивање попречних спојница и пренос оптерећења на наредну плочу. Напони и дефлексије у спојници су много мањи када оптерећење прихватају две плоче, уместо једне плоче. Употреба

можданика смањује издизање и пумпање, а то утиче на димензионисање дебљине плоче (Удружење за портланд цемент)(РСА)[26].

Допуштена носивост

Познато је да је бетон знатно слабијих карактеристика од челика. Величина и растојање можданика зависи од носивости комбинације можданика и бетона. Допуштена носивост је одређена једначином 8.54 [27]:

$$f_b = \left(\frac{(4 \cdot 0.0254) - d}{3 \cdot 0.0254} \right) \cdot f_c' \quad (8.54)$$

где је:

f_b - допуштена носивост можданика [N/m^2]

d - пречник можданика [m]

f_c' - захтевана чврстоћа бетона при притиску [N/m^2]

Носивост једног можданика

Ако је познато оптерећење за један можданик, максимална носивост може бити теоријски одређена ако се претпостави да је можданик штап, а бетон Винклерова подлога. Употребом оригиналног решења (Тимошенко и Фриберг)[28], одређена је максимална деформација бетона на који делује један можданик (слика 8.14) помоћу једначине:

$$y_o = \frac{P_t \cdot (2 + \beta \cdot z)}{4 \cdot \beta^3 \cdot E_d \cdot I_d} \quad (8.55)$$

где је:

y_o - деформација можданика на ивици спојнице [m]

P_t - оптерећење једног можданика [N] је једнако половини силе која делује на спојницу

z - ширина спојнице [m]

E_d - Јунгов модул можданика [N/m^2]

I_d - моменат инерције можданика [m^4]

β - релативна крутост можданика ослоњеног у бетону [$1/\text{m}$]



Слика 8.14 Шема деформације можданика под оптерећењем

Пошто је:

$$I_d = \frac{1}{64} \cdot \pi \cdot d^4 \quad (8.56)$$

и

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{K \cdot d}{4 \cdot E_d \cdot I_d}} \quad (8.57)$$

где је:

k - модул реакције подлоге [N/m^3]

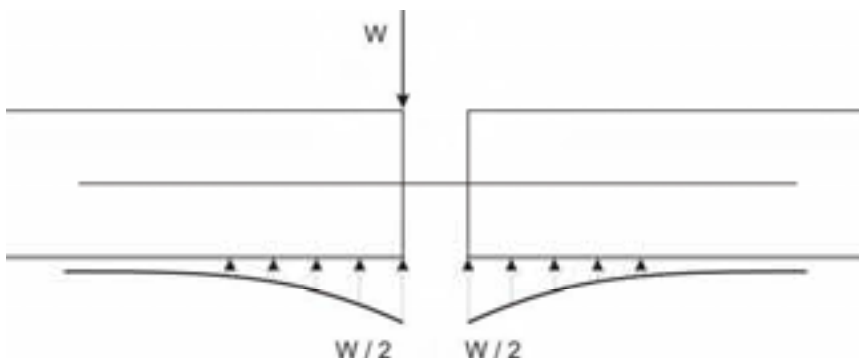
Носивост можданика је пропорционална деформацији:

$$\sigma_b = k \cdot y_o = \frac{k \cdot P_t \cdot (2 + \beta \cdot z)}{4 \cdot \beta^3 \cdot E_d \cdot I_d} \quad (8.58)$$

Добијени напон из једначине 8.58 треба упоредити са напонам из једначине 8.54. Ако је $\sigma_b > f_b$, онда треба узети или веће можданике или смањити њихово међусобно растојање. Најновија истраживања су показала да је носивост можданика повезана са величином издизања плоче. Ограничавањем носивости можданика, издизање се може довести до прихватљивих граница.

Деловање групе можданика

Када сила делује на једну плочу у близини спојнице, део оптерећења се преноси на суседну плочу (слика 8.15) кроз групу можданика.



Слика 8.15 Преношење оптерећења кроз можданике

Ако су можданици 100% ефикасни, обе плоче ће имати исту дефлексију и силе реакције испод плоча ће бити исте и једнаке $0.5 \cdot W$, што представља укупну смичућу силу коју прихвата група можданика. Ако је ефикасност

можданика мања од 100%, што се дешава код старих коловоза, сила реакције испод оптерећене плоче ће бити већа од $0.5 \cdot W$, док ће сила испод неоптерећене плоче бити мања од $0.5 \cdot W$. Резултат тога је укупна смичућа сила која је мања од $0.5 \cdot W$. Из овога се може закључити да је за димензионисање можданика сила од $0.5 \cdot W$ конзервативнији приступ.

Фриберг [28] је пронашао да максимални негативни моменат, и за унутрашње и за ивично оптерећење, зависи од растојања од силе које износи 1.8%, где је / радијус релативне крутости, дефинисане изразом 8.12. Кад је моменат максималан, смичућа сила је једнака нули. Из тога се може закључити да смицање у сваком можданику реципрочно опада са растојањем можданика од тачке у којој делује сила. Максимална вредност је у близини тачке у којој делује сила, а најмања на растојању од 1.8%.

8.3.6.2 ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ СПОЈНИЦА

Отвор спојнице код крутих коловозних конструкција зависи од параметара ширења бетона. Већи отвори спојница изазивају мању ефикасност при преношењу оптерећења. Отвор спојнице се може апроксимативно израчунати помоћу израза који су дефинисали Дартер и Баренберг [8]:

$$\Delta L = C \cdot L \cdot (\alpha_t \cdot \Delta T + \varepsilon) \quad (8.59)$$

где је:

ΔL - отвор спојнице изазван деловањем температуре и сушења бетона [m]

α_t - термички коефицијент ширења бетона [$1/^\circ\text{C}$] (9.0 до 10.8×10^{-6})

ε - коефицијент ширења бетона током сушења (0.5 до 2.5×10^{-4})

L - отвор спојнице или дужина плоче [m]

ΔT - температурна разлика [$^\circ\text{C}$]

C - фактор трења (0.65 за стабилизовану подлогу, 0.8 за подлогу од невезаног агрегата)

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Westergaard H.M, (1926), "Analysis of Stresses in Concrete Pavement Due to Variation of Temperature", *Proceedings, Highway Research Board*, Vol. 6, p.201-215
- [2] Thompson M.R, B.J. Dempsey, H. Hill and J. Vogel (1987), "Characterizing Temperature Effects for Pavement Analysis and Design", Transportation Research Board, *Transportation Research Record 1121*, p.14-22
- [3] Richardson J.M. and J.M. Armaghani (1987), "Stress Caused by Temperature Gradient in Portland Cement Pavements", Transportation Research Board, *Transportation Research Record 1121*, p.14-22
- [4] Harik I.E, P. Jianping, H. Southgate and D. Allen (1994), "Temperature Effects on Rigid Pavements", ASCE, *Journal of Transportation Engineering*, Vol.120, No.1, p.127-143
- [5] Mohamed A.R. and W. Hansen (1997), "Effects on Nonlinear Temperature Gradient on Curling Stress in Concrete Pavements", Transportation Research Board, *Transportation Research Record 1568*, p.65-77
- [6] Bredbury R.D. (1938), *Reinforced Concrete Pavements*, Wire Reinforced Institute, Washington D.C.
- [7] Teller L.W and E.C. Sutherland (1935-1943), *The Structural Design of Concrete Pavements*, Reprints from *Public Roads*, Vols. 16, 17 and 23
- [8] Darter M.I and E.J. Barenberg (1977), *Design of Zero-Maintenance Plain Jointed Concrete Pavement*, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-77-111, Vol. 1
- [9] Pickett G and G.K. Ray (1951), "Influence Charts for Concrete Pavements", *Transactions, ASCE*, Vol.116, p.49-73
- [10] Westergaard H.M, (1926), "Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis", *Public Roads*, Vol.7, p.25-35
- [11] Ioannides A.M, M.R. Thompson and E.J. Barenberg (1985), "Westergaard Solutions Reconsidered", Transportation Research Board, *Transportation Research Record 1043*, p.13-23
- [12] Westergaard H.M, (1939), "Stresses in Concrete Runways of Airports", *Proceedings, Highway Research Board*, Part I, p.175-181
- [13] Westergaard H.M, (1933), "Analytical Tools for Judging Results of Structural Tests of Concrete Pavements", *Public Roads*, Vol.14, No.10, p.185-188
- [14] Westergaard H.M, (1948), "New Formulas for Stresses in Concrete Pavements of Airfields", *Transactions, ASCE*, Vol.113, p.425-444

- [15] Picket G and G.K. Ray, (1951), "Influence Charts for Concrete Pavements", *Transactions, ASCE*, Vol.116, p.49-73
- [16] *Design of Concrete Airport Pavement*, (1955), Portland Cement Association
- [17] *Thickness Design for Concrete Pavements*, (1966), Portland Cement Association
- [18] *Road Note 29*, (1970), "A Guide for the Structural Design of Pavements for New Roads", *Road Research Laboratory*, London
- [19] Hunt J, (1972), "Temperature Changes and Thermal Cracking in Concrete Pavements of Early Ages", *Cement and Concrete Associations*, London
- [20] Friberg F, (1968), "Restarined Temperature Movements in Long Slabs", *ACI*, Vol.60
- [21] Sparkes N, (1939), "Stresse in Concrete Road Slabs", *The Structural Engineer*
- [22] Huang H. Y, (2004), *Pavement Analysis and Design*, Second Edition, Pearson's Prentice Hall
- [23] *PCA*, (1975), *Join Design for Concrete Highway and Street Pavements*, *Portland Cement Association*
- [24] *PCA*, (1991), *Design and Construction of Joints for Concrete Highways*, *Concrete Paving Technology*, *Portland Cement Association*
- [25] Цветановић А, (1992), КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ, Нанучна књига, Београд
- [26] *PCA*, (1984), *Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements*, *Portland Cement Association*
- [27] *American Concrete Institute*, (1956), "Structural Design Considerations for Pavement Joints", Report of ACI Committee 325, *ACI Journal*, July
- [28] Friberg B.F, (1940), "Design of Dowels in Transverse Joints of Concrete Pavements", *Transactions, ASCE*, Vol.105, p.1076-1095

9

ДОСАДАШЊИ ПОСТУПЦИ ЗА ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ КРУТИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА

9.1 ДОСАДАШЊИ ПОСТУПЦИ ЗА ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ КРУТИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА

У овом поглављу неће бити детаљно приказани досадашњи поступци за димензионисање, већ само њихове битне поставке.

9.1.1 ВЕСТЕРГАРДОВ ПОСТУПАК

Најпознатији и најстарији поступак за димензионисање крутих коловозних конструкција је поступак који је развио Вестергард (Westergaard, 1925) [1], [2]. Овим поступком се одређују напони и угиби у крутој коловозној конструкцији (бетонска плоча), под претпоставком да се танке еластичне бетонске плоче налазе на Винклеровој (Winkler) подлози (густ флуид).

Основне поставке су да:

1. се бетонска плоча понаша као хомогено, изотропно и еластично тело у равнотежи
2. је реакција постељице само вертикална и пропорционална угибу плоче

3. је реакција постелеице по јединици површине у било којој тачки једнака производу константе "К" и угиба у одговарајућој тачки, независно од угиба и положаја
4. је дебљина плоче непроменљива
5. се оптерећење преноси равномерно преко кружне (по новијој верзији и елиптичне) површине

Вестергард је разматрао три карактеристична положаја у којима делује оптерећење и за њих одредио напоне и угибе, и то:

- у углу плоче
- на ивици плоче
- у средини плоче

9.1.2 ПОСТУПАК ПИКЕТА И РЕЈА

Пикет и Реј (Pickett and Ray) [3] су 1951. године, на основу Вестергардове поставке разрадили нумерички и графички поступак за одређивање напона у бетонским коловозним конструкцијама. Овај поступак је детаљно објашњен у **Глави 8** ове књиге.

9.1.3 ПОСТУПАК УДРУЖЕЊА ЗА ЈАВНЕ ПУТЕВЕ И ТРАНСПОРТ - AASHTO [4]

Као и код димензионисања флексибилних коловозних конструкција и у поступку димензионисања крутих коловозних конструкција метода удружења за јавне путеве и транспорт - AASHTO [4] заснива се на резултатима опита AASHTO обављених у држави Илиноис 1959. и 1960. године. Прво упутство за димензионисање по методу AASHTO је објављено 1961. године. Овде ће бити приказано допуњено издање из 1986. године. Мерадавни параметри за димензионисање су:

- период трајања до прве реконструкције
- пројектни период
- саобраћајно оптерећење
- поузданост
- утицај средине
- критеријуми квалитета
- карактеристике материјала
- карактеристике коловозне конструкције
- армирање
- економичност

ПЕРИОД ТРАЈАЊА ДО ПРВЕ РЕКОНСТРУКЦИЈЕ

Период трајања до прве реконструкције представља време од тренутка пуштања у саобраћај до прве реконструкције или време између две реконструкције. Најчешће су то периоди од 10 или 15 година, а најмање 5.

ПРОЈЕКТНИ ПЕРИОД

Пројектни период је изражен у годинама за које коловозну конструкцију треба пројектовати. У зависности од разреда пута пројектни периоди су следећих распона:

- градски аутопутеви - 30 до 50 година
- аутопутеви и путеви првог разреда - 20 до 50 година
- остали путеви - 15 до 25 година

САОБРАЋАЈНО ОПТЕРЕЋЕЊЕ

Укупно еквивалентно саобраћајно оптерећење у пројектном периоду, за возну траку коју треба димензионисати, изражено је бројем прелаза стандардног возила са осовинским оптерећењем од 80 kN:

$$ESO_{80} = R_S \cdot R_t \cdot eso \quad (9.1)$$

где је:

ESO_{80} - укупно еквивалентно саобраћајно оптерећење од 80 kN по осовини за возну траку у току пројектног периода

R_S - коефицијент расподеле саобраћаја по смеровима; за већину путева $R_S = 0.5$ (%)

R_t - коефицијент расподеле саобраћаја по тракама ако их има у једном смеру две или више

eso - укупно еквивалентно саобраћајно оптерећење од 80 kN по осовини у оба смера за одређену деоницу пута у пројектном периоду.

Најчешће примењиване вредности за коефицијент R_t су приказане у табели 9.1.

Табела 9.1 Вредности коефицијента R_t

Број трака у сваком смеру	Процент од eso од 80 kN у пројектној траци
1	100
2	80 до 100
3	60 до 80
4	50 до 75

Еквивалентно саобраћајно оптерећење по пројектној траци је одређено сумирањем по групама оптерећења на следећи начин:

$$eso = \sum_{i=1}^n T_i = N_t \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot e_i \quad (9.2)$$

где је:

T_i - еквивалентно осовинско оптерећење од 80 kN за групу оптерећења "i"

$N_i = N_t \times P_i$ - број прелаза осовинског оптерећења које се очекује за групу оптерећења "i"

N_t - укупан број осовина

P_i - проценат осовина у групи оптерећења "i"

e_i - коефицијент еквиваленције за групу оптерећења "i" (налазе се у литератури [4], табеле Д.10 до Д.18. (вредности коефицијената су исте, али осовинско оптерећење треба прерачунати са kip на kN, 1 kip = 4.45 kN). Пример је приказан у табели 9.2. за једноосовинско оптерећење и индекс губитка употребљивости $r_i=2.0$.

Табела 9.2 Коефицијенти еквиваленције за једноосовинско оптерећење и $r_i=2.0$.

Осовинско оптерећење [kN]	Дебљина плоче d [cm]								
	15	18	20	23	25	28	30	33	36
9	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
18	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
27	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
35	0.035	0.033	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
44	0.087	0.084	0.082	0.081	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080
53	0.186	0.180	0.176	0.175	0.174	0.174	0.173	0.173	0.173
62	0.353	0.346	0.341	0.338	0.337	0.336	0.336	0.336	0.336
71	0.614	0.609	0.604	0.601	0.599	0.599	0.598	0.598	0.598
80	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
89	1.55	1.56	1.57	1.58	1.58	1.59	1.59	1.59	1.59
98	2.32	2.32	2.35	2.38	2.40	2.41	2.41	2.41	2.42
107	3.37	3.34	3.40	3.47	3.51	3.53	3.54	3.55	3.55
116	4.76	4.69	4.77	4.88	4.97	5.02	5.04	5.06	5.06
124	6.58	6.44	6.52	6.70	6.85	6.94	7.00	7.02	7.04
133	8.92	8.68	8.74	8.98	9.23	9.39	9.48	9.54	9.56
142	11.9	11.5	11.5	11.8	12.2	12.4	12.6	12.7	12.7
151	15.5	15.0	14.9	15.3	15.8	16.2	16.4	16.6	16.7
160	20.1	19.3	19.2	19.5	20.1	20.7	21.1	21.4	21.5
169	25.6	24.5	24.3	24.6	25.4	26.1	26.7	27.1	27.4
187	32.2	30.8	30.4	30.7	31.6	32.6	33.4	34.0	34.4
196	40.1	38.4	37.7	38.0	38.9	40.1	41.3	42.1	42.7
205	60.4	57.7	56.6	56.7	57.7	59.3	61.1	62.6	63.7
213	73.2	59.9	68.4	68.4	69.4	71.2	73.3	75.3	76.8
222	88.0	84.1	82.2	82.0	83.0	84.9	87.4	89.8	91.7

ПОУЗДАНОСТ

Поузданост R представља вероватноћу да ће коловозна конструкција на крају пројектног периода и датим условима средине поседовати индекс употребљивости већи или једнак од пројектованог ($\rho_t = 2.5$ или 2.0).

Пројектне вредности нивоа поузданости приказане су у табели 9.3.

Табела 9.3 Пројектне вредности нивоа поузданости

Разред пута	Ниво поузданости у процентима	
	градски	ванградски
Аутопутеви	85 до 99.9	80 до 99.9
I разреда и градске магистрале	80 до 99	75 до 95
II, III и IV разреда и сабирне улице	80 до 95	75 до 95
Локални путеви	50 до 80	50 до 80

Стандардно одступање S_o при процени будућег саобраћаја у зависности од локалних услова за круте коловозне конструкције је од 0.29 до 0.40.

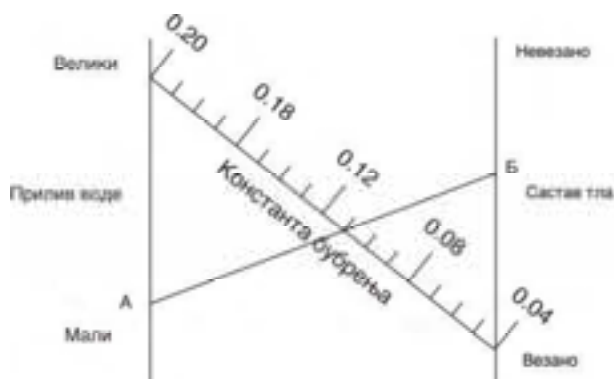
УТИЦАЈ СРЕДИНЕ

Утицај средине је представљен дејством мраза и бубрења.

Бубрење тла у постелици

Утицај бубрења тла на опадање употребљивости одређује се преко: константе бубрења, могућег вертикалног издизања и вероватноће бубрења.

Константа бубрења θ_s је фактор који се користи за оцену нивоа на коме ће се бубрење десити. Константа бубрења може се очитати са дијаграма на слици 9.1.



Слика 9.1 Дијаграм за очитивање константе бубрења

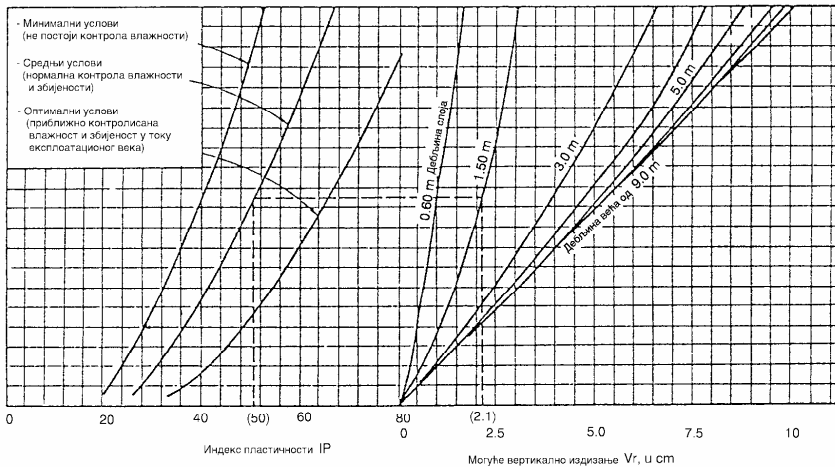
Начин употребе дијаграма је следећи:

- одреде се одговарајући услови прилива воде (на пример тачка А)
- одреди се састав тла (на пример тачка Б)
- прочита се константа бубрења (на пример 0.11)

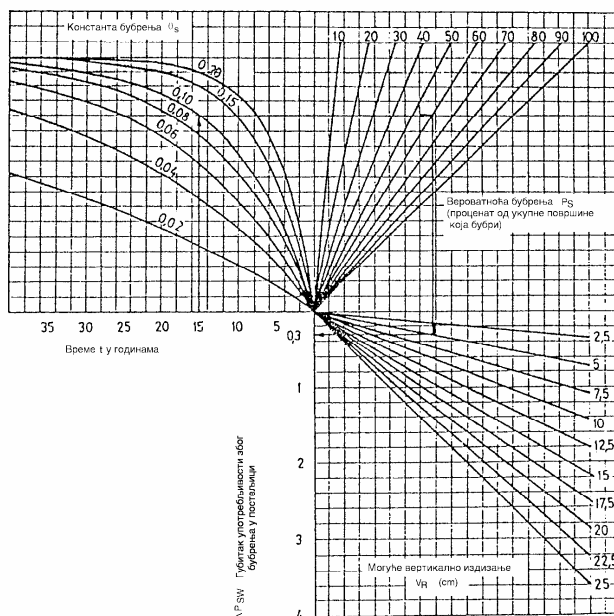
Могуће вертикално издизање V_R , представља вертикално издизање тла у постељици под екстремним условима бубрења (тј. висока влажност и пластичност). Ова вредност може бити одређена лабораторијским путем, емпиријски или бити усвојена. На слици 9.2 је приказан дијаграм за оцену могуће вредности издизања.

Вероватноћа бубрења представља део (изражен у процентима) од пројектоване деонице пута, на којој може да се појави бубрење. За одређену деоницу, сматра се да је вероватноћа бубрења 100 процената, ако је индекс пластичности тла у постељици већи од 30 и дебљина слоја већа од 60 cm (или ако је V_R веће од 0.5 cm).

Губитак употребљивости због бубрења тла у постељици може бити прочитан са дијаграма приказаног на слици 9.3.



Слика 9.2 Дијаграм за приближну процену могућег вертикалног издизања природног тла



Слика 9.3 Дијаграм за оцену губитка употребљивости због бубрења тла у постељици

Дејство мраза

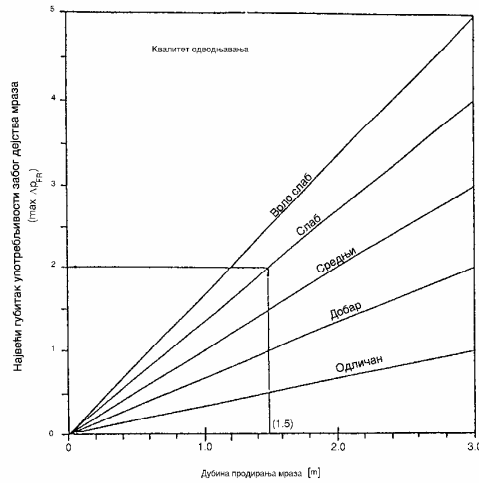
Феномен издизања тла због дејства мраза, по ефектима је сличан бубрењу. Он настаје када се слободна вода у постељици скупи, смрзне и формира ледено сочиво. Три основна параметра преко којих је дефинисано издизање због мраза су: константа издизања, максимални могући губитак употребљивости и вероватноћа издизања.

Константа издизања представља јединично дневно издизање због дејства мраза (у mm по дану) и може се у зависности од врсте тла у постељици очитати са слике 9.4.

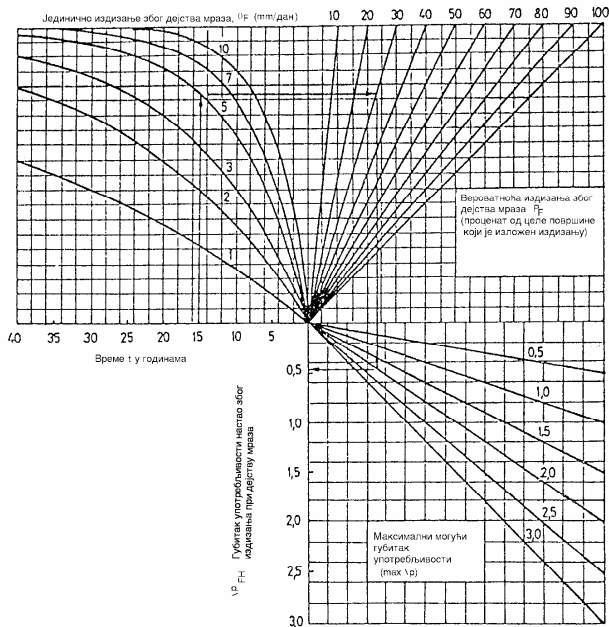
Максимални могући губитак употребљивости због издизања изазван дејством мраза, зависи од квалитета одводњавања и дубине продирања мраза (табела 9.4 и слика 9.5).

Табела 9.4 Квалитет одводњавања

Квалитет одводњавања	Вода се уклања са коловоза у року од
одличан	1 / 2 дана
добар	1 дана
осредњи	1 недеље
слаб	1 месеца
врло слаб	(вода се не одводи)



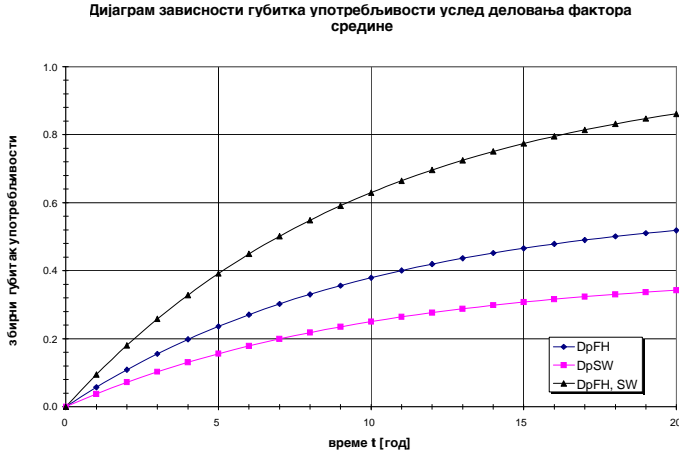
Слика 9.5 Дијаграм за процену максималног губитка употребљивости, настао због дејства мрзаца



Слика 9.6 Дијаграм за процену губитка употребљивости због издизања при дејству мрзаца

Дијаграмом са слике 9.6 решена је следећа једначина:

$$\Delta P_{FH} = 0.01 \cdot P_F \cdot (\max \Delta i_P) \cdot (1 - e^{(-0.02 \cdot \theta \cdot F \cdot t)}) \quad (9.3)$$



Слика 9.7 Дијаграм за оцену губитка употребљивости због дејства фактора средине у функцији времена за одређену деоницу пута

КРИТЕРИЈУМИ КВАЛИТЕТА

За оцену стања цементнобетонских коловоза користи се индекс садашње употребљивости "р", чије су вредности од 0 (разорен коловоз) до 5 (коловоз у одличном стању). Основна идеја у овом поступку пројектовања коловозних конструкција је да при предвиђеном обиму саобраћаја на крају пројектног века, коловозна конструкција поседује минимални ниво употребљивости "р_t".

Дозвољене минималне вредности индекса употребљивости дате су у табели 9.5.

Табела 9.5 Најмање дозвољене вредности индекса употребљивости, р_t

р _t	Процент корисника који сматра дато стање неприхватљивим	Разред пута
3.0	12	аутопут
2.5	55	аутопут и пут I разреда
2.0	85	путеви од II до IV разреда

Укупна промена индекса употребљивости у оквиру пројектног периода је:

$$\Delta p = p_o - p_t \quad (9.4)$$

где је:

Δp - промена индекса употребљивости

p_o - индекс употребљивости на почетку пројектног периода

p_t - индекс употребљивости на крају пројектног периода

КАРАКТЕРИСТИКЕ МАТЕРИЈАЛА

У оквиру карактеристика материјала дефинисани су стварни повратни модул реакције подлоге, карактеристике материјала у слојевима коловозне конструкције, модул лома и коефицијенти слојева.

КАРАКТЕРИСТИКЕ НЕВЕЗАНИХ МАТЕРИЈАЛА

Основни показатељи носивости слојева од неvezаних материјала су: еластични или повратни модул E_e , модул реакције подлоге K , калифорнијски индекс носивости CBR, модул деформације E_d и модул стишљивости E_s .

Стварна носивост модула реакције подлоге K , испод цементнобетонске плоче, зависи од повратног модула на постељици, модула еластичности на доњој подлози, дебљине подлоге и пројектоване дебљине цементнобетонске плоче. Измерене и израчунате податке табеларно приказати (табела 9.6).

Табела 9.6 Изглед табеле за прорачун стварног модула реакције подлоге

Тип доње подлоге:

Дебљина доње подлоге:

Губитак носивости LS:

Дубина до круте подлоге d_k (испод постељице):

Пројектована дебљина плоче:

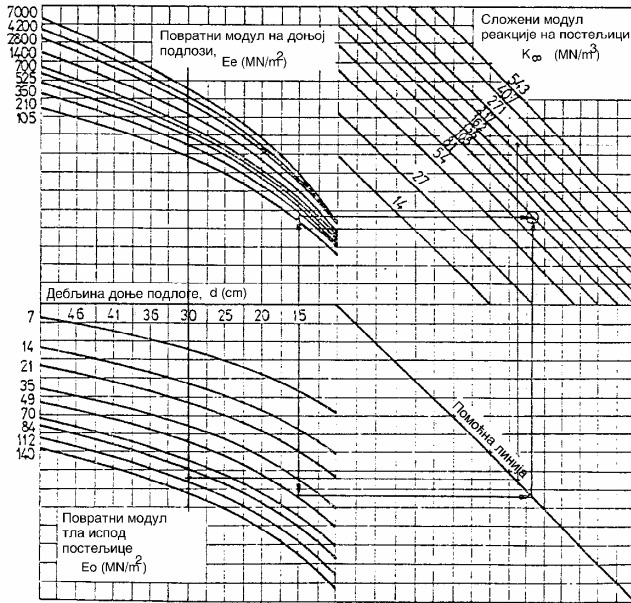
Месец	Модул у постељици E_o [MN/m ²]	Модул у доњој подлози E_s [MN/m ²]	Сложена вредност K_∞ [MN/m ³] (слика 8.8)	Вредност K , на крутој подлози [MN/m ³] (слика 8.9)	Релативно оштећење u_r (слика 8.10)
1	2	3	4	5	6
Јануар					
Фебруар					

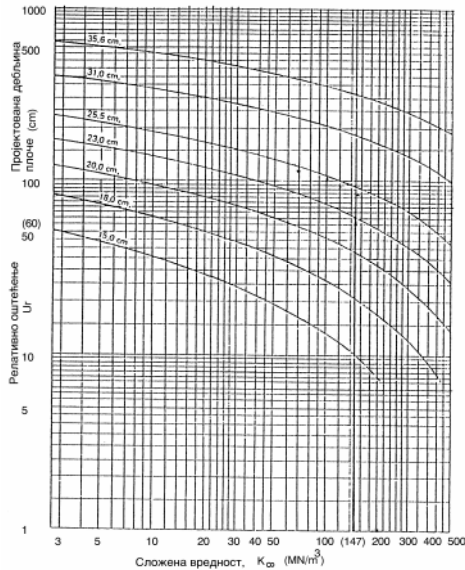
* тако редом до децембра

Затим сумирати укупно оштећење и одредити просечну вредност

Стварни модул реакције тла на постељици, K [MN/m³] =

Кориговани модул реакције K због губитка носивости [MN/m³] =





Слика 9.10 Дијаграм за оцену релативног оштећења крутих коловоза на основу дебљине плоче и носивости подлоге

Пошто нема јединствене математичке корелације између модула реакције постелице као флуида и повратног модула постелице као чврстог тела, могуће су разне математичке везе између K и M_r . Свака од таквих релација се анализира и зависе од тога да ли се напони или дефлексије пореде или се примењено оптерећење поставља на ивицу, у средину или у угао плоче. Уколико је цементнобетонска плоча постављена директно на постелицу (без подлоге), тада се модул реакције постелице K , на основу предлога AASHTO 1986 [4], израчунава помоћу израза:

$$k = \frac{M_r}{19.4} \quad (9.5)$$

где је:

k - модул реакције подлоге (pci) (1 pci = 271.3 kN/m³)

M_r - повратни модул (psi) (1 psi = 6.9 kN/m²)

Овај израз је одређен из односа примењеног притиска и дефлексије и то:

$$k = \frac{q}{w_o} = \frac{2M_r}{\pi \cdot (1 - \nu^2) \cdot a} \quad (9.6)$$

где је:

ν - Поасонов коефицијент
 a - радијус контактне површине

Ако је пак, између плоче и постелице постављен још један слој, онда се примењује поступак са дијаграма (слике 9.8 до 9.10).

КАРАКТЕРИСТИКЕ ВЕЗАНИХ МАТЕРИЈАЛА

Основни показатељи носивости слојева од материјала везаних цементом или битуменом су модул еластичности или модул крутости.

ЦЕМЕНТОМ ВЕЗАНИ МАТЕРИЈАЛИ

Модул еластичности цементног бетона E , представља однос напона и еластичне повратне деформације при краткотрајном оптерећењу и растерећењу. У недостатку експерименталних истраживања, почетни модул еластичности цементног бетона старости од 28 дана може бити одређен из емпиријског обрасца:

$$E = 9.25 \cdot \sqrt[3]{\beta_{ks} + 10} \text{ [GPa]} \quad (9.7)$$

где је:

$$\beta_{ks} = 1.15 \times \beta_k$$

β_k - средња вредност чврстоће при притиску на коцкама ивице 20 см после 28 дана (марка бетона [MPa])

Чврстоћа на затезање при савијању β_{zs} одређује се на призмама димензија 12 x 12 x 36 см или 20 x 20 x 60 см.

Дозвољени напон на затезање при савијању је одређен помоћу обрасца:

$$\sigma_{zs, doz} = \frac{\beta_{zs}}{Fs} \quad (9.8)$$

где је:

$\sigma_{zs, doz}$ - дозвољени напон при затезању код савијања

β_{zs} - чврстоћа при затезању код савијања (оптерећење делује у трећинама распона)

Fs - фактор сигурности (у пракси најчешће $Fs = 1.33$), табела 9.7.

Табела 9.7 Коefицијенти сигурности

Број поновљених оптерећења која изазивају лом конструкције	Коefицијенти сигурности F_s
5000	1.33
10000	1.52
25000	1.68
50000	1.84
75000	1.94
1000000 или више	2.00

КАРАКТЕРИСТИКЕ КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

Карактеристике коловозне конструкције су њен оријентациони попречни профил, одводњавање, преношење оптерећења и губитак носивости.

РАЧУНСКА ШЕМА

Шематски приказ рачунског модела, са карактеристичним параметрима материјала приказан је на слици 9.11.



Слика 9.11 Рачунска шема круте коловозне конструкције

* двајајућа фолија од термопластичног материјала дебљине 65 до 125 μm .

ОДВОДЊАВАЊЕ

У зависности од квалитета одводњавања и процента времена у току године када је коловозна конструкција изложена нивоу влажности блиском засићењу, препоручене су следеће вредности коefицијената дренаирања C_d (табела 9.8).

Табела 9.8 Препоручене вредности коефицијента дренарања S_d

Квалитет одводњавања	Процент од времена у току године када је коловозна конструкција изложена нивоу влажности блиском zasiћењу			
	испод 1%	1 до 5%	5 до 25%	изнад 25%
одличан	1.25 до 1.20	1.20 до 1.15	1.15 до 1.10	1.10
добар	1.20 до 1.15	1.15 до 1.10	1.10 до 1.00	1.00
средњи	1.15 до 1.10	1.10 до 1.00	1.00 до 0.90	0.90
слаб	1.10 до 1.00	1.00 до 0.90	0.90 до 0.80	0.80
врло слаб	1.00 до 0.90	0.90 до 0.80	0.80 до 0.70	0.70

ПРЕНОШЕЊЕ ОПТЕРЕЋЕЊА СА ПЛОЧЕ НА ПЛОЧУ

Могућност преношења оптерећења преко прекида, попут спојница или пукотина, је приказана коефицијентом преношења оптерећења J . Више вредности коефицијента J одговарају нижим вредностима модула реакције подлоге K , вишим термичким коефицијентима и већим променама температуре.

Ако су примењени можданици на спојницама коефицијент преношења оптерећења треба да буде $J = 3.2$, а ако нису онда је од 3.8 до 4.4.

Ивичне траке од цементног бетона морају бити анкероване за коловоз.

ГУБИТАК НОСИВОСТИ

Коефицијент губитка носивости LS обухвата могући губитак носивости због ерозије подлоге или различитих вертикалних померања у тлу постељице. Типичне вредности су приказане у табели 9.9.

Табела 9.9 Типичне вредности коефицијента губитка носивости LS

Врста материјала	Губитак носивости LS
Цементом стабилована шљунковита подлога ($E = 7000$ до 14000 МПа)	0.0 до 1.0
Стабилизација цементом локалног агрегата ($E = 3500$ до 7000 МПа)	0.0 до 1.0
Битуменизирани шљунак или дробљени агрегат ($E = 3000$ до 2100 МПа)	0.0 до 1.0
Стабилизација кречом ($E = 150$ до 500 МПа)	1.0 до 3.0
Невезани шљунковити материјал ($E = 100$ до 300 МПа)	1.0 до 3.0
Финозрни или природни материјал у постељици ($E = 20$ до 300 МПа)	2.0 до 3.0

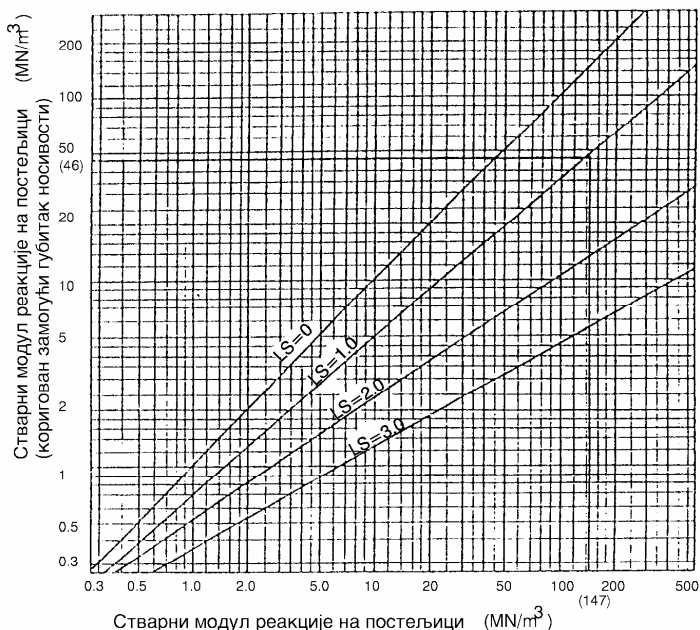
E је модул еластичности или повратни модул.

Губитак носивости настаје и због различитих вертикалних кретања воде у тлу, односно, због скупљања испод коловоза. Вредности коефицијента губитка носивости LS , за глиновита тла подложна бубрењу и издијању због дејства мрза, су од 2.0 до 3.0. Утицај вредности LS на смањење стварне носивости K у постељници је приказан на слици 9.12.

ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ

Одређивање дебљине плоче се обавља помоћу једначине или дијаграма (слика 9.13), уз познавање следећих параметара:

- А. Стварног модула реакције на подлози испод плоче K
- Б. Процењеног будућег саобраћаја ESD
- Ц. Поузданости R
- Д. Највећег стандардног одступања S_o
- Е. Пројектованог губитка употребљивости $\Delta p = p_o - p_t$
- Ф. Модула еластичности бетона E
- Г. Дозвољеног напона на затезања при савијању σ_{zsd0z}
- Х. Коефицијента преношења оптерећења J
- И. Коефицијента одводњавања C_d



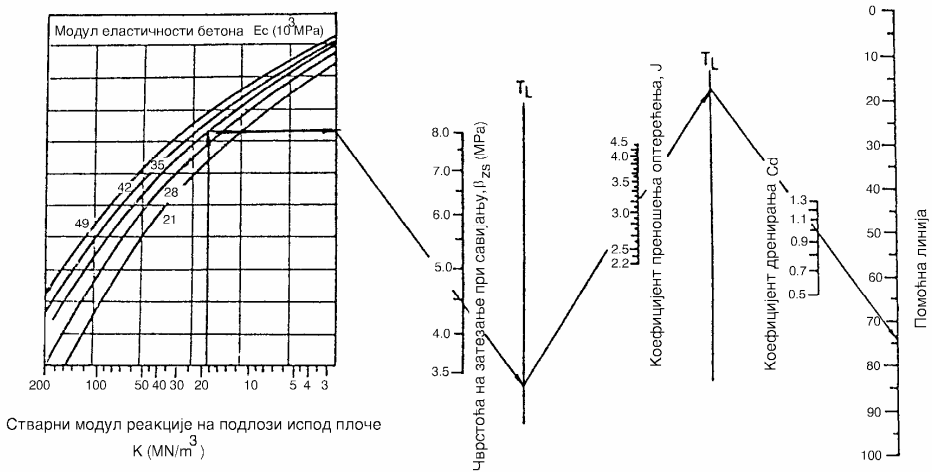
Слика 9.12 Корекција стварног модула реакције постељнице услед губитка носивости у доњој подлози

У зависности од економских и осталих параметара, пројектант бира оптималну комбинацију дебљине бетонске плоче и слојева испод ње.

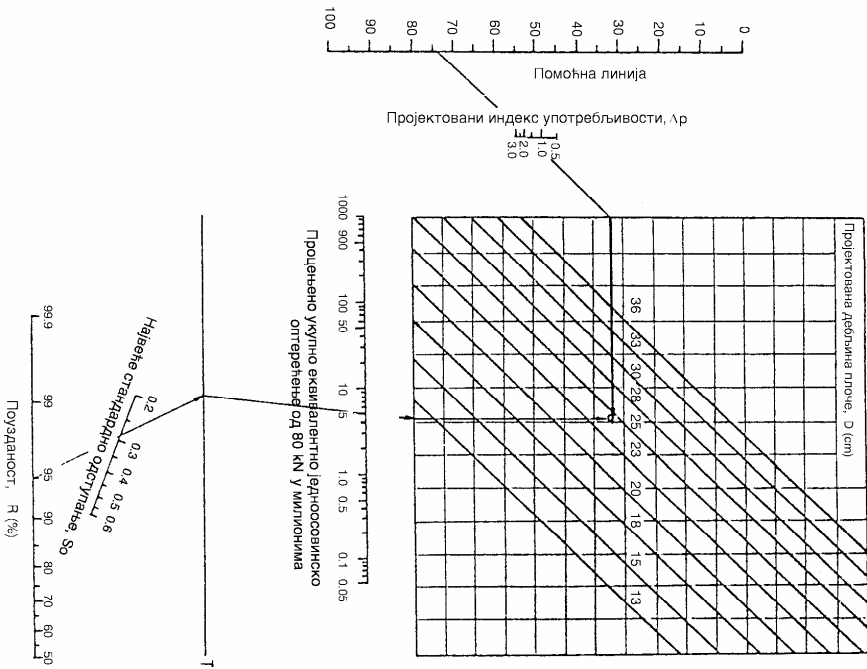
Једначина је следећег облика:

$$\log_{10} ESO_{80} = Z_R S_o - 3.035 + 7.35 \cdot \log(D + 2.54) + \frac{\log\left(\frac{\Delta p}{4.5 - 1.5}\right)}{1 + \frac{4.320 \cdot 10^{10}}{(D + 2.54)^{8.46}}} + \dots$$

$$\dots + (4.22 - 0.32 \cdot p_t) \cdot \log \left[\frac{0.673 \cdot \beta_{zs} \cdot C_d \cdot (D^{0.75} - 2.278)}{J \cdot \left[D^{0.75} - \frac{14.796}{\left(\frac{E}{K}\right)^{0.25}} \right]} \right] \quad (9.9)$$



Слика 9.13а Дијаграм за одређивање дебљине бетонске плоче (I део)



Слика 9.13б Дијаграм за одређивање дебљине бетонске плоче (II део)

ПРИМЕР:

Нека је за један магистрални пут, са по две траке у сваком смеру, пројектни период једнак периоду до прве рехабилитације и износи 20 година. На основу анализе саобраћајног оптерећења, оно у првој години износи 357 000 стандардних оовина од 80 kN, уз очекивану стопу раста саобраћаја од 3%.

Сезонске вредности повратног модула тла у постељици су:

месец	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Mr (MPa)	80	80	20	20	50	50	50	50	50	50	30	30

На основу геотехничких истраживања је закључено да тло у постељици није осетљиво на бубрење и дејство мраза. На дубини од 8 метара се налази чврст, недеформабилан слој.

Саобраћајно оптерећење за пројектни период од 20 година је:

$$ESO = 0.5 \cdot 0.9 \cdot 357000 \cdot \frac{1.03^{20} - 1}{0.03} = 4.32 \cdot 10^6 \text{ ст. ос. од } 80 \text{ kN, и спада у}$$

тешко саобраћајно оптерећење.

Сложени модул реакције подлоге по сезонама је приказан табеларно:

Месец	Постељица, Mr (MPa)	Подлога, E ₁ (MPa)	Сложени модул реакције подлоге K (MN/m ³)	Релативно оштећење Ur (%)
1	2	3	4	5
јануар	80	200	180	34
фебруар	80	200	180	34
март	20	100	40	65
април	20	100	40	65
мај	50	150	110	44
јун	50	150	110	44
јули	50	150	110	44
август	50	150	110	44
септембар	50	150	110	44
октобар	50	150	110	44
новембар	30	120	65	54
децембар	30	120	65	54
ΣUf =				570

Средња вредност оштећења је: $\overline{U_f} = \frac{570}{12} = 47.5$

За претпостављену дебљину подлоге од шљунка од 20 см, ефективни модул реакције подлоге износи: $K_{\text{eff}} = 92 \text{ MN/m}^3$.

За усвојени коефицијент губитка употребљивости $LS = 1$ (границе су од 1 до 3 за подлогу од невезаног агрегата), добија се коригована вредност модула реакције подлоге од $K_{\text{eff, u}} = 40 \text{ MN/m}^3$.

Губитак употребљивости у току пројектног периода износи:

$$\Delta\rho = 4.5 - 2.5 = 2.0.$$

Ниво поузданости $R = 95\%$, стандардно одступање $So = 0.35$.

Коефицијент преношења оптерећења $J=2.8$, пошто се ради о коловозу са бетонским ивичним тракама (границе су $J = 2.5 - 3.1$).

Предвиђена је употреба цементног бетона МВ 35.

Модул еластичности бетона је: $E = 9.25 \cdot \sqrt[3]{35+10} = 32900 \text{ МПа}$.

Чврстоћа на затезање при савијању бетона је $\sigma_{zs} = 4.4 \text{ МПа}$.

Дренажа: добра.

Процент времена када је тло изложено засићењу влагом: 15%, из чега следи да је коефицијент засићења $Cd = 1.05$.

Потребна дебљина бетонске плоче је $d = 22 \text{ cm}$.

Усвајају се можданици $\phi 25$, дужине 65 cm, на растојању од 30 cm.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Wetergaard H.M., *Theory of Concrete Pavement Design*, Proc. Highway Research Board, 1927.
- [2] Wetergaard H.M., *New Formula for Stresses in Concrete Pavements of Airfields*, Trans. ASCE, 1948.
- [3] Pickett G. and Ray G.K., *Influence Charts for Concrete Pavements*, Trans. ASCE, 116, 1951.
- [4] *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, 1986.
- [5] Yang H. Huang, *Pavement Analysis and Design*, Second Edition, Pearson Prentice Hall Inc., 2004.

10

ПОСТУПАК ЗА ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ККК (AASHTO) 2004.

10.1 ПОСТУПАК ЗА ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ КРУТИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА АМЕРИЧКЕ УПРАВЕ ЗА ЈАВНЕ ПУТЕВЕ И ТРАНСПОРТ (AASHTO) 2004. (НОВЕ И РЕКОНСТРУКЦИЈЕ) [1]

У овом поглављу су приказани основни кораци при димензионисању крутих коловозних конструкција од цемент бетонских плоча повезаних спојницама (подужне и попречне), које преносе силе са плоче на плочу помоћу можданика.

На сличан начин су приказани и основни кораци при димензионисању континуално армираних крутих коловозних конструкција.

10.1.1 КРУТЕ КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ СА ПОДУЖНИМ И ПОПРЕЧНИМ СПОЈНИЦАМА

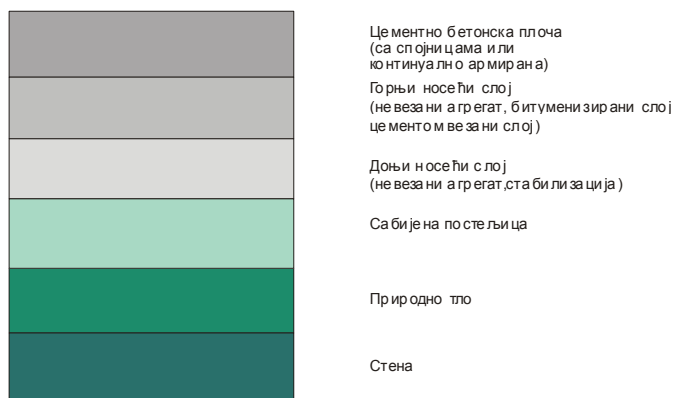
Овај поступак је итеративан, за оба типа конструкција и његови основни кораци су:

1. објединити пробне прорачуне за одређене услове који се очекују на деоници (саобраћај, клима, услови фундарања), дефинисати распоред слојница, врсту цементног бетона и карактеристике других материјала који могу да послуже за израду коловозне конструкције, и услове за пројектовање и грађење

2. установити критеријуме прихватљиве за понашање коловозне конструкције на крају пројектног периода (прихватљиви ниво пукотина и слегања за коловозне конструкције са спојницама, пробој конструкције за континуално армиране, IRI за оба типа)
3. одабрати жељени ниво поузданости за сваки показатељ понашања коловозне конструкције
4. употребити Упутство [1] за рачунарски програм ради задовољења следећих параметара:
 - a. месечних вредности о саобраћајном оптерећењу, карактеристикама материјала, неопходних климатских података потребних за оцену пројекта током целог пројектног периода
 - б. израчунати утицаје у конструкцији (напоне и дефлексије) употребом МКЕ (метод коначних елемената) узимајући у обзир тип осовине и оптерећења и за сваки прорачун инкремента оштећења током пројектног периода
 - ц. израчунати кумулативно месечно оштећење за сваки месец током пројектног периода
 - д. предвидети кључна оштећења (слегање спојница, пуцање плоча, пробоје конструкције) по месецима током пројектног периода употребом калибрисаног механичко-емпиријског модела приказаног у овом Упутству
 - е. предвидети равност (IRI) у функцији почетног IRI, оштећења која настају током времена и факторе средине на крају сваког временског инкремента
5. оценити очекивано понашање коловозне конструкције у пробном прорачуну за задату вероватноћу
6. модификовати прорачун и поновити 4. и 5. корак, ако је неопходно да прорачун задовољи установљене критеријуме

Димензионисања која задовољавају циљне критеријуме са одређеном вероватноћом, сматрају се изводљивим са конструктивног и функционалног гледишта и могу се употребити за наредна разматрања.

Шематски приказ једног могућег решења круте коловозне конструкције је приказан на слици 10.1.

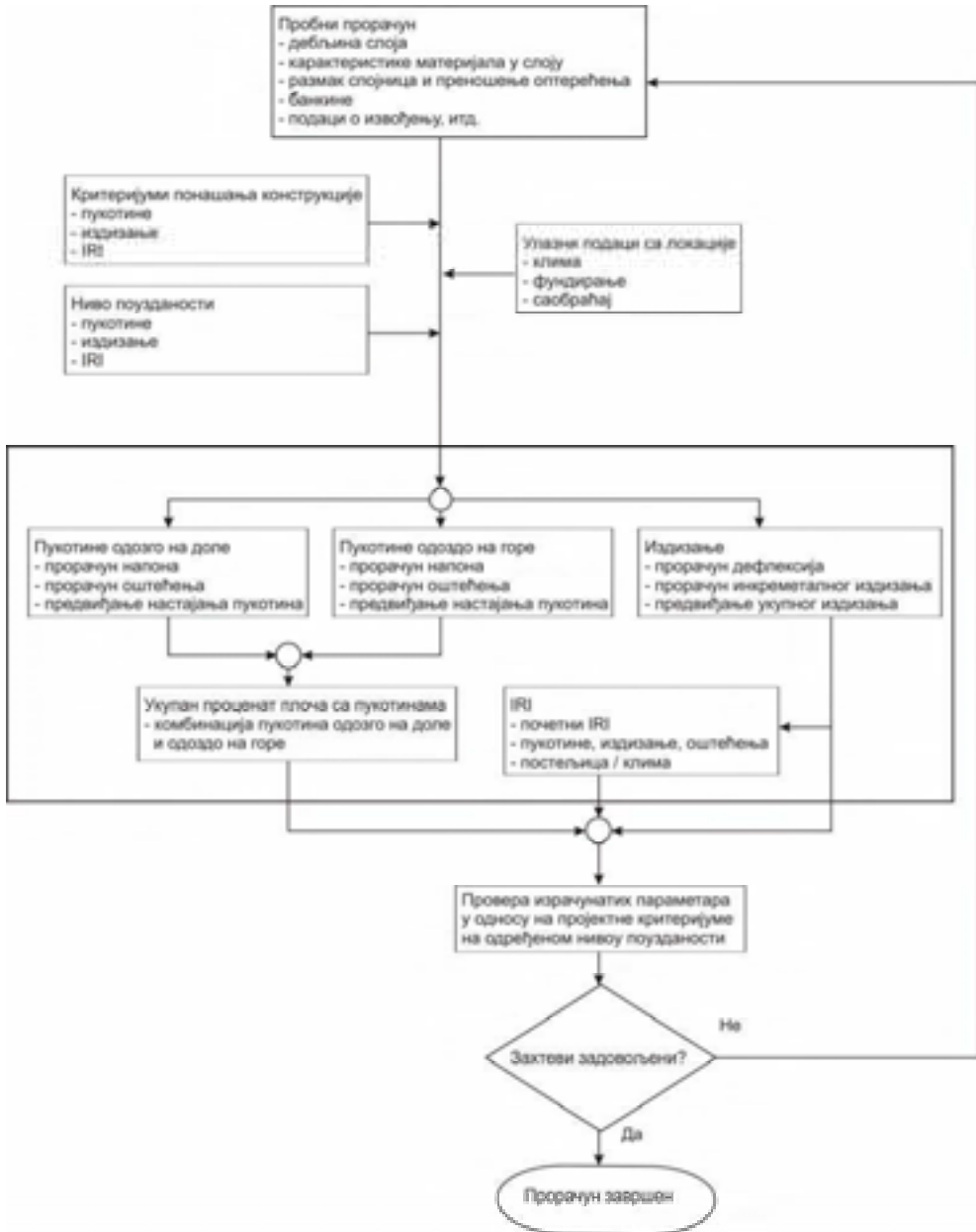


Слика 10.1 Шематски приказ круте коловозне конструкције

На слици 10.2 је приказан шематски алгоритам помоћу којег функционише рачунарски програм за димензионисање коловозне конструкције са спојницама.

И овде, као и код флексибилних коловозних конструкција, постоје три нивоа улазних података и то:

1. **Ниво 1** - улазни подаци са карактеристикама материјала који су у зони трасе, а одређени су директним мерењима током лабораторијских испитивања, мерењем обима саобраћаја и његовог оптерећења
2. **Ниво 2** - захтевани улазни подаци су добијени корелацијом. На овакав начин се добијају подаци о повратном модулу постелице или неvezаном материјалу за носећи слој из вредности CBR-а или R вредности употребом емпиријских корелација
3. **Ниво 3** - улазни подаци су на нивоу националних или регионалних стандардних података. Тако је класификован земљани материјал по AASHTO поступку ради одређивања повратног модула, а и саобраћајно оптерећење према типу пута и типу камиона, због одређивања осовинског оптерећења



Слика 10.2. Шематски приказ алгоритма за димензионисање коловозне конструкције са спојницама

Улазни подаци за димензионисање нове круте коловозне конструкције са спојницама су следећи:

1. опште информације
 - а. пројектни период
 - б. годишњи период током којег ће се изводити радови
 - ц. месец у коме ће бити пуштен саобраћај
 - д. тип коловозне конструкције
2. идентификација деонице
 - а. локација деонице
 - б. идентификациони параметри пројекта (ID - пројекта, ID - деонице, почетна и крајња стационажа, смер кретања саобраћаја)
3. анализе параметара
 - а. почетна пројектна вредност индекса равности (IRI - International Roughness Index) чија је вредност од 50 до 100 in/mi (1 in = 2.54 cm, 1 mi = 1609 m)
 - б. критеријуми понашања - попречне пукотине у плочама, издизање попречних спојница, ширина пукотина, глаткост хабајуће површине
4. саобраћај
 - а. обим саобраћаја - месечна расподела
 - б. расподела возила по класама
 - ц. часовна расподела камионског саобраћаја
 - д. фактор раста саобраћаја
 - е. фактори осовинског оптерећења
 - ф. општи подаци о саобраћају (средња позиција точка, ширина саобраћајне траке, број типова осовина по класи камиона, конфигурација осовина, путања точка)
5. клима
 - а. температуре ваздуха по сату током пројектног периода
 - б. падавине по сату током пројектног периода
 - ц. брзина ветра по сату током пројектног периода
 - д. проценат сунчаних интервала по сату током пројектног периода
 - е. релативна влажност околине по сату
 - ф. сезонски или константни ниво подземне воде на деоници
 - г. утицаји климе на понашање круте коловозне конструкције (температурна разлика у радијацији на врху и на дну цементно бетонске плоче, витоперење услед влажности, трајно извијање и витоперење)
6. карактеристике дренаже и хабајуће површине

- a. моћ апсорпције коловозне површине (зависи од боје и текстуре)
 - б. могућност инфилтрације (мала, средња и екстремна)
 - ц. попречни нагиб застора
 - д. дужина дренажног пута
7. композиција коловозне конструкције (могуће су разне комбинације слојева, као на слици 10.1)
- a. застор је увек од цементног бетона
 - б. двослојна конструкција је минимум који може да буде анализиран
 - ц. само један слој од невезаног агрегата може да буде постављен између два стабилована слоја
 - д. најнижа два слоја у конструкцији морају да буду од невезаног агрегата
8. пројектне карактеристике
- a. на ефективну температуру која изазива трајно витоперење и кривљење цементно бетонских плоча утичу:
 - клима (температура ваздуха, сунчево зрачење, релативна влажност, брзина ветра) током уграђивања бетона
 - време током којег се уграђује и негује бетон (јутарњи сати са интензивним сунчевим зрачењем и повећањем температуре хидратације, ноћни сати без сунчеве радијације, тип сложеног неговања бетона, влажно неговање)
 - карактеристике цементно бетонске мешавине (тип цемента, водоцементни фактор, садржај воде, количина цемента и тип агрегата)
 - течење цемент бетонске плоче услед сопствене масе и ивичних ограничења
 - врста подлоге и њене карактеристике
 - б. карактеристике цементно бетонских плоча
 - растојање спојница
 - пречник и растојање можданика
 - врста заптивне смесе
 - врста ослањања ивица цементно бетонских плоча
 - еродибилност подлоге
 - тип везе између стабиловане подлоге и цементно бетонске плоче

У овом поступку за димензионисање се разматрају параметри:

- дебљина плоче
- ширина плоче

- материјали за цементни бетон
- растојање између спојница
- коефицијент преношења оптерећења у попречним спојницама - LTE
- дубина сечења попречних спојница
- преношење оптерећења у подужним спојницама и њихове везе
- дубина сечења подужних спојница
- подлога
- доња подлога
- подповршинска дренажа
- обликовање банкина
- побољшање постелице

10.1.2 КОНТИНУАЛНО АРМИРАНЕ КРУТЕ КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

И овај поступак је итеративан, те и за њега важе општи кораци као и за круте коловозне конструкције са спојницама, који су наведени у претходном поглављу. И овде постоје три нивоа улазних података.

Шематски алгоритам функционисања рачунарског програма за димензионисање континуално армираних крутих коловозних конструкција је приказан на слици 10.3.

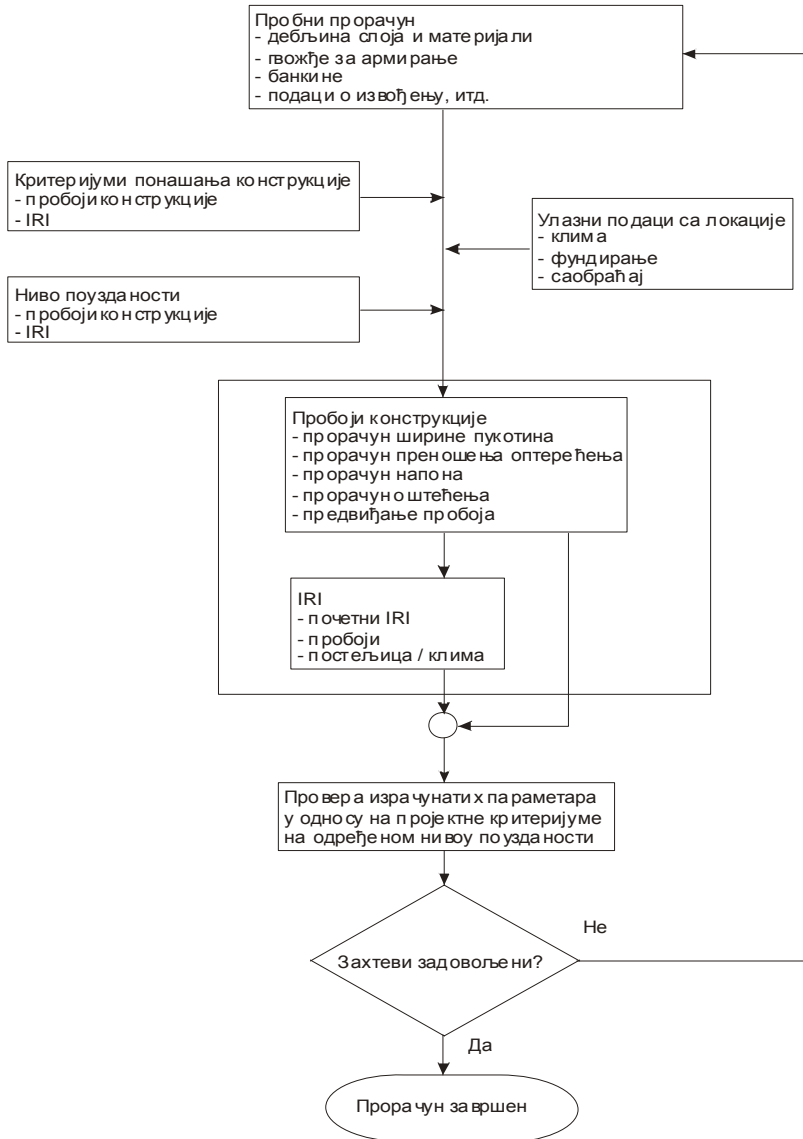
Током поступка димензионисања непрекидно армираних коловоза, посебну пажњу треба обратити на:

- проценат подужне арматуре која контролише отварање попречних пукотина (ширина пукотина у нивоу арматуре има есенцијално значење, мора бити мање од 0.02 in (1 in = 2.54 cm))
- карактеристике подлоге
- растојање пукотина, ширина пукотина и коефицијент преношења оптерећења кроз пукотине
- тип банкине

При димензионисању непрекидно армираних крутих коловозних конструкција, разматрају се следећи параметри:

- дебљина плоче
- растојање попречних пукотина и њихова ширина
- материјали за цемент бетон
- подужна арматура
- дубина на коју треба поставити подужну арматуру
- коефицијент преношења силе кроз попречне пукотине
- ширина плоче
- попречна арматура
- преношење оптерећења кроз подужне спојнице и њихове везе
- отворени жлеб у подужној спојници (1/3 од дебљине плоче)
- подлога

- доња подлога
- подповршинско одводњавање
- облик и конструкција банке
- побољшање постелјице



Слика 10.3 Функционални алгоритам за димензионисање непрекидно армираних крутих коловозних конструкција

Према литератури [2], која може да буде корисна у избору пробног прорачуна, он треба да садржи следеће показатеље коловозне конструкције :

- чврстоћу цементног бетона
- пробну дебљину плоче која зависи од нивоа саобраћајног оптерећења, карактеристика цементног бетона и климе. Препоручене дебљине за плоче без ивичног ослонца су:
 - лако саобраћајно оптерећење < 1000 возила, двосмерни пут $d = 8.0$ in или мање (1 in = 2.54 cm)
 - средње саобраћајно оптерећење до 3000 возила, двосмерни пут, $d = 9.0 - 10.0$ in (1 in = 2.54 cm)
 - тешко саобраћајно оптерећење > 3000 возила, двосмерни пут, $d > 10.0$ in или више (1 in = 2.54 cm)
- проценат армирања
- врсту подлоге и доње подлоге
- начин ивичног ослањања
- модел предвиђања ломова конструкције
- модел утицаја у конструкцији

Ако пројектовани параметри задовољавају постављене критеријуме, прорачун се може користити за даље анализе, а ако нису испуњени, онда се понављају кораци као на слици 10.3.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures 1-37A*, Final Report, Part 3. Design Analysis. Chapter 4 Design of New and Reconstructed Rigid Pavements, NCHRP, March 2004.
- [2] Darter M.I, H.L. Von Quintus, Y.J. Jiang, E.B. Owusu-Antwi, and B.M. Killingsworth, *Catalog of Recommended Design Features (CD-ROM)*, NCHRP Project 1-32, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C, 1997.
- [3] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures 1-37A*, Final Document. Appendix QQ: Structural Response Models For Rigid Pavements, NCHRP, July 2003.
- [4] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures 1-37A*, Final Document. Appendix FF: Calibration Sections for for Rigid Pavements, NCHRP, August 2003.
- [5] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures 1-37A*, Final Document. Appendix JJ: Transverse Joint Faulting Model, NCHRP, August 2003.
- [6] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures 1-37A*, Final Document. Appendix KK: Transverse Cracking of JPCP, NCHRP, August 2003.
- [7] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures 1-37A*, Final Document. Appendix LL: Punchouts in Continuously Reinforced Concrete Pavements, NCHRP, July 2003.
- [8] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures 1-37A*, Final Document. Appendix PP: Smoothness Prediction For Rigid Pavements, NCHRP, August 2001.
- [9] *Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures 1-37A*, Final Document. Appendix QQ: Structural Response Models For Rigid Pavements, NCHRP, July 2003.

11 SUPERPAVE СИСТЕМ ЗА ПРОЈЕКТОВАЊЕ БИТУМЕНОМ ВЕЗАНИХ МАТЕРИЈАЛА

11.1 УВОД

Систем SUPERPAVE (акроним за SUperior PERforming asphalt PAVements) је настао у оквиру Стратешког програма истраживања у области путева (Strategic Highway Research Program - SHRP, 1987. - 1993.), а намењен је за пројектовање асфалтних мешавина справљених по топлом поступку (Superpave Hot Mix Asphalt - SHMA) са максималном величином зрна од 9.5 mm, 12.5 mm, 19.0 mm, 25.0 mm или 37.5 mm.

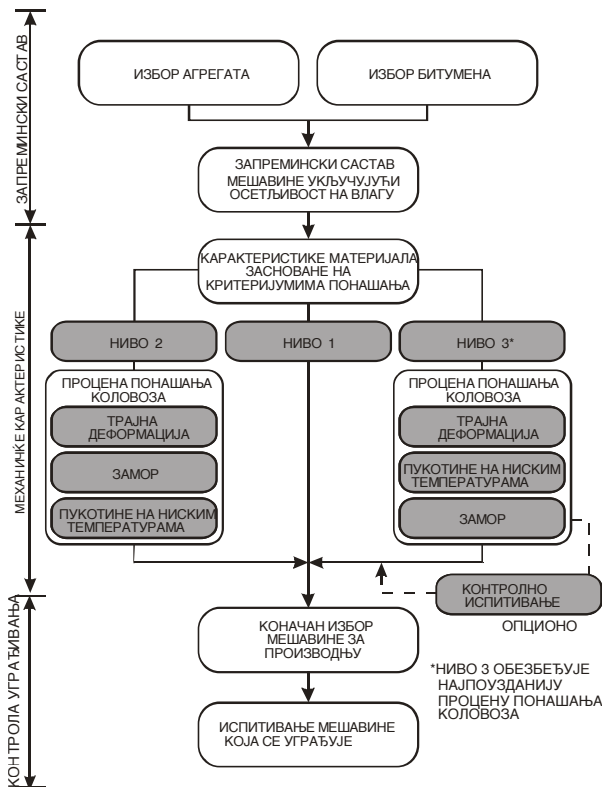
11.2 СИСТЕМ SUPERPAVE ЗА ПРОЈЕКТОВАЊЕ МЕШАВИНА

Циљ система SUPERPAVE је да се дефинишу карактеристике везива и агрегата и њихов оптимални однос, на основу којих се може предвидети понашање битуменом везаних материјала у слојевима коловозне конструкције у фази експлоатације, као и да се развију поступци за поуздано мерење тих карактеристика. Његова предност у односу на до сада примењиване поступке је у мерењу и повезивању реолошких карактеристика мешавине са понашањем коловозне конструкције у фази експлоатације. Код конвенционалне методе Маршал за пројектовање асфалтних мешавина, основни циљ је одређивање оптималне количине

везива, док је код SUPERPAVE то далеко комплексније: избор материјала, запреминско учешће агрегата и везива и оцена сабијене мешавине.

Прва особеност SUPERPAVE система је да се за критеријуме при избору пројектоване мешавине користи основни квалитет материјала који улази у састав мешавине и међусобни однос карактеристика које зависе од средине и оптерећења. Друга особеност су критеријуми за пројектовање битуменом везаних мешавина, засновани на понашању уграђених мешавина (дубине колотрага, захваћене површине пукотинама од замора и пукотинама од ниских температура насталих у оквиру пројектног периода). Трећа, је одређивање квалитета коловоза на основу међусобног односа коловозне конструкције, саобраћаја и средине, са асфалтном мешавином.

Из концепта SUPERPAVE система за пројектовање мешавина, приказаном на слици 11.1, јасно је да са расположивим материјалима треба постићи одређени ниво квалитета коловоза у сагласности са саобраћајем, саставом и поузданошћу.



Слика 11.1 Концепт система SUPERPAVE

Поступак пројектовања битуменом везаних мешавина системом SUPERPAVE формулисан је на 3 нивоа (слика 11.1) у зависности од очекиваног

саобраћајног оптерећења (табела 11.1). Процена је да ће се за већину пројеката користити ниво 1, а да ће се нивои 2 и 3 користити за пројектовање битуменом везаних мешавина за путеве са изузетно великим саобраћајним оптерећењем.

Табела 11.1 Подела нивоа система SUPERPAVE према саобраћајном оптерећењу

Пројектни ниво	Пројектно саобраћајно оптерећење (ЕСО од 80 kN)
1 (низак)	$\leq 10^6$
2 (средњи)	$\leq 10^7$
3 (висок)	$> 10^7$

11.3 ПРИНЦИПИ ПРОЈЕКТОВАЊА АСФАЛТНИХ МЕШАВИНА ПО SUPERPAVE-у

Четири основна корака у пројектовању по SUPERPAVE-у су:

- избор материјала
- избор састава минералне мешавине
- избор потребне количине везива
- оцена осетљивости на влагу

11.3.1 ИЗБОР МАТЕРИЈАЛА

Први критични корак у процесу пројектовања мешавина SUPERPAVE је избор материјала сагласно захтевима саобраћаја и средине који се очекују у оквиру пројектног периода. Пројектовање мешавина такође зависи и од цене и расположивости материјала. Физичко механичке карактеристике, контролне тачке, забрањене зоне и гранични појасеви за поједине фракције агрегата дати су посебним техничким условима [1]. У табели 11.2 су представљене препоручене максималне величине зрна агрегата за слојеве у коловозним конструкцијама.

Табела 11.2 Препоручене максималне величине зрна агрегата

Слој у коловозу	Максималне величине зрна агрегата
хабајући	9.5 - 12.5 mm
везни	25.0 - 37.5 mm
подлога	25 - 37.5 mm

Поред гранулометријског састава и облика зрна (изломљеност површине и облик зрна), испитују се и отпорност агрегата на хабање, односно дробљивост ивица (Los Angeles опит), отпорност на дејство мрза (дефинише се преко процента оштећења под дејством магнезијум или натријум сулфата) и чистоћа агрегата (садржај органских материја).

Избор карактеристика битумена заснива се на смањењу могућности појаве трајних деформација, пукотина од замора и пукотина изазваних ниским температурама. Карактеристике које су предложене техничким условима су развијене тако да се односе на сваки вид оштећења коловозних конструкција, посебно узимајући у обзир сам механизам настајања оштећења и улогу везива у том процесу.

За испитивање везива користе се основне методе и специфична опрема:

- симулација старења битумена
- реометар са гредом оптерећеном на савијање
- реометар за динамичко смицање
- опит директног затезања
- ротациони вискозиметар

У техничким условима су дати исти критеријуми за све врсте битумена, али су при том дате различите температуре на којима они треба да буду задовољени, тј. врста везива се бира зависно од пројектне температуре за коловозну конструкцију.

Битумен се означава ознаком PGx-у где је:

- PG ознака класе битумена с обзиром на карактеристике
- x пројектна највиша температура
- у пројектна најнижа температура

11.3.2 ИЗБОР САСТАВА МИНЕРАЛНЕ МЕШАВИНЕ

Поступак пројектовања битуменом везаних мешавина системом SUPERPAVE формулисан је на три нивоа.

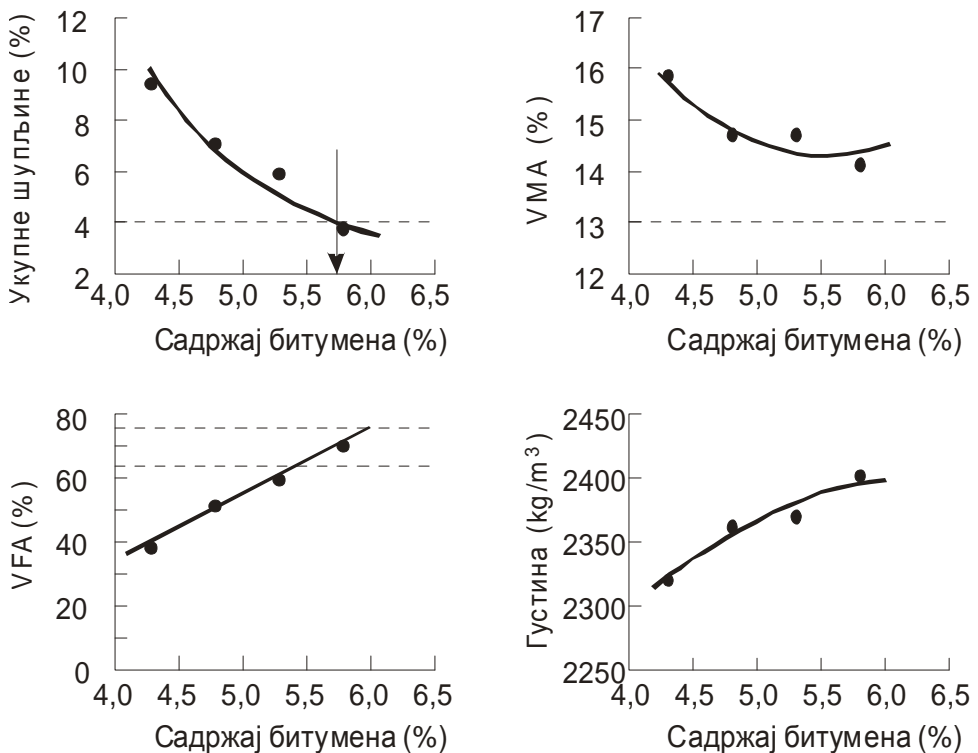
Пројектовање запреминског састава мешавине представља суштину првог нивоа, али и прву фазу поступка пројектовања мешавине уколико се он врши на неком од остала два нивоа. Поступак састављања мешавине на нивоу 1 донекле подсећа на конвенционалне методе. Сличности се огледају у контроли одређених параметара запреминског састава мешавине као што су укупне шупљине, шупљине у минералном материјалу и шупљине испуњене битуменом. Међутим, разлике су много веће и односе се на карактеристике материјала, с обзиром да су технички услови сасвим измењени и за битумен и за агрегат, затим на поступак збијања мешавине (користи се кружни - жироскопски набијач), као и на поступке неговања материјала пре испитивања (симулација старења у фази производње и уградње асфалтне мешавине). На нивоу 1 води се рачуна искључиво о запреминском саставу мешавине и нема испитивања стабилности и течења.

На нивоу 2 изводе се опити, на основу којих се карактерише механичко понашање мешавине, а које треба да обезбеди оптималан састав мешавине с обзиром на трајне деформације, пукотине услед замора и пукотине услед ниских температура. На нивоу 3 се изводе неки додатни опити који омогућавају прецизнију процену колотрага и пукотина.

11.3.3 ИЗБОР ПОТРЕБНЕ КОЛИЧИНЕ ВЕЗИВА

Садржај битумена при пројектном нивоу збијености одређује се на основу критеријума да мешавина садржи 4% шупљина при пројектном броју обртаја набијача. Међутим, садржај шупљина мора да буде за 2% или више процената већи, због омогућавања накнадног збијања под саобраћајем.

У принципу прави се серија са различитим минералним мешавинама, при чему свака серија има узорке са 4 различита садржаја битумена. Запреминске карактеристике мешавине (укупне шупљине, шупљине у минералном материјалу и шупљине испуњене битуменом) и густина, одређују се за сваки узорак (садржај везива) при пројектном броју обртаја набијача и цртају њихови дијаграми, слика 11.2. Оптималан садржај везива бира се из услова да буде испуњен критеријум шупљина од 4%, а затим врши процена да ли за тај садржај везива, шупљине у минералном материјалу и шупљине испуњене везивом испуњавају прописане критеријуме (табеле 11.3 и 11.4).



Слика 11.2 Однос запреминских карактеристика мешавине и густине од садржаја битумена

Табела 11.3 Критеријуми за садржај шупљина у минералном материјалу за укупне шупљине од 4 %

Номинално највеће зрно агрегата (mm)	Шупљине у минералном материјалу (VMA), најмање
9,5	15,0
12,5	14,0
19,0	13,0
25,0	12,0
37,5	11,0
50,0	10,5

VMA шупљине у минералном материјалу, % V/V укупне шупљине у збијеном узорку

Табела 11.4 Критеријум за шупљине испуњене битуменом

Саобраћај (ESO од 80 kN)	Пројектна вредност шупљина испуњених битуменом (VFA), највише (% V/V)
$< 3 \times 10^5$	70 - 80
$< 3 \times 10^6$	65 - 78
$< 1 \times 10^8$	65 - 75
$> 1 \times 10^8$	65 - 75

ESO еквивалентно саобраћајно оптерећење, VFA ефективна запремина битумена

Такође, за добијени оптимални садржај везива ради се и провера збијености при почетном, максималном броју обртаја набијача.

Изложени поступак важи за ниво 1, док се за већа саобраћајна оптерећења примењују поступци нивоа 2 и 3, где се оптимизација запреминског састава мешавине ради на основу њених маханичких карактеристика (односно предвиђених нивоа оштећења у фази експлоатације), табеле 11.5 и 11.6.

Табела 11.5 Преглед опита који се изводе на нивоима 2 и 3

Опит и ниво на коме се изводи	Оштећење
Поновљено смицање (2 и 3)	Замор и трајна деформација
Опит савијања (2 и 3)	Замор и трајна деформација
Просто смицање (2 и 3)	Замор и трајна деформација
Једнооксијални опит (3)	Замор и трајна деформација
Хидростатички опит (3)	Замор и трајна деформација
Индиректна чврстоћа на затезање (2 и 3)	Замор и трајна деформација
Течење при ниској температури (2 и 3)	Пукотине услед ниских температура
Лом при ниској температури (2 и 3)	Пукотине услед ниских температура
Крутост при савијању на ниској температури (2 и 3)	Пукотине услед ниских температура

Табела 11.6 Поређење између нивоа 2 и нивоа 3 метода за пројектовање мешавина

	Трајна деформација/ Пукотине због замора	Пукотине због ниских температура
Тип испитивања	Ниво 3 обухвата више стања напона и захтева два додатна испитивања	Нема разлике између нивоа 2 и нивоа 3
Температуре испитивања	Ниво 3 обухвата распон температура од 4 до 40 °C Ниво 2 користи једну ефективну температуру за пукотине услед замора и једну за трајне деформације	Ниво 3 обухвата 3 температуре Ниво 2 обухвата испитивање чврстоће при затезању само на једној температури
Предвиђање понашања	Ниво 3 дели годину у сезоне Ниво 2 разматра целу годину као једну сезону	Нема разлике између нивоа 2 и 3

Оптималан садржај везива добија се на основу вредности трајних деформација (дубине колотрага), пукотина услед замора (процента површина захваћених пукотинама) и пукотина услед ниских температура (растојање пукотина), добијених из модела за предвиђање оштећења.

Предвиђање вредности оштећења за пробне мешавине са различитим садржајем везива (на нивоима 2 и 3 врши се анализа оштећења за три различита садржаја везива, пројектни, доњи и горњи), користе се да би се добиле зависности одређених оштећења у функцији садржаја везива.

11.3.4 ОЦЕНА ОСЕТЉИВОСТИ НА ВЛАГУ

Оцена отпорности сабијених асфалтних мешавина на штетно дејство влаге је стандардизована у САД [2]. Она се мери преко утицаја влаге на чврстоћу при затезању гредица (однос просечне чврстоће при затезању на сувом, према влажном узорку, AASHTO T 283) или динамичког повратног модула на влажним и сувим цилиндрима (SHRP M-006). Промене не смеју да буду веће од 20 (30) %.

Поступак анализе асфалтних мешавина по систему SUPERPAVE је атоматизован, тј. постоји одговарајући програмски пакет.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Gradation Analysis og Aggregates, Asphalt Institute Manual MS-2, Mix Design Methods for Asphalt Concrete, Asphalt Institute, 1994.
- [2] AASHTO T 283, Resistance of Compacted Bituminous Mixture to Moisture Inducted Damage or SHRP Method of Test M-006, Determining the Moisture Susceptibility of Modified and Unmodified Hot Mix Asphalt with the Environmental Conditioning System
- [3] SHRP-A-407, The Superpave Mix Design Manual for New Construction and Overlays, National Research Council, Washington, DC, 1994.
- [4] SUPERPAVE FOR AIRFIELDS, by John Duval and Mark Buncher, 2004 FAA Worldwide Airport Technology Transfer Conference, Atlantic City, 2004.
- [5] Superpave Hot Mix Asphalt Mixture Design and Mixture Verification Procedures, New York State Department of Transportation, 2002.

12

АСФАЛТНЕ МЕШАВИНЕ ПО ХЛАДНОМ ПОСТУПКУ, РЕЦИКЛАЖА И РЕМИКС

12.1 ПОВРШИНСКЕ ОБРАДЕ

12.1.1 ПРОЈЕКТОВАЊЕ ЈЕДНОСТРУКЕ ПОВРШИНСКЕ ОБРАДЕ

Пројектовање површинске обраде захтева одређивање пропорција везива и камене ситнежи (агрегата), али такође треба установити сврсисходност примене површинске обраде и њене ефекте на саобраћај.

Површина прскана везивом преко које се разастире агрегат, садржи око 50% шупљина између зрна агрегата. Ваљањем се шупљине смањују на око 30%, а саобраћајем, током времена, шупљине бивају редуковане на око 20%.

Квалитетном израдом, везиво попуни око 70% од тих 20% шупљина, ако је низак ниво саобраћаја. Међутим, ако је ниво саобраћаја висок, везиво не попуни више од 60% шупљина.

Постојећи застор сам утиче на потребну количину везива и агрегата. Често се додавањем везива, преко потребне количине за везивање агрегата, врше корекције на постојећем асфалтном застору.

Поступак прорачуна

Развијен је систем једначина за одређивање количине агрегата потребног за једноструку површинску обраду:

$$C = Ms * [(1 - 0.4 * V) * H * G * E] \quad (12.1)$$

где је:

C - количина агрегата [kg/m²]

V - шупљине у слоју агрегата у расутом стању приказане као децималан број

$$V = 1 - [W / (1000 * G)] \quad (12.2)$$

W - запреминска маса агрегата у расутом стању [kg/m³]

G - специфична запреминска маса [kg/m³]

H - просечна најмања димензија зрна разастртог агрегата [mm]

E - коефицијент растура, табела 12.3

Ms - искуствени фактор средине (клима, саобраћај, количина агрегата, итд.) може бити мањи или већи од **1.0** (најчешћа вредност)

Количина везива коју треба употребити је:

$$B = K * [(0.40 * H * T * V + S + A) / R] \quad (12.3)$$

где је:

B - количина везива [lit/m²]

H - просечна најмања димензија зрна разастртог агрегата [mm]

T - фактор саобраћаја, табела 12.4

V - шупљине у слоју агрегата у расутом стању приказане као децималан број,

$$V = 1 - [W / (1000 * G)] \quad (12.4)$$

S - корекција [lit/m²] због текстуре површине застора на коју се поставља површинска обрада (табела 12.1)

Табела 12.1

Текстура	Корекција, S [lit/m ²]
Црн асфалтни застор са вишком везива	- 0.04 до - 0.27
Гладак непорозан асфалтни застор	0.00
Упијајући асфалтни застори:	
- незнатно порозан, оксидован	+ 0.14
- незнатно рупичаст, порозан, оксидован	+ 0.27
- знатно рупичаст, порозан, оксидован	+ 0.40

A - корекција [lit/m²] због апсорпције битумена у камену ситнеж (због порозности камене ситнежи)

R - битуменска емулзија изражена као децималан број. Типичне вредности су приказане у табели 12.2

Табела 12.2

Битуменска емулзија	Р
АН (анјонска нестабилна)	0.55
КН (катјонска нестабилна)	0.65
АП (анјонска полустабилна)	0.60
КП (катјонска полустабилна)	0.55

К - искуствени фактор средине (клима, саобраћај, количина агрегата, итд) који може бити мањи, или већи од **1.0** (најчешћа вредност). Међутим, искуство је показало да емулзије коришћене у хладнијим поднебљима имају вредност К око **1.2**.

Табела 12.3 Фактор растура агрегата

Растур агрегата у [%]	Фактор растура агрегата, Е
1	1.01
2	1.02
3	1.03
4	1.04
5	1.05
6	1.06
7	1.07
8	1.08
9	1.09
10	1.10
11	1.11
12	1.12
13	1.13
14	1.14
15	1.15

Табела 12.4 Фактор саобраћаја за једноструку површинску обраду

Агрегат	Фактор саобраћаја = [%] (изражен као децималан број) од 20 % шупљина у каменој ситнежи коју попуњава везиво				
	Саобраћај [возила / дану]				
	< 100	100 - 500	500 - 1000	1000 - 2000	> 2000
Квалитетан агрегат	0.85	0.75	0.70	0.65	0.60

У табели 12.5 су приказане оријентационе вредности количина везива и агрегата за једноструку површинску обраду.

Табела 12.5 Оријентационе вредности количина везива и агрегата

ПГДС	Величина агрегата [mm]	Количина агрегата [kg/m ²]	Количина везива [lit/m ²]	Тип везива
2000 - 4000	19.0 - 9.5	21.7 - 27.1	1.58 - 2.03	Битумен
			1.81 - 2.26	АН, КН
1000 - 2000	12.5 - 4.75	13.6 - 16.3	1.58 - 2.03	Битумен
			1.81 - 2.26	АН, КН
200 - 1000	9.5 - 2.36	10.9 - 13.6	1.58 - 2.03	Битумен
			1.81 - 2.26	АН, КН
20 - 200	6.3 - 1.18	8.1 - 10.9	1.58 - 2.03	АН, АП
			1.81 - 2.26	КН, КП
< 20	Песак	5.4 - 8.1	1.58 - 2.03	АН, АП
			1.81 - 2.26	КН, КП

Просечна најмања димензија разасртог агрегата се одређује помоћу димензије средњег зрна исејаваног узорка фракције агрегата (величина зрна на пролазу од 50%) и индекса плочастих зрна (изражен у %) који се одређује испитивањем сваког зрна из узорка на посебним ситима са издуженим отворима, помоћу формуле 12.5:

$$H = [M / 1.139285 + (0.011506) * FI] \quad (12.5)$$

где је:

H - просечна најмања димензија зрна разасртог агрегата [mm]

M - димензија средњег зрна [mm]

FI - индекс плочастих зрна [%]

12.1.2 ПРИПРЕМНИ РАДОВИ ЗА ИЗРАДУ ЈЕДНОСТРУКЕ ПОВРШИНСКЕ ОБРАДЕ

Увид у стање застора

Пре било каквог почетка радова треба пажљиво прегледати површину коловоза и дефинисати потребу за поправком и одредити врсту површинске обраде.

Треба регистровати сва оштећена места, одступања у дебљини попречног пресека и уздужног профила која у будућности могу узроковати оштећења коловозне површине. Посебна критична места су ивични дренажни системи.

Ако стари застор треба у потпуности реконструисати, посебну пажњу треба обратити на сливнике, испуцале површине, угнуте површине, површине на којима је асфалт углачан или тече и остала оштећења застора.

Поправке морају бити урађене тако да застор коловозне конструкције буде у исправном стању пре почетка извођења површинске обраде. Ако је потребно, претходно извести крпљење застора. Мора да се остави довољно времена за консолидацију коловоза под саобраћајем, пре него што се отпочне са површинском обрадом.

Временски услови

Временски услови играју веома важну улогу у успешном извођењу површинске обраде. Најбољи временски период, за извођење површинских обрада и њихово неговање у току године, је кад је време топло и суво.

Многи стандарди захтевају да температура ваздуха у хладу буде најмање 10 °С пре почетка радова. Неки, пак, захтевају да температура површине пута буде изнад 20 °С пре отпочињања радова. Без обзира на висину температуре везива током његовог прскања, оно ће се охладити на температуру површине по којој се прска **за мање од једног минута**.

Површинске обраде никад не треба почињати кад је површина влажна или кад прети киша. Комбинацијом воде, свеже површинске обраде и саобраћаја, настаје губитак зрна агрегата из застора.

Опрема и материјали

Пре почетка радова, сва опрема мора да буде испитана да би се проверило да ли је у добром радном стању. Оператор на распршивачу везива мора бити сигуран да је летва са млазницама на прописаној висини и да су млазнице правилно избављене. Исто тако треба проверити и разастирач агрегата.

Испорука материјала се тако координира да се избегне застој. Ако је депонија далеко од места извођења радова, повећа се број камиона ради обезбеђивања непрекидног дотока материјала. Може да се донесе довољно материјала за завршетак радова и стави на гомилу непосредно поред места извођења радова.

12.1.3 ИЗВОЂЕЊЕ ЈЕДНОСТРУКЕ ПОВРШИНСКЕ ОБРАДЕ

Распрскавање везиваног материјала

Пре почетка радова треба поставити жицу вођицу дуж ивице пута, коју ће пратити возач распршивача. Возач распршивача мора пажљиво да гледа и прати линије ригола и ивичњака. Ивичњаци се покривају заштитним папиром да не би били умазани везивом.

Брзина распршивача и дужина на коју се распрскава везиво, одређују се пре почетка радова. Брзина распршивача је:

$$v = Q / (C * V * A) \quad (12.6)$$

где је:

v - брзина кретања [m/min]

Q - проток кроз млазнице [lit/min]

W - ширина летве са млазницама [m]
 A - количина материјала који се распрскава [lit/m]
 C - коефицијент ширења услед загревања везива

$$C = 1 / M \quad (12.7)$$

M - корективни фактор запремине везивне масе на температури прскања у односу на 16 (15.6) °C из табеле температура - запремина.

Дужина коју треба прскати и по њој разасрти камени агрегат је такође одређена пре почетка прскања. Она се углавном одређује према броју пуних камиона који су укључени у операцију. Не прска се везивом површина већа од оне која може бити покривена каменим агрегатом током једног минута. Дужина се одређује на основу обрасца:

$$L = V / (W * A) \quad (12.8)$$

где је:

L - дужина разастирања и прскања [m]
 V - укупно литара распрсканих по површини [lit]
 W - ширина летве са млазницама [m]
 A - количина материјала који се распрскава [lit/m²]

Број распрсканих литара је ограничен капацитетом цистерне. Али, за пуне камионе агрегатом, број литара може бити одређен:

$$V = (A * W_A) / S \quad (12.9)$$

где је:

W_A - маса натовареног агрегата [kg]
 S - количина агрегата за разастирање [kg/m²]
 A - количина материјала који се распрскава [lit/m²]

Везиво треба да буде на температури вискозности за прскање. Ако је тако, тачна количина материјала не представља проблем. Возач одржава претходно одређену брзину на показивачу - битуметру.

Провера количине узетог везива се ради после сваке вожње распршивача. То се ради брзо и лако, рачунањем литара по квадратном метру распрсканог везива помоћу формуле:

$$A_1 = (T * M) / (W * L) \quad (12.10)$$

где је:

A₁ - количина везива на 16 (15.6) °C [lit / m²]
 T - укупна количина распрсканог везива из распршивача на температури прскања [lit]
 M - корективни фактор запремине везивне масе на температури прскања у односу на 16 (15.6) °C из табеле температура - запремина.
 W - ширина летве са млазницама [m]
 L - дужина разастирања и прскања [m]

Попречне спојнице

Грубе и ружне попречне спојнице могу бити избегнуте почињањем и престајањем рада на заштитном папиру. Папир се поставља предњом ивицом попречно на почетак траке која треба да се изводи на месту предвиђене спојнице. Распршивач, наилазећи унапред одређеном брзином, почиње распрскавање по папиру. Други папир се поставља на месту престајања распрскавања. Овим поступком се постижу оштре попречне спојнице. После прелаза разастирача агрегата, папири се уклањају.

За следеће прскање везива, предња ивица папира се поставља 15 mm испред прекида претходног потеза прскања, чиме се постиже избегавање прекида (непопрскана лајсна) између два прскања.

Подужне спојнице

Извођење површинске обраде у пуној ширини елиминише подужне спојнице. Ипак, некад то није могуће извести због потребе непрекидног одвијања саобраћаја.

Да би било избегнуто нагомилавање агрегата дуж подужних спојница, ивица разастирања агрегата треба да се поклапа са пуном дебљином новопостављеног слоја. То допушта ширина траке у којој је слој битумена неравномерних дебљина, тако да може бити преклапања са новим слојем из суседне траке. Неравномерне дебљине су резултат делимичног преклапања спољних млазница. Затим, када се агрегат разастре у пуној ширини у следећој траци, нема нагомилавања агрегата у подужној спојници. Ширина битуменом обрађене траке може да има већа одступања, у зависности од размака млазница и да ли се ради трострука или двострука преклопна прскајућа шема.

Ако је могуће, подужне спојнице треба да буду дуж осовине застора који се обрађује. Установљене и правилно обележене линије осигуравају добру подужну спојницу.

Разастирање агрегата

Сав агрегат за планирано разастирање треба претходно допремити. Док се распршивач везива помера унапред распрскавајући везиво, разастирач агрегата се налази непосредно иза и "у стопу" га прати. Распрскано везиво мора бити покривено **у року од једног минута**. Ако се касни, опада вискозитет везива и теже се везује агрегат, а и обавијеност зрна је мања. Такође је важно да агрегат буде разастрт равномерно у предвиђеној количини. У једнострукој обради, појединачна зрна упадају у везивни слој, тако да је бесмислено разастирати више агрегата него што је прорачуном превиђено за један слој.

Одлична контрола је могућа код механичких разастирача. Равномерност количина се осигурава са прописано подешеним разастирачем, ако се тахометар користи за одржавање предвиђене брзине. Други циљ у контролисању расподеле количина агрегата је маркирање дужине коју сваки напуњени камион треба својим товаром да прекрије.

Вишак агрегата, ако га има на по неким површинама, треба одмах уклонити лопатама. На површинама, где недостаје камени материјал, треба га додати. Са правилно подешеним и коректно управљаним разастирачем, ручни рад може се избећи.

Ваљање

Ваљањем се агрегат утискује у слој везива, чиме се постиже отпорност слоја на утицаје од возила.

Ваљци са пнеуматичима треба да буду коришћени за све површинске обраде, док ваљци са челичним точковима могу бити коришћени једино ако се не располаже ваљцима са пнеуматичима.

Током 30 минута, после разастирања агрегата, сабијање се врши челичним ваљцима, а они не смеју бити иза разастирача на растојању већем од 750 метара. Ваљци са челичним точковима ломе зрна агрегата, чиме се смањује век трајања површинске обраде.

Ваљци са пнеуматичима дају равномеран притисак по целој површини ваљања и могу да ваљају одмах по разастирању агрегата. Два самоходна ваљка треба користити уз један разастирач. Ваљање се обавља све док агрегат не улегне прописно у везивну масу. Чим слој постане чврст, ваљање се прекида, да не би дошло до оштећивања зрна агрегата. Ваљање почиње од спољне ивице обраде у подужном смеру, ка осовини пута. Свака деоница треба да се преклопи са претходном за око пола ширине предњег точка ваљка. За добро сабијање агрегата су потребна најмање **три прелаза**.

Вишак зрна агрегата

Упркос пажљивом раду, по завршетку ваљања, вишак зрна агрегата се појављује на површини застора. Пре него што суседна трака буде покривена, вишак зрна агрегата мора бити уклоњен дуж спојница, а ако је потребно и са остатка непокривене траке.

Агрегат који није добро везан бива покупљен гумама возила и избачен ка возилима која их прате, оштећујући им фарове и ветробранска стакла. Вишак агрегата треба уклонити ротационим механичким четкама, у раним јутарњим сатима, док је застор још хладан, а по завршетку читавог процеса обраде.

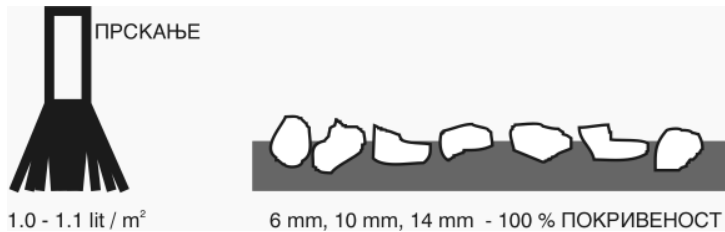
Контрола саобраћаја

Контрола саобраћаја је веома важна са гледишта квалитета радова и мора бити одржавана док се посао не заврши. Велике брзине возила по свежој површини избацују агрегат из везивне масе и производе глатку црну површину. Саобраћај треба да буде преусмерен на заобилазне правце или допуштен једино по траци у којој се не ради. По завршетку радова и када је површина довољно чврста да прими саобраћај, брзине не смеју бити веће од 25 km/h. Временски период до потпуног "сазревања" површинске обраде зависи од климатских услова. Саобраћај мора бити контролисан на начин који гарантује безбедно извођење радова и минималне прекиде радова.

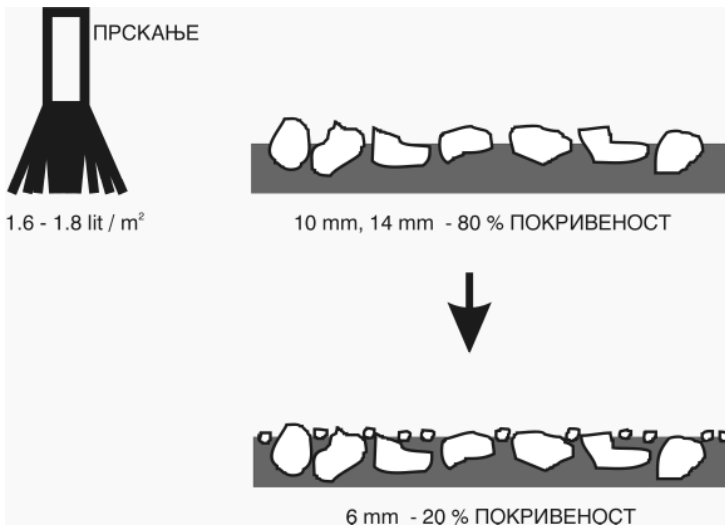
Сигнални знаци - знаци упозорења, махач заставицом и сигнално возило, представљају основе за ефикасну контролу саобраћаја.

Камиони који доносе агрегат за разастирање су окренути у супротном смеру од кретања разастирача. Они морају да се окрену на обележеном месту довољно далеко од свежег слоја.

На слици 12.1 је приказана скица једноструке површинске обраде, док је на слици 12.2 приказана скица ојачане варијанте једноструке површинске обраде.



Слика 12.1 Једнострука површинска обрада



Слика 12.2 Ојачана једнострука површинска обрада

12.1.4 ВИШЕСТРУКА ПОВРШИНСКА ОБРАДА

Вишеструка површинска обрада се састоји из серије једноструких површинских обрада са истим номиналним величинама зрна по слојевима. Међутим, чешћи је случај да горњи слој буде од агрегата чија је величина зрна дупло мања него у доњем слоју. Најчешће коришћена вишеструка површинска обрада је двострука површинска обрада.

Дебљине слојева су од 16 mm до 20 mm, а век трајања вишеструке површинске обраде је око 3 пута дужи од једноструке површинске обраде, док су трошкови већи 1.5 пута.

У двострукој површинској обради, други слој попуњава шупљине по површини првог слоја агрегата. Испуњеност шупљина слоја представља текстуру површинске обраде.

Поступак прорачуна

Постоји неколико независних метода за димензионисање вишеструке површинске обраде. У методи која је овде описана, сваки слој је прорачунат као за једноструку површинску обраду. Сваки новопостављени слој има номиналну величину зрна за половину мању од номиналне величине зрна у претходно постављеном слоју. Није омогућено направити растур материјала, а такође, после првог слоја, не праве се корекције у текстури претходно постављеног слоја.

После одређивања количине емулзије за сваки слој, добија се укупна количина за све слојеве. За двоструку површинску обраду, користи се 40 % од укупне количине емулзије за први слој и 60% за други слој. За троструку површинску обраду, користи се однос количина 30% - 40% - 30%.

Количине везива и агрегата одређене помоћу следећих једначина задовољавају највећи број теренских услова. Мултипликационим факторима означеним са "М" и "К" регулишу се дебљине слојева (дебљи или тањи слој) услед климатских фактора, саобраћаја, агрегата за покривање и других услова.

У вишеструкој површинској обради, први слој покривен агрегатом одређује дебљину читаве површинске обраде. Накнадни слојеви делимично попуњавају површинске шупљине претходно постављених слојева.

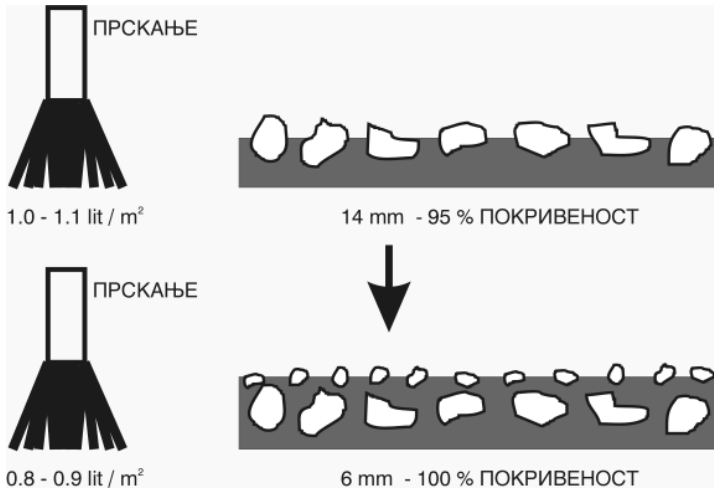
Извођење двоструке површинске обраде

Поступци извођења вишеструке површинске обраде су истоветни као поступци за извођење једноструке површинске обраде, осим што се процес обавља два или више пута. Поступак за двоструку површинску обраду састоји се из следећих корака:

1. припреме површине
2. распрскавања првог слоја везива
3. разастирања првог слоја агрегата величине зрна од 14 mm
4. ваљања првог слоја агрегата
5. распрскавања другог слоја везива
6. разастирања другог слоја агрегата величине зрна од 6 mm
7. ваљања другог слоја агрегата
8. чишћења четкањем вишка зрна агрегата

Одржавање слојева је неопходно између постављања два слоја површинске обраде. Први слој треба да очврсне пре постављања другог слоја (корак 5). За троструку површинску обраду, кораци 5, 6 и 7 се понављају за трећи слој.

На слици 12.3 је приказана двострука површинска обрада.



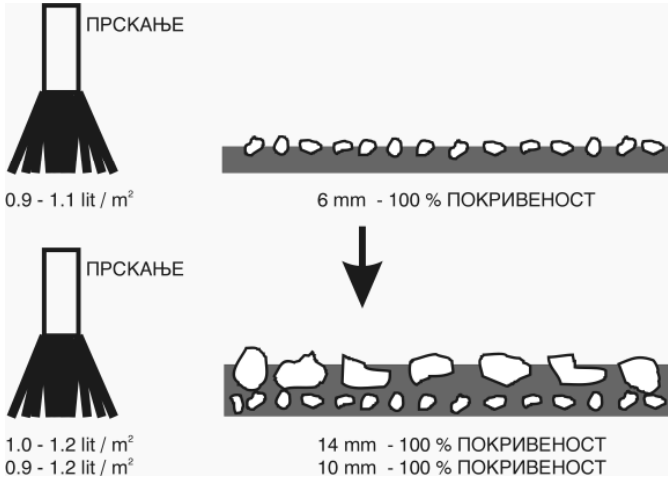
Слика 12.3 Двострука површинска обрада

Извођење једноструке ојачане површинске обраде

Поступак извођења једноструке ојачане површинске обраде је следећи:

1. припрема површине
2. распрскавање првог слоја везива
3. разастирање првог слоја агрегата величине зрна од 6 mm
4. ваљања првог слоја агрегата
5. распрскавање другог слоја везива
6. разастирање другог слоја агрегата величине зрна од 10 mm или од 14 mm
7. ваљање другог слоја агрегата
8. чишћење четкањем вишка зрна агрегата

На слици 12.4 је приказана једнострука ојачана површинска обрада.



Слика 12.4 Једнострука ојачана површинска обрада

Овај облик једноструке површинске обраде може бити примењен уколико је постојећи застор неравномерне чврстоће услед превеликог броја закрпи. Први нанети слој везива, а потом и ситног каменог агрегата имају улогу уједначења површине, која касније треба да буде обрађена класичном једноструком површинском обрадом. Величина зрна за слој ојачања је традиционално 6 mm, са незнатним вишком каменог материјала. Овај слој може бити коришћен и на врло тврдим коловозним површинама (бетонски коловози и врло тврдо набијени асфалтни коловози) као слој за ублажавање тврдоће постојећег застора.

12.2 МИКРО ЗАСТОРИ (MICRO-SURFACING)

Микро-застори су брзовезујуће полимеризоване битуменске емулзије помешане са ситнозрним минералним мешавинама, водом и другим додацима. Справљају се по хладном поступку. Служе за пресвлачење асфалтних (првенствено) и бетонских коловозних застора. Пројектовани су да буду примењени у полутечном стању помоћу специјалне машине за мешање и полагање масе. По пројекту, микро-застор се хемијски мења из полутечног стања у ситнозрну хладну масу. Овакав систем може да носи саобраћај један сат после уграђивања, док дебљина слоја није већа од 13 mm, а полаже се на температури од око 24°C и при влази од 50% или мањој.

Мешавина треба да буде у таквом стању конзистенције, да може да се уграђује у променљивим дебљинама попречног профила постојећег асфалтног застора (колотрази, наборане површине, итд). После неге новог слоја и почетне консолидације услед саобраћајног оптерећења, микро-застори опстају и поред збијања, током целог пројектног периода, без обзира на садржину битумена и променљивост дебљине подлога преко којих

су постављени. Крајњи производ је површина са великим коефицијентом трења у влажним условима током целог експлоатационог периода.

12.2.1 ТЕХНОЛОШКИ ПОСТУПАК

Машина за обраду микро-застором

Машина је специјално конструисана и произведена да поставља само микро-застор. Поступак мешања материјала је потпуно аутоматизован. То значи, да је доток материјала у простор за мешање континуалан и у тачно дефинисаним пропорцијама минералног агрегата, битуменске емулзије, минералног пунила, адитива и воде. Сав материјал се меша у простору који има две осовине са лопатицама за мешање. Одатле мешавина отиче у сандук разастирача у коме се налазе пужеви, који додатно мешају масу и разастире је по постојећем застором.

Машина треба да има довољно велике силосе за складиштење материјала - минералног агрегата, битуменске емулзије, минералног пунила, адитива и воде - да би било омогућено континуално прављење мешавине за микро-застор у унапред задатим пропорцијама.

На аутопутевима и оптерећенијим саобраћајницама, може пуњење машина да се обавља и током рада (немају све машине ову могућност). Тиме се задовољава капацитет континуалног процеса мешања и постављања микро-застора. Сав потребан материјал се налази на самом возилу и по потреби досипа у силосе. Ако се користи таква машина, она мора бити опремљена командама за манипулисање брзином и правцем кретања, као и додатним седиштем за оператера који контролише праћење правца и поравнања. Наведени елементи машине морају бити посебно конструисани и изведени.

На слици 12.5 је приказана машина за полагање слоја од микро-застора са својим основним деловима који одговарају технолошком поступку.

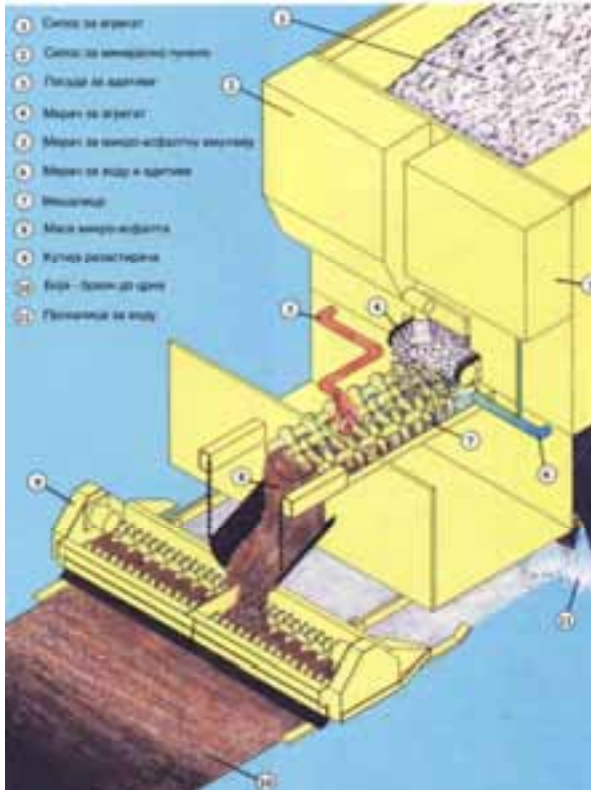
Команде за одређивање пропорција материјала

Команде за одређивање пропорција - учешћа сваког од материјала (агрегата, минералног пунила, битуменске емулзије, адитива и воде) у мешавини микро-застора, морају бити припремљене и правилно обележене. Ти пропорциони односи се користе за калибрацију материјала и одређивање количина материјала на изласку из простора за мешање у било ком тренутку.

Опрема за разастирање

Мешавину униформно разастире уређај - пуж. Наиме, од осовине сандука на левој и десној страни се налазе осовине на којима се налазе спирале које померају мешавину од осовине ка бочним ивицама. Оне истовремено и обављају финално мешање микро-засторне мешавине. Предњи граничник служи за спречавање губљења масе у контактної тачки са застором. Задњи граничник има улогу финализатора дебљине микро-застора и може се подешавати. Сандук разастирача и задњи граничник треба да буду тако

конструисани да омогућују униформну конзистенцију мешавине и слободан ток материјала испод задњег граничника.



Слика 12.5 Машина за полагање микро-застора

Секундарни граничник

Секундарни граничник служи за прављење текстуре на постављеном микро застору. Он има исту апаратуру за подешавање висине као и сандук за разастирање масе.

Сандук за попуњавање колотрага

Кад је пројектом тако захтевано, пре постављања завршног слоја микро-застора, истом таквом мешавином се попуњавају колотрази, угнуте површине, локалне депрсије на постојећој површини, итд. Колотрази од 13 mm или дубљи попуњавају се одвојено из сандука за попуњавање колотрага. Ширине тих сандука са разастирачима су 1.5 до 1.8 m. За неравнине или колотраге који су плићи од 13 mm, у пуној ширини се поставља први слој, по одобрењу надзорног органа. Колотрази који су дубљи од 40 mm, попуњавају се често вишеслојно микро-засторном масом,

све до достизања предвиђене нивелете попречног пресека. Сав материјал, којим се испуњавају колотрази, треба неговати под саобраћајем највише 24 сата пре постављања завршног слоја.

Помоћна опрема

Погодну опрему за обраду застора, опрему за контролу саобраћаја, ручне алате и другу помоћну опрему обезбеђује извођач, ако је неопходна за завршавање посла.

12.2.2 МАТЕРИЈАЛИ

Општи став

Постоје стандардни опити који се тичу свих материјала који улазе у микро-засторну мешавину.

Није неопходно примењивати све опите у сваком пројекту. Неки од опита су скупи и дуго трају. Ако материјали, који треба да буду коришћени у пројекту, имају задовољавајуће параметре из претходног периода употребе, обим опита може бити и мањи.

Битуменска емулзија

Битуменска емулзија може бити модификована брзовезујућим полимером (quick-traffic polymer) према стандардима AASHTO M 208 или ASTM D 2397 за споровезујуће катјонске емулзије. Опит мешања везива не користи се за овакве емулзије. Материјал полимера треба да буде умешан у битумен или битуменску емулзију ради емулзификационог процеса.

Минималну количину и тип полимер-модификатора треба одредити лабораторијским испитивањем пројектоване мешавине. Минимална захтевана количина одређује се према маси битумена и бива потврђена од снабдевача емулзијом. Најчешће се 3% полимер-материјала подразумева за минимум, у односу на масу битумена.

Опити квалитета

Кад се испитивања раде помоћу наведених опита, емулзија мора да испуњава стандарде - AASHTO M 208 или ASTM D 2397 за споровезујуће катјонске емулзије:

Опит	Квалитет	Карактеристика
AASHTO T 59 ASTM D 244	Разређен после дестилације	min 62%

Температура за наведене опите мора бити одржавана на 138°C. Виша температура може изазвати распад полимера.

Разређени битумен		
Опит	Квалитет	Карактеристика
AASHTO T53 ASTM D 36	Тачка размекшавања	min 57°C
AASHTO T 49 ASTM D 2397	Пенетрација на 25°C	40 - 90

Треба имати у виду климатске услове при одређивању ових вредности.

Сваки товар асфалтне емулзије треба да прати сертификат анализе, којим се потврђује да је то иста емулзија која је коришћена у пројектовању мешавине.

Агрегат

Минерални агрегат чија се употреба планира, мора да одговара типу и гранулацији који су предвиђени за микро-засторе. Агрегат мора бити произведен од дробљеног камена гранита, кречњака, згуре или другог висококвалитетног каменог материјала или комбинацијом наведених агрегата. Ради сигурности да је камени материјал у потпуности здробљен, 100% агрегата од којег је дробина направљена мора бити мање од највећег зрна у гранулацији која ће бити коришћена.

Опити квалитета

Када се опити раде према наведеним стандардима, агрегат треба да задовољи следеће захтеве:

Опит	Квалитет	Карактеристике
AASHTO T 176 ASTM D 2419	Еквивалент песка	min 65
AASHTO T 104 ASTM C 88	Чистоћа	Max 15% користећи Na ₂ SO ₄ или max 25% користећи MgSO ₄
AASHTO T 96 ASTM C 131	Отпорност на хабање	max 30%

Опит на хабање треба да се уради пре дробљења каменог агрегата. Исто тако, агрегат треба да задовољи услове отпорности на глачање. Доказане карактеристике могу оправдавати употребу агрегата који није прошао све наведене опите.

Гранулометријски састав

Када се опити раде према AASHTO T 27 (ASTM C 136) и AASHTO T 11 (ASTM C 117) гранулометријска крива мешавине заједно са минералним пунилом, треба да буде у оквиру наведених граница у табели 12.6.

Табела 12.6 Гранулометријски гранични појасеви за микро-засторе према ISSA

Сита [mm]	ТИП II [%] пролаза	ТИП III [%] пролаза	Толеранције за депонију
9.5	100	100	
4.75	90 – 100	70 – 90	+ / - 5%
2.36	65 – 90	45 – 70	+ / - 5%
1.18	45 – 70	28 – 50	+ / - 5%
0.6	30 – 50	19 – 34	+ / - 5%
0.33	18 – 30	12 – 25	+ / - 4%
0.150	10 – 21	7 – 18	+ / - 3%
0.075	5 – 15	5 – 15	+ / - 2%

Радна мешавина (пројектована гранулометријска крива) треба да буде у границама за жељени тип микро-застора. После приказа пројектоване гранулометријске криве, а то треба да буде крива на којој ће бити базирана мешавина, проценти пролаза кроз свако сито не смеју варирати више од допуштених толеранција приказаних у табели 12.6 за сејања са депоније, а крива мора бити у граничном појасу. Препоручено је да проценти сејања за било која два суседна сита не варирају од доње ка горњој граници.

Агрегат ће бити прихваћен на локацији депоније или утоварен у помоћни простор на возилу са којим се полаже микро-застор. Материјал са депоније прихвата се после 5 опита сејањем, према AASHTO T 2 (ASTM D 75). Ако је средња вредност од 5 сејања у границама толеранције, тај материјал се прихвата. Ако опити покажу да је материјал изван допуштених толеранција, извођач је дужан да га замени новим и уради опите ради провере карактеристика. Материјал који се користи у мешавини мора да задовољи критеријуме квалитета пре мешања. Ако се материјали мешају, тада мора бити пројектована нова мешавина за микро-застор.

Сејање се обавља на депонији пре испоруке материјала на место уграђивања, да би се видело има ли проблема са надмерним зрнима.

Минерално пунило

Минерално пунило, ако се тако захтева, може бити било ког типа: портланд цемент без ваздушних микро-пора или гашени креч без страних примеса или громуљица. Пунило може бити прихваћено на основу визуелне инспекције. Тип и потребна количина минералног пунила се одређују у лабораторијском пројектовању мешавине и они се узимају у обзир као део гранулације агрегата. Сваки пад или раст учешћа пунила мањи од 1% може бити допуштен, када микро-застор буде постављен, ако је то неопходно због боље конзистенције или времена постављања.

Вода

Вода мора да буде чиста и без сланих примеса или реактивних хемикалија или било каквог другог загађивача.

Додаци

Адитиви могу да се додају емулзијској мешавини или некој другој компоненти материјала, да би била обезбеђена контрола брзовезујућих карактеристика.

12.2.3 ПРОЈЕКТОВАЊЕ МЕШАВИНЕ

Усклађеност агрегата, полимером модификоване емулзије, минералног пунила и осталих додатака потврђују се пројектном мешавином.

Међународна асоцијација ISSA (International Slurry Surfacing Association - ISSA) препоручује следеће опите за контролу мешавине:

Опит	Опис	Количине
ISSA TB – 139 (за брзовезујуће системе)	Кохезија у влажном стању min. 30 минута min. 60 минута	min. 12 kg – cm min. 20 kg – cm
ISSA TB – 109 (само за тешко саобраћајно оптерећење)	Вишак битумена по LWT адхезији песка	max. 538 gr / m ²
ISSA TB – 114	Спирање водом	Пролаз min. 90%
ISSA TB – 100	Хабање влажног узорка Један сат узорак потопљен у воду Шест дана узорак потопљен у воду	max. 538 gr / m ² max. 807 gr / m ²

Опит хабања влажног узорка ради се да би била одређена минимална количина асфалтног везива и отпорност на скидање битуменског везива. Неки системи захтевају дуже време да се вежу за камен. У тим системима опит модификоване Маршалове стабилности (ISSA TB – 140) или опит Хвимоваг кохезиометра (ASTM D1560) се користе за потврђивање садржаја битуменског везива.

Опит	Опис	Количине
ISSA TB-147	Бочно померање Специфична маса после 1000 циклуса од 57 kg	5% max 2.10 max
ISSA TB-144	Класификација Компатибилност	(AAA,BAA) 11 подеоних тачака min
ISSA TB-113	Време мешања на 25°C	Контролисано на 120 сек. min

Опит мешања се користи да би било одређено колико треба мешати материјал у машини пре почетка распада мешавине. То је добар теренски

опит за одређивање конзистенције мешавине, битуменске емулзије и агрегата и од највећег је интереса за извођаче.

Опит мешања и опит времена за постављање - уграђивање микро-застора, треба радити на највишој очекиваној температури током уградње.

Пројекат мешавине приказује квантитативне ефекте садржаја влаге у јединичној маси агрегата. Извештај мора јасно да покаже пропорције агрегата, минералног пунила (min. и max.), воде (min. и max.), употребе адитива и полимером модификоване битуменске емулзије у односу на суву масу агрегата.

Сви појединачни материјали коришћени у пројектовању мешавине морају бити репрезентативни показатељ предложеног материјала који користи извођач радова.

Проценти учешћа свих материјала морају бити показани у лабораторијском извештају. Прилагођавања могу бити захтевана током извођења радова, али на основу теренских услова. За све модификације надзор даје завршно одобрење.

Разређени битумен	5.5% до 10.5% од масе сувог агрегата
Минерално пунило	0.0% до 3% од масе сувог агрегата
Полимер модификатори	Min 3% од масе асфалта у мешавини
Адитиви	По потреби
Вода	По потреби за производњу прописане конзистенције мешавине

Потребне количине

Мешавине микро-застора морају бити прописане конзистенције све време, тако да се производе количине према стању постојећег асфалтног застора. Просечне количине које су примењене, а измери их надзорни орган, морају бити у оквирима приказаним у табели 12.7.

Табела 12.7 Оквирне вредности за количине микро-засторних маса

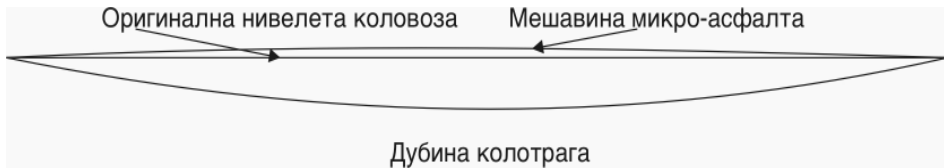
Тип II	Градске улице, улице у стамбеним квартовима, аеродромске писте	5.4 - 18.6 kg/m ²
Тип III	Међудржавни путеви и примарна путна мрежа	8.1 - 16.2 kg/m ²
	Колотрази [mm]	
	1.3 - 8.5	9.1 - 13.6 kg/m ²
	8.5 - 25.4	11.4 - 15.9 kg/m ²
	25.4 - 31.7	12.7 - 17.3 kg/m ²
	31.7 - 38.1	14.5 - 18.2 kg/m ²

Правило “ПАПЦА” при попуњавању колотрага:

За свака 2.54 cm дебљине микро-застора треба додати од 3 mm до 6.5 mm материјала преко нивелете, ради накнадног сабијања током пролаза саобраћаја.

Прорачунати количине микро-застора за попуњавање колотрага је веома тешко. Колотрази се разликују и по ширини и по дубини и то на веома малом растојању. Због тога су дате оквирне вредности потребних количина у зависности од дубине колотрага у табели 12.7.

На слици 12.6 је приказана скица распореда материјала приликом попуњавања колотрага.



Слика 12.6 Распоред слојева у колотрагу

Калибрација машине за прављење и полагање микро-застора

Сваки уређај машине који ће бити коришћен током рада, мора бити калибрисан у присуству надзорног органа. Предходна калибрациона документација, коју покрива тачност количина примењених материјала, не сме бити старија од 60 дана. Документација обухвата и појединачне калибрације сваког од делова који се различито подешавају, а односе се на мерне инструменте. Ниједној машини неће бити допуштен рад уколико њена калибрација није у потпуности прихваћена.

Временски услови

Полагање микро-застора не сме бити рађено ако је температура коловоза или температура ваздуха испод 10 °C и у опадању, али може бити полаган ако су обе изнад 7 °C и у порасту. Микро-застор не сме бити постављан ако постоји опасност да буде смрзнут пре истека периода од 24 сата од тренутка постављања. Мешавина не сме бити постављана кад временски услови продужавају термин отварања за саобраћај после разумног времена.

Контрола саобраћаја

Целокупна контрола саобраћаја мора бити у складу са државним саобраћајним прописима. Погодни поступци треба да буду коришћени за регулацију ради заштите микро-застора од оштећења услед саобраћаја. Отвореност деонице за саобраћај у функцији је прихватања извршених радова. Надзорни орган ће бити обавештен о примењеној методи контроле саобраћаја.

Припрема површина

Непосредно пре полагања микро-засторне масе, површине морају бити очишћене од вишка материјала, вегетације и осталих непотребних предмета. Сваки стандардни начин чишћења је прихватљив. Ако се користи вода, пукотине морају бити пажљиво осушене пре полагања микро-засторног слоја. Шахтови, сливници и остали сервисни отвори морају бити заштићени на погодан начин од микро-засторне масе. Надзорни орган одобрава припремљену површину. Није дозвољено ниједно суво зрно агрегата које је испало из машине и остало на површини.

Везни слој

Везни слој није потребан, осим ако је површина коју треба покрити веома сува и испуцала или је од бетона или опеке. Ако је потребно, везни слој треба да буде из једног дела битуменске емулзије и три дела воде и распрскаван стандарним распрскивачем. Асфалтна емулзија може бити анјонска или катјонска. Распрскивач мора бити у стању да прска од 0.15 до 0.30 lit/m². Везни слој треба неговати пре полагања микро-застора. Ако постоји потреба за везним слојем, то мора бити наведено у пројекту.

Пукотине

Пожељно је да се пукотине претходно обраде са прихватљивим заптивним материјалом пре полагања слоја од микро-застора.

Постављање микро-застора

Ако стање пута то захтева, површину треба претходно овлажити паром из бокса за распрскавање. Количину спреја треба прилагодити током дана на одговарајућу температуру, текстуру површине, влажност и осушеност застора.

Микро-застор мора имати потребну конзистенцију по изливању из машине за мешање. Довољна количина материјала треба да буде лагерована, тако да увек може бити постигнуто комплетно покривање планиране површине. Претовареност треба избегавати. Нису дозвољене грудве или неумешан агрегат.

Трагови, као они од надмерених зрна, нису допуштени на завршеној површини. Ако се они и појаве, посао ће бити заустављен све док извођач не уради корекције и надзорни орган их одобри. Трагови су класификовани према дужини и ширини: 13 mm ширине и 100 mm дужине или 25.4 mm ширине и 76.2 mm дужине на сваких 25 m² површине. Попречне шаре и подужни трагови од 6 mm нису допуштени на равњачи од 3 m.

Спојнице

Никакав вишак материјала и непокривене површине нису допуштени на подужним и попречним спојницама. Извођач треба да обезбеди опрему за разастирање погодне ширине да би произвео што је мање могуће подужних спојница током извођења радова. Када је то могуће, подужне спојнице треба постављати на месту линије саобраћајне траке. Половина прелаза и непаран

број прелаза ће бити коришћени као минималан број прелаза. Ако је половина прелаза искоришћена, то не смеју бити последњи прелази било које покривене површине. Преклопи преко суседне траке могу да буду само 7,5 cm дуж подужне спојнице. Исто тако, неравност на спојницама мора бити мања од 6 mm на равњачи од 3 m.

Стабилност мешавине

Микро-застор поседује довољну стабилност тако да се прерани прекид у материјалу у сандуку разастирача не може догодити. Мешавина треба да буде хомогена за време и после мешања и разастирања. Сувишна вода слободно избија на површину емулзије, а сегрегација крупнијих од ситнијих зрна, у емулзији, се не догађа. Додавање воде прскањем у сандук за разастирање, није допуштено.

Ручни рад

За мале површине, на којима не може да се манипулише самоходним машинама за разастирање, микро-засторна маса може бити истоварена директно и одмах потом разастрта ручним разастирачима. Треба водити рачуна да све површине буду равномерне дебљине. Ручним радом се завршава посао и при раду већих машина за разастирање.

Линије

Треба водити рачуна о осигурању правих линија дуж ригола и банкина. Прескакање ових површина није дозвољено. Линије на укрштајима треба држати право због визуелног ефекта. Ако је потребно, погодан материјал треба употребити за означавање ивичних трака. Њихове висине смеју да варирају ± 50 mm, на сваких 30 m дужине.

Чишћење

Све површине, пешачке стазе, риголи и укрштаји, треба да буду очишћени од асфалтне масе и њихова чистоћа одобрена од стране надзорног органа. Извођач мора да уклони и очисти све остатке од извођења радова.

На наредним сликама су показани неки од објеката по којима је постављан микро-засторни слој и машине којима се тај слој полаже.



Слика 12.7 Попуњавање колотрага микро-застором



Слика 12.8 Текстура микро-застора



Слика 12.9 Аеродромска писта пресвучена микро-застором



Слика 12.10 Машина за полагање микро-застора

12.3 ТАНКИ И УЛТРА-ТАНКИ АСФАЛТИ

Дефиниције

Врло танки асфалтни застори према NF P 98-137 (Француски стандард, ознака за мешавину ВВТМ) су слојеви од 20 до 25 mm са апсолутним минимумом од 15 mm у свакој тачки слоја. Могућа збијеност таквих слојева је 85 до 90% за **ТИП 1**. Количина материјала је од 40 до 60 kg/m².

Ултра-танки асфалтни застори (ознака ВВUМ) нису још стандардизовани. Сама дефиниција подразумева нове технолошке концепте и развијање нових техничких поступака. Њима се обједињују следеће функције асфалтног застора:

- “водоотпорни-везни” (waterproofing/binding) слој мора бити дебљи од везног премаза (tack coat)
- мешавине по врућем поступку, прављене у асфалтним базама, примењене су у слојевима чије дебљине одговарају дебљинама максималног зрна минералне мешавине. Количине материјала су између 25 и 35 kg/m², у зависности од гранулометријског састава

Танки асфалтни застори, према англо-саксонским поступцима за димензионирање то су слојеви дебљина до 40 mm, прављени по врућем поступку. Постојећи поступци за димензионисање танких асфалтних застора, који се за сада користе, се односе на одређивање дебљина горњег и доњег носећег слоја конструкције пута, чији је застор од добро сложеног агрегата. На такве подлоге се поставља танак слој асфалта.

Примена

Битуменизирани материјали за врло танке и ултра-танке засторе имају слично подручје примене. Развијени су да побољшају постојеће карактеристике застора, коловозне конструкције у добром стању, у погледу носивости и деформабилности.

У поступцима одржавања, ове две врсте асфалтних материјала се користе као слој нове коловозне конструкције, али и као слој за пресвлачење постојећег застора ради бољег одвајања функција новог застора од постојећег. Захтеване карактеристике доброг застора су концентрисане у **врло танком слоју** (врло танки асфалтни слојеви се користе много више за ове сврхе од ултра-танких слојева).

Категоризација слојева застора је настала услед специфичне природе урбаног окружења.

Класификација

Класе врло танких асфалта (ВВТМ) су дефинисане у Француском стандарду NF P 98-137 у:

- асфалте ТИП-а 1 и ТИП-а 2 који се разликују по садржају шупљина постигнутих у опиту при ротационом смицању (rotary shearing test) (ТИП 1: 6 до 17% шупљина, ТИП 2: 18 до 25% шупљина)
- 0/6, 0/10 и 0/14 гранулације које су често дисконтинуалне
- по везиву које може бити без додатака или модификовано полимерима (или са додатком влакана) усвојено под називом “административна” или “извођачева” пројектна мешавина

Најчешће се користе мешавине **ТИП-а 1** танког асфалта гранулације од 0/10 са недостајућим фракцијама од 2/6 и нешто ситније гранулације од 0/6 са дисконтинуитетом фракције од 2/4.

Мешавине **ТИП-а 2** врло танког асфалта, са отвореном текстуром, одговарају порозним асфалтима у танким слојевима. Њихова употреба је још ограничена. Производе се једино са полимеризованим везивима.

Ултра-танки асфалти (ВВUM) припадају извођачким производима и поступцима и карактерише их:

- гранулација од 0/6, 0/8 или 0/10 (без гранулације од 0/14) и са дисконтинуитетом (најчешће од 2/4 или 2/6)
- природом асфалтног везива и "водоотпорног-везног слоја" (waterproofing/binding)
- примењени поступак разастирања: одређена опрема, финишери са прскалицама и стандардне машине

Мешавине - Производња - Примена

Врло танак асфалтни застор (ВВТМ) је у основи прилагођен највећем зрну у мешавини и има повећан садржај везива (плус 0.2% до 0.5%), док се ултра-танки асфалтни застори изводе у врло танком слоју и са смањеним учешћем песка (од око -5 до -15%).

Са употребом модификованог везива, асфалтна мешавина за врло танке засторе, постаје у највећем броју случајева дисконтинуална, са значајним падом садржаја песка (средња вредност је 23 до 28% у односу на оригиналну количину од 30 до 35%).

Овај напредак у пројектовању минералне мешавине такође укључује и употребу чистог битумена, са преосталим песком (+5 до 12% песка) и мање садржаја везива (-0.2 до -0.4%).

Узимајући у обзир њихове дебљине слојева, пројекат минералне мешавине је дефинисан помоћу ВВТМ стандарда са намером само да се:

- одреди тип ВВТМ жирокопским набијачем "gyratory shear compactor (GSC)" на слици 12.11
- развије отпор спирању битуменског везива водом (stripping) (Дуриезов опит - Duriez test)
- процене промене у макротекстури помоћу опита симулације користећи апарат за мерење колотрага "wheel tracking rutting tester" на слици 12.12

С обзиром да су ултра-танки асфалтни застори (ВВUM) још у експерименталној фази и пошто још нема адекватних докумената да би била одређена мешавина, могу бити од користи GSC и Дуриез-ов опит.

За пројекат мешавине се најчешће користи гранулација од 0/10 са дисконтинуитетом на 2/6 и гранулација од 0/6 са дисконтинуитетом на 2/4 (што је 5 до 10% пројеката, али ова пропорција је у порасту).



Слика 12.11 Француски апарат за жирокопско сабијање



Слика 12.12 Француски апарат за мерење отпорности на колотраге

Гранични појасеви мешавина приказани су у следећој табели:

Типови мешавина

Карактеристике	ВВТМ		ВВУМ (ултра-танки асфалти)
	(врло танки асфалти)		
	ТИП 1	ТИП 2	
6/10 или 4/6 (%)	70 - 80	75 - 88	70 - 85
0/2 (%)	20 - 27	10 - 22	15 - 28
Ситних честица (%)	7 - 9	4 - 5	4 - 8
Садржај битумена 0/6 (%)	6.2 - 6.7	5.0 - 5.5	5.8 - 6.4
0/10 (%)	5.7 - 6.2	4.5 - 5.5	5.0 - 5.8

Напомена: - Садржај битумена може бити мало већи него што је приказано у табели ако се користе полимеризована везива (+0.1 до +0.3%) или са додатком минералних или органских влакана (пропорције су: 0.2 до 0.4%).

- Чисти битумен који се користи може бити пенетрације 50/70 и 70/100, а понеки пут и 35/50 за врло танке асфалтне слојеве изложене тежем саобраћајном оптерећењу (али, у том случају, полимеризована везива или ојачана влакнима се користе много чешће).

Нема неких посебних карактеристика у производњи танких и ултра-танких асфалтних застора. Пошто ови асфалти имају мале количине песка у дисконтинуалним мешавинама и модификована везива, главни акценат је на:

- температуре загревања агрегата (спречити прегрејавање)
- регуларности облика зрна у фракцији, да би се постигла чиста дисконтинуална мешавина, осигуравајући регуларност макротекстуре (нарочито код мешавина 0/6)
- правилном складиштењу, дозирању и чувању модификованог везива

Врло танки асфалти се уграђују конвенционалном опремом. Финишер ради са фиксираним висином коша, заштићеним од процуривања везива на већ постављени везни слој. За шире деонице, аутопутеве и сл. користе се финишери са широким кошем или два финишера у ешалонираном распореду. Спојнице се обрађују хладним поступком и према досадашњим искуствима, добро се показују.

У одређивању типа и количине емулзије за везни слој, Француски Стандарди препоручују коришћење модификоване емулзије (за саобраћај ≥ 300 до 750 камиона по дану) са минимумом од 400 gr/m² резидуалног битумена. За сада је прихваћено, као ванредна пракса, да 300 до 400 gr/m² резидуалног битумена у чистој битуменској емулзији не прави проблеме у везном слоју, без обзира на место уграђивања или величину саобраћаја.

Оригиналност технике коришћене за ултра-танке асфалтне засторе, састоји се у постављању слоја при брзини ≥ 15 m/min, у исто време и "водоотпорног везног" (waterproofing/binding) слоја (са 600 до 800 gr/m² резидуалног битумена) и вруће мешаног асфалта у дебљини која одговара максималном

зрну мешавине (25 до 35 kg/m²). Специфична опрема је специјално направљена за ове врсте операција (EURODUIIT, ENROVIA, GRANUCHAPE и ESTERE). Тада, финишери опремљени са добро подешеним распршивачима и складишним простором за уградњу ових ултра-танких застора ступају на сцену. Коначно, у протеклих неколико година, конвенционална опрема је, такође, била у широкој примени. Касније, биле су предузете специјалне мере предострожности, нарочито у погледу температуре, да би била гарантована компактност “водоотпорног-везног” (waterproofing/binding) слоја и да би се предупредило чупање зрна из асфалтне масе. Поред ових, корисне су и следеће напомене:

- користити мање количине битуменског везива
- дробину попрскати са везивом (2 до 3 lit/m²)
- пронаћи специјална везива које се неће лепити за тачкове камиона и финишера (прва искуства у примени оваквог везног слоја су охрабрујућа)

Такође, значајно предозирање асфалтне масе је често повезивано са коришћењем конвенционалне опреме. У ствари, тада се добија нешто слично танком асфалту.

У духу оригиналности пројектовања ултра-танког асфалтног застора, модификоване битуменске емулзије су коришћене у готово свим случајевима (осим за деонице са лаким саобраћајним оптерећењем 150 до 300 камиона по дану), да побољшају карактеристике “водоотпорног-везног” (waterproofing/binding) слоја.

Специјална опрема за уграђивање овог застора омогућује продуктивност од 30000 до 35000 m²/дану (ради поређења, уграђивање врло танких асфалтних застора на аутопутевима је 20000 до 30000 m²/дану).

Сабијање врло танких и ултра-танких асфалтних слојева треба радити одмах после пролаза финишера са 5 до 9 прелаза ваљака са глатким тачковима. Саобраћај може бити пуштен за мање од једног сата после завршених радова.

12.3.1 ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ

За димензионисање танких асфалтних слојева се користе следећи поступци:

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) - Америчко удружење за јавне путеве и транспорт
- The Army Corps of Engineers - Армијски Инжењеријски Корпус
- National Stone Association (NSA) - Национално удружење за камен
- AUSTRROADS - Аустралијско упутство за димензионисање коловозних конструкција
- Conception et dimensionnement des structures de chaussée - Guide technique - Француско упутство за димензионисање коловозних конструкција

МЕТОД АМЕРИЧКОГ УДРУЖЕЊА ЗА ЈАВНЕ ПУТЕВЕ И ТРАНСПОРТ

Лако се може рећи да је то поступак за димензионисање путева са малим саобраћајним оптерећењем. Улазни параметри су:

- саобраћајно оптерећење
- климатски услови
- квалитет постељице
- поузданост

Саобраћајно оптерећење је подељено у три нивоа:

- високи (700000 до 1000000),
- средњи (400000 до 600000)
- низак (50000 до 300000)

Постељица је класификована у пет категорија:

- врло добра
- добра
- погодна
- слаба
- врло слаба

Климатски услови су приказани преко шест климатских зона САД-а.

Резултат прорачуна је структурни број (SN). Распони структурног броја су приказани према квалитету постељице, саобраћајном оптерећењу и климатској зони. Процедура димензионисања је детаљно приказана у **Поглављу 4 - Путеви са малим саобраћајним оптерећењем.**

МЕТОД ИНЖЕЊЕРИЈСКОГ КОРПУСА АМЕРИЧКЕ ВОЈСКЕ

Метод инжењеријског корпуса америчке војске заснован је на димензионисању танких асфалтних слојева на горњим и доњим носећим слојевима од невезаног агрегата. Овај поступак узима у обзир:

- саобраћајно оптерећење (приказано помоћу пројектног индекса - Design Index)
- носивост постељице изражену преко CBR-а
- замор материјала због циклуса мржњења и загревања
- чврстоћу материјала у застору

Пројектни индекс даје распон понављања стандардног осовинског оптерећења од 80 kN за сваки број пројектног индекса (на пример, за пројектни индекс DI = 5, распон покривености је од минималне вредности од 207000 до максималне вредности од 980000). Покривеност је дефинисана као довољан број понављања прелаза пројектног возила, тако да покрије целу ширину возне траке, са најмање једним понављањем напона. Овај

поступак је заснован на CBR-у и користи кофицијент корелације дебљине слојева (thickness adjustment factor).

Димензионисање је базирано на једначини која даје захтевану дебљину застора на подлози чија је чврстоћа позната (помоћу CBR-а), тако да је чврстоћа горњег слоја већа од чврстоће слоја на који се овај поставља.

ПРИРУЧНИК ЗА ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ФЛЕКСИБИЛНИХ КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА НАЦИОНАЛНОГ УДРУЖЕЊА ЗА КАМЕН

Овај поступак је модификација претходног. Носивост постељице је вреднована помоћу CBR-а. Ако није могуће одредити чврстоћу тла у постељици, онда се помоћу дијаграма корелације може израчунати вредност CBR-а за различите системе класификације постељица. Национално удружење за камен (NSA) препоручује четири категорије за оцену носивости постељице:

- одлична (CBR ≥ 15)
- добра (CBR = 10 - 14)
- погодна (CBR = 6 - 9)
- лоша (CBR ≤ 5)

Ефекти саобраћајног оптерећења на коловозни застор су приказани помоћу понављања саобраћајног оптерећења. Ти ефекти су распоређени у три групе:

- група 1 - путничка возила и лака доставна возила
- група 2 - двоосовински натоварени камиони или велика возила натоварена лаким теретом
- група 3 - камиони и комбинована натоварена возила са три и више осовина

Овај поступак комбинује еквивалентно саобраћајно оптерећење (ECO) у пројектованој траци током пројектног периода и саобраћај са растом пројектног индекса, као меру саобраћајног оптерећења:

- DI - 1, група 2 или 3, ECO ≤ 5
- DI - 2, < 10 % групе 2, ECO = 6 - 20
- DI - 3, < 10 % групе 2 и 1 % групе 3, ECO = 21 - 75
- DI - 4, 15 % групе 2 и 1 % групе 3, ECO = 76 - 250
- DI - 5, 25 % групе 2 и 10 % групе 3, ECO = 251 - 900
- DI - 6, > 25 % групе 2 и 3, ECO = 901 - 3000

За класу постељице изражену преко CBR-а и саобраћај изражен помоћу пројектног индекса (DI), добијају се дебљине слојева асфалтног застора. Ако у климатској зони постоје и мразеви, за исте пројектне индексе додају се дебљи слојеви коловозног застора. Пројектни поступак је детаљно приказан у Приручнику за димензионирање флексибилних коловозних конструкција националног удружења за камен.

Уобичајене карактеристике танких и ултра-танких асфалтних застора

Карактеристике које се односе на водонепропусност, повећану равност, рефлектовање прслина и апсорпцију звука приликом котрљања точкова возила, могуће је поредити код свих танких асфалтних слојева.

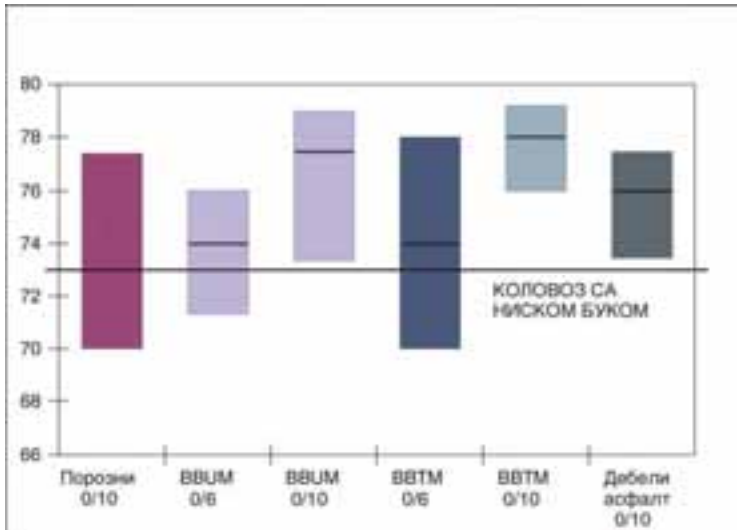
Водонепропусност је, у принципу, постигнута повећаном количином битумена, у везном слоју, који је компензован малом збијеношћу врло танких асфалтних слојева (85 до 90%), а нарочито ултра-танких асфалта под претпоставком да су слојеви коректно и континуално постављани.

Равност се постиже квалитетном извођачком опремом, иако су слојеви које треба извести танки. Врло танки асфалтни слојеви допуштају јасан напредак у комфору вожње, кад су постављени на одређеним бетонским засторима као покривачи спојница. Ултра-танки асфалтни слојеви, такође, допуштају напредак у погледу равности, осим кад је слој на који се поставља нераван - тада варирање дебљина може бити штетно по карактеристике застора.

Рефлектовање прслина код врло танких асфалтних слојева је веома активно (нпр. код попречних пукотина услед скупљања). Оне се показују на површини врло брзо, понекад чак после прве године од постављања ултра-танког асфалтног слоја. Тај процес је спорији код врло танких асфалта гранулације 0/10. Обрађује се заливањем пукотина, чак иако остане видљив у асфалтном слоју.

Веза између отпора трењу и избора агрегата који има висок степен углачаности (Polish Stone Value - PSV 0.5 до 0.55) увек помаже да се постигне висок степен трења и његова трајност, код танких и ултра-танких асфалтних застора. Неке посматране деонице су показале разлике у PSV од 0.5 до 0.7 (максимална вредност PSV је 0.2 до 0.54), што је резултирало брзим падом (за две до три године) отпорности на клизање. Овај пад током времена расте. Таква редуција у отпору на клизање је присутна и при већим брзинама, са мање израженим разликама. Губитак трења на врло танким и ултра-танким засторима је сличан као и код стандардних асфалтних слојева.

Акустичке карактеристике дефинисане француско-немачким мерним поступком, помоћу контролисаног возила (Француски Стандард NFS 31-119), карактеришу коловозну површину преко контактне буке ПНЕУМАТИК-КОЛОВОЗ. Корисне мере садржане у "буци" су приказане на дијаграму Регионалне истраживачке лабораторије у Стразбуру на слици 12.13.



Слика 12.13 Поређење буке изазване котрљањем на различитим танким и ултра-танким носећим површинама у распону од 1 до 4 године коришћења

- **0/6 хабајући слојеви** су класификовани међу материјале са ниском буком (вредности < 76 dB(A)), као и свежи порозни асфалти. Међутим, насупрот порозним асфалтима, може се помислити да су 0/6 хабајући слојеви, пошто је површина 0/6 асфалта непроменљиве дебљине, добрих акустичких особина, стабилних током времена. У градским срединама, околна мерена бука на фасадама зграда, пре и после полагања врло танких и 0/6 ултра-танких асфалта, систематично се смањује просечно за 4 dB(A) (у распону од 2 до 7 dB(A)), у зависности од типа претходне коловозне површине (истрошен асфалт али и камена коцка).
- **за ТИП 1 - мешавину 0/10** ниво буке је виши. Нема парцијалне апсорпције звучних таласа у маси коловозне површине као у случају порозних асфалта.

Специфичне карактеристике танких и ултра-танких асфалтних слојева

ТИП 1 - 0/10 врло танак асфалтни застор (ВВТМ)

- а) **Мешавина са модификованим везивом и/или додатком влакана.** Најчешћи пројектни принципи које користе лабораторије извођачких фирми су: дисконтинуална мешавина 0/10, крупнозрна, са високим садржајем везивне масе (битумен + пунило) и дају следеће карактеристике застора:
 - врло уједначен изглед

- добра текстура (уједначена пешчана испуна од око 1 до 1.3 mm)
 - одличне карактеристике трења
- б) Мешавина са чистим битуменом.** Детаљна анализа одговарајућих узорака показује врло јасан развој у принципима пројектовања мешавине током периода од 1985 до 1995:
- прве мешавине развијене од 1985. до 1986. у државним лабораторијама су 0/10 и 0/14 са значајним или модификованим дисконтинуитетом, али са заједничким карактеристикама - висок проценат песка (често више од 35% пролаза на сити од 2 mm) и са веома меким битуменом (70/100 pen^o у једној трећини пројеката)
 - од 1989. до 1990., гранулометријске криве су постале сличне онима са полимеризованим везивима и чешће прављене са тврђим чистим битуменима (50/70 pen^o, 35/50 pen^o)

Испитивање понашања врло танких асфалтних слојева са чистим битуменом није могуће без узимања у обзир наведених достигнућа.

в) За пешчану мешавину, важи:

- основне карактеристике површине су сличне онима са класичним дисконтинуалним асфалтним мешавинама (дебљине слојева од 6 до 10 cm)
- брзе промене чим оптерећење постане значајно (више од 700 камиона/траци/дану) резултује затварањем површине точковима возила (праћено незнатним течењем)

г) За крупнозрнију свежу мешавину, важи:

- основне карактеристике површине су истог реда са онима које имају врло танки асфалтни слојеви са полимеризованим везивом
- уз још ограничено искуство (у најбољем случају 5 година) и још малим бројем узорака, својства под саобраћајем су обећавајућа. Пад почетних карактеристика настаје једино ако се примењују под тешким саобраћајним оптерећењем (више од 700 камиона/траци/дану), али процентуално мање него код претходне мешавине

Услови за примену “чистог битумена / модификованог битумена”

За велика саобраћајна оптерећења, због мера опреза и једноставности, Француско "Упутство за примену стандарда на аутопутевима" препоручује употребу мешавина са модификованим везивима (или са додатком влакана). Ризик од употребе чистих битуменских мешавина је дакако мали у континенталним климатским зонама (више од 750 камиона/траци/дану) и за јужну климатску зону (више од 300 до 750 камиона/траци/дану).

0/10 Ултра-танак асфалтни застор (ВВUМ)

Почетне карактеристике. После почетних проблема развоја оперативне технике, уједначеност разастирања ултра-танких асфалта је данас боље контролисана. Ако се примењује конвенционална опрема, тренутна хомогеност је праћена са предозирањем асфалтне масе по квадратном метру. Честа је појава места са 40 kg/m^2 асфалтне масе, те такве површине подсећају пре на врло дебеле асфалте.

Међу осталим почетним карактеристикама мешавине 0/10 ултра-танког асфалтног застора треба поменути:

- висок ниво макротекстуре (уједначена пешчана испуна од око 1.3 до 1.8 mm), што представља добру хоризонталну дренажу током кише
- високи резултати отпора трењу при брзинама $\geq 90 \text{ km/h}$ (боље него код врло танких асфалта)

Промене током времена. За разлику од врло танких асфалта са модификованим везивом, број деоница са видљивим променама на застору, након неколико година није занемарљив: у разматраним узорцима, они износе од 30% до 40%. Поменута оштећења укључују:

- спирање битумена
- много чешће, излучевине

Она су последица веома оптерећених зона, али су повезане и са неправилностима у извођењу слоја који се налази испод ултра-танког асфалта.

Ове промене су придодате средњем паду карактеристика застора од 10 до 20% у погледу геометријске храпавости и отпора на клизање за век употребе од 5 до 10 година (3 до 5 милиона камиона).

12.4 РЕЦИКЛАЖА

Одржавање и обнова путева кошта, тражи време, користи квалитетне материјале и загађује природну средину. Поправљањем карактеристика материјала из коловоза или расположивих отпадних материјала - **регенерацијом** (шљаке, разних пепела, гуме, стакла итд.) или поновним искоришћавањем - **рециклажом**, постижу се уштеде у материјалу и енергији и смањује загађење природне средине. Процесом прераде могу да буду обухваћени флексибилни и крути коловози, заштитне ограде, саобраћајни знаци и низ пратећих елемената.

Са регенерацијом асфалтних застора почело се давне 1915. године, а у Европи интензивније тек од 1970. године. Основни поступци прераде застора су: прерада застора, прерада застора и подлоге, и прерада застора у централним постројењима.

Поступци регенерације и прераде (рециклаже) од 1991. год. у САД и од 2000. год. у ЕЗ прихваћени су као доминатни поступци у политици одрживог развоја, заштити природне средине и економичној изградњи и одржавању путева. У САД је 2000. год. регенерисано 66 милиона тона материјала (који је употребљен у путевима) и при том остварена уштеда од 300 милиона \$. При Федералној администрацији за путеве - FHWA у САД постоји посебно оформљена група "Recycled Materials Resource Center - RMRC" која координира примену поступака рециклаже у путарском окружењу. Међутим, стручњаци FHWA признају да се у Европи (Шведска, Данска, Немачка, Холандија и Француска) даље одмакло у примени рециклаже материјала у путевима [14].

12.4.1 МОГУЋИ ПОСТУПЦИ РЕГЕНЕРАЦИЈЕ

12.4.1.1 РЕГЕНЕРАЦИЈА

Регенерација (на енглеском reclaim) представља поступак у коме се уклања и/или поновно прерађује материјал из коловоза. Најчешће се примењује код асфалтних застора који се стружу до 5 cm или копају знатно дубље и добијени материјал транспортује до стабилних постројења ради даље обраде.

12.4.1.2 ПЕРАДА - РЕЦИКЛАЖА (RECYCLE)

Начешћи облик регенерације је прерада добијеног (стругањем) материјала и његово враћање у приближно претходни (мало побољшани) облик у коловозну конструкцију. Основна термилошка разлика између регенерације и прераде - рециклаже, је што се у поступку прераде побољшавају физичко механичке карактеристике саструганог материјала, додатком недостајућих фракција агрегата или освеживача везива. На овај начин поступком прераде, за разлику од регенерације (где се једино делује на гранолометриски састав - величину зрна) може се постићи устаљен квалитет новодобијеног материјала. Отприлике 80 до 85% саструганог асфалта се враћа назад у засторе коловозних конструкција било поступком прераде по топлим или хладном поступку, а знатно мање се користи као невезани агрегат за подлоге и тампоне.

Могући поступци коришћења саструганог или ископаног материјала

Састругани или ископани материјал може да се искористи за поступак прераде асфалтних застора по топлим и хладном поступку, израду разних стабилизација, изградњу доњих и горњих подлога, насипа или испуна.

Агрегат за асфалт бетоне

У поступку рециклаже по топлим или хладном поступку, састругани агрегат се користи као компонента (агрегат) нове асфалтне мешавине, али која захтева знатно мање везива.

Топла асфалтна мешавина (добијена у стабилним постројењима)

У поступку топле прераде у стабилним постројењима - асфалтним базама (континуалним и дисконтинуалним), састругани асфалт се обрађује на исти начин као и било која фракција агрегата (дробри и сеје).

Топла асфалтна мешавина (прерада на лицу места)

У овом поступку претходно загрејани асфалтни застор се струже - гребе, по потреби побољшава гранулометријски састав саструганог асфалта, убацује освеживач везива, меша и сабија.

Хладна асфалтна мешавина (добијена у стабилним постројењима)

Осим загревања, цео поступак је сличан оном за обраду по топлим поступку у стабилним постројењима.

Хладна асфалтна мешавина (прерада на лицу места)

Поступак прераде по хладном поступку на лицу места захтева примену специјалних машина или композиције више машина, које копају постојећи коловоз до дубине веће од 15 cm, додатно га дробе, мешају са битуменском емулзијом (или пенушавим битуменом), разастуру и сабијају.

Невезани агрегат у подлози

Састругани агрегат се додатно дробри или меша са конвенционалним невезаним агрегатима (може да се мешају, такође, и асфалтни и бетонски састругани материјали), сеје и уграђује у горње и доње подлоге путева. У принципу овако компоновани слојеви имају мању носивост од конвенционалних невезаних агрегата.

Стабилизирани материјал у подлози

Да би се произвела доња или горња подлога од стабилизованог саструганог материјала он се мора претходно издробити, просејати, измешати са неким од стабилизационих (везујућих) материјала и уградити.

Насипи и испуне

Депоновани састругани материјал може да се употреби и за израду насипа и разноразних испуна, али оваква његова примена је ретка, јер је скупа.

Прерада застора

Прерада застора се ради најчешће до дубине од 6 cm. Она се изводи у циљу побољшања равности застора, смањења рефлектованих пукотина и повећања отпора клизању (незнатно се повећава носивост).

Састругани или растрешени материјал из застора може да се примени истовремено (освежен додатном количином битумена или неком од фракција агрегата) за обнову постојећег застора, израдом подлоге за неки други пут или за стабилизацију банкина. Прерада застора може да се ради по топлим и хладном поступку (прва машина за обраду застора по хладном поступку појавила се 1936. године).

Од 1930. године до данас основне врсте опрема и одговарајућих технолошких поступака су: равнање, растресање или стругање загрејаног застора и равнање или стругање хладног застора. Основна разлика између стругања и растресања је што се при стругању на застор делује искључиво силом (што доводи до цепања зрна агрегата и формирања површина агрегата, које нису обавијене везивом), а код растресања се делује топлотом (у последње време искључиво инфрацрвеним зрацима) и специјално обликованим гребачима (који не цепају зрна агрегата).

Машине које равнају загрејани застор користе се првенствено за одржавање подужног и попречног нагиба коловоза (најчешће на мостовима, тунелима и подвожњацима). Трошкови загревања и равнања до дубине од 2 cm крећу се од 0.18 до 0.72 \$/m².

Машине које растресају загрејани застор (загревају, растресају, додају по потреби везиво и/или агрегат, разастиру и збијају) користе се за прераду застора на лицу места и корекцију разних неправилности (равност, рефлектоване пукотине, отпор на клизање и освежавање остарелог асфалта). Трошкови загревања и растресања до дубине од 2 cm крећу се од 0.15 до 0.60 \$/m².

Машине које стружу загрејани застор данас се практично не користе јер су их замениле машине које то исто раде по хладном поступку. Трошкови њиховог рада за дебљину обраде застора од 2 cm крећу се од 0.96 до 1.20 \$/m².

Машине које равнају застор по хладном поступку користе се лети за уклањање набора на асфалтним засторима и такође, уклањање оштећених површинских обрада. Најчешће се користе машине које равнање обављају до дубине од 5 cm.

Машине које стружу по хладном поступку користе се за асфалтне и бетонске засторе. Основна намена ових машина је да уклањају површинска оштећења (колотраге, таласе, излучевине и љуспе), побољшавају отпор клизању и припремају асфалтне и бетонске засторе за ојачање. Састругани материјал може да се примени на лицу места или у централним постројењима. Дубина стругања креће се до 13 (25) cm са брзином напредовања око 0.25 m/s. Трошкови стругања за 2.5 cm и утовара саструганог материјала крећу се од 0.42 до 1.20 \$/m².

12.4.1.3 ПЕРАДА ЗАСТОРА И ПОДЛОГЕ НА ЛИЦУ МЕСТА

Прерада на лицу места старих застора од асфалтног или цементног бетона може да се ради са конвенционалном опремом као што су булдозери, вибрациони ваљци, обични ваљци, ломилице коловоза, уситњивачи и мешачи или посебно конструисаним машинама. Са употребом битумена као везивног средства у циљу прераде застора кренуло се од 1940. године, а са употребом цемента од 1942.

Избор опреме и поступак прераде зависе од укупне дубине прераде коловоза и дебљине застора од асфалтног бетона (до скоро је граница за избор ове технологије била 2.5 cm).

Основна предност прераде на лицу места је могућност повећања носивости коловозне конструкције без промене хоризонталне и вертикалне геометрије пута, уз смањење или елиминисање рефлексивних пукотина, побољшање равности застора и повећање отпора на клизање. Највећи недостаци су што контрола квалитета није добра као у централним постројењима, веома отежано уситњавање бетонских застора и прилично велики трошкови због прекида у одвијању саобраћаја.

Предност обраде застора на лицу места је што материјал може да се уклони: (а) са квалитетнијим материјалом замени, (б) замени са постојећим материјалом који је стабилизован кречом, цементом или битуменом или (ц) постојећи материјал преради. Цемент се најчешће користи за стабилизацију подлога (за дебљину од 15 cm потребно је око 25 kg/m² цемента). Укупно трошкови са употребом цемента као везива за дубину прераде од 20 cm су од 1.65 (за 1.5 % цемента) до 2.24 \$/m² (за 4.5 % цемента), а са употребом битумена за дубину прераде од 5 до 10 cm око 0.07 \$/ m².

12.4.1.4 ПЕРАДА ЗАСТОРА У ЦЕНТРАЛНИМ ПОСТРОЈЕЊИМА

Прерада саструганих битуменом или цементом везаних материјала из застора у стабилним постројењима некада је била веома популарна. Поред саструганог материјала у стабилним постројењима обрађују се и изломљени делови коловоза (посебно важи за бетонске засторе).

Основне врсте централних постројења за прераду битуменом везаних материјала су: загревање са директним пламеном, загревање са индиректним пламеном и претходним загревањем додатог агрегата (битуменом везани материјали не морају обавезно да се загревају и могу да се прерађују и по хладном поступку). Цементом везани материјали ако нису добијени стругањем претходно се дробе, а затим прерађују (мешају са цементом или кречом) у централним постројењима по хладном поступку.

Разлика у цени између прерађене и нове асфалтне мешавине (у корист прерађене) износи око 4 \$ по тони.

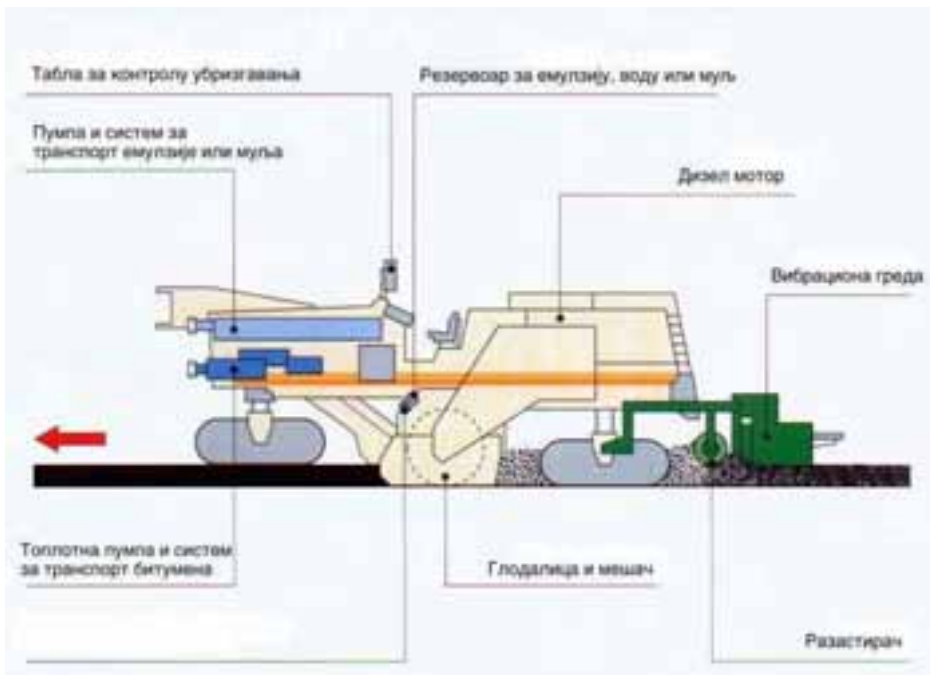
12.4.1.5 ПЕРАДА КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА ПО ХЛАДНОМ ПОСТУПКУ

Поступак прераде - рециклаже по хладном поступку користи се за реконструкцију било које флексибилне коловозне конструкције у циљу повећања њене носивости. Такође, овим поступком се санирају оштећења: попречне пукотине, колотрази, рупе, сва површинска оштећења или њихове комбинације. Посебно конструисаним машинама стружу се асфалтни

слојеви, уситњава ископани материјал и меша са течним везивом и разастире у оквиру пројектованог профила и нивелете.



Слика 12.14 Испумпавање битумена у машину на путу М-22



Слика 12.15 Шематски приказ машине за прераду асфалтних застора

Прерађени битуменом везани материјали по хладном поступку разастире се и сабијају по истом поступку као и топли асфалтни материјали. Количина везива са којим се врши стабилизација ископаног материјала одређује се експериментално у зависности од карактеристика материјала и типа везива. Контрола квалитета одређује се стандардима.

Постоји више типова машина за рециклажу по хладном поступку. Једна од њих је "Cold recycler 2200 CR" компаније Wirtgen приказана на сликама 12.14 и 12.15.

12.4.1.6 ПРАДА ПО ХЛАДНОМ ПОСТУПКУ - ПХП

Прерадом по хладном поступку на лицу места се струже (глође) - копа постојећи асфалтни коловоз, коригује гранулометријски састав, додаје везиво, меша, разастире и добија нова коловозна конструкција (у пракси слој нове коловозне конструкције). Нормално, преко овакве коловозне конструкције ради се асфалт бетонски застор или површинска обрада. Саобраћај се може пустити истог дана.

ПХП поступком постижу се добити:

- смањује се број или у потпуности елиминишу пукотине
- обнавља геометрија коловоза
- елиминишу колотрази
- просечни дневни учинак је око 3 km (две траке)
- дозвољен је саобраћај за време рада
- користе се постојећи природни ресурси
- економичност (уштеде до 50%)

Дебљина асфалтног застора који се полаже преко прерађене коловозне конструкције креће се од 2.5 до 7.5 cm. У односу на традиционалне технике обнове коловозних конструкција, уштеде у трошковима су од 20 до 40%. Пре свега због уштеде енергије (нема загревања) од 40 до 50%.

Основна карактеристика поступка "са прерађивачем по хладном поступку 2200 CR" фирме Wirtgen је:

- прерађује асфалтне слојеве по хладном поступку на лицу места до дубине од 30 cm
- ротационим добошем на коме се налази низ ножева опточених вештачким дијамантима сече - струже коловоз и обрађује се везивом
- састругани материјал може алтернативно да буде обрађен са додавањем цемента, мешавином воде и цемента, битуменом емулзијом или пенушавим битуменом
- додавањем материјала или претходном обрадом постојећег коловоза пре наиласка машине за прераду, може да се прекомпонује састав саструганог материјала



Слика 12.16 Коловозна површина после обраде ножевима



Слика 12.17 Ножеви за стругање

Стабиловање састругане асфалтне масе

Стабиловање се спроводи приликом свих поступака рециклаже асфалтног застора, ради побољшања карактеристика саструганог асфалтног материјала. Са инжењерског становишта, најважнија карактеристика је чврстоћа материјала, која укључује модул еластичности.

Најчешће коришћени стабилизатори су:

- везивна средства као Портланд цемент, креч, летећи пепео као и остали материјали на бази пуцолана
- битуменска средства. Пенушави битумен и битуменска емулзија



Слика 12.18 Разастирање цемента испред рециклажне машине

Бројни други хемијски стабилизатори се могу успешно применити у течном и прашкастом стању, а већина тих производа има улогу побољшања одређених карактеристика материјала, на пример кохезивности.

Додаци за побољшање чврстоће материјала су стабилизатори који продужавају трајност и повећавају отпор на влагу. Везивна средства су најчешће коришћена са битуменским стабилизаторима који побољшавају флексибилност и отпор на замор материјала. Три најчешће коришћена стабилизатора су:

1. Цемент

Најчешће Портланд цемент, Портланд металуршки цемент, згура и други облици везива који нису скупи али су прихватљиви као стабилизатори. Већина земаља има развијену стандардну опиту процедуру за везивна средства која су опште прихваћена међу путарским инжењерима.

Цемент се користи у рециклажном процесу као распршени суви прах по постојећој површини испред рециклатора или као додатак помоћу млазница у комори за рециклажу, као малтерска каша. Тако обрађен

материјал показује добру чврстоћу при притиску са повећаним отпором на влажност. Затезне карактеристике су у почетку добре, али су особине изазване замором веома лоше и услед крутости материјала може доћи до пукотина на површини, ако слој није добро заштићен. Пукотине услед скупљања могу бити смањене на минимум. равномерним односом и мешањем, при влажности мањој од оптималне, али су неизбежне, пошто је то последица реаговања воде и цемента током процеса хидратације.

2. Битуменска емулзија

Катјонска емулзија је најчешће коришћени тип стабилизатора. Као и са осталим типовима емулзија, производни процес је скуп, а осигурање квалитета веома значајно. Неопходна је специјална формула која осигурава да емулзија има захтеване особине распада, када је помешана са рециклираним материјалом - ако је распад емулзије сувише брз, тада мешање не може бити извршено; ако је сувише спор, тада материјал не може да развије затезну чврстоћу и због тога брзо могу настати деформације. Иако емулзија садржи од 30 до 40% воде, она је 100% течна кад се додаје рециклираном материјалу, а проблем засићења се често јавља када је релативно висок садржај ресидуалног битумена, за захтевано дејство стабилизације.

3. Пенушави битумен

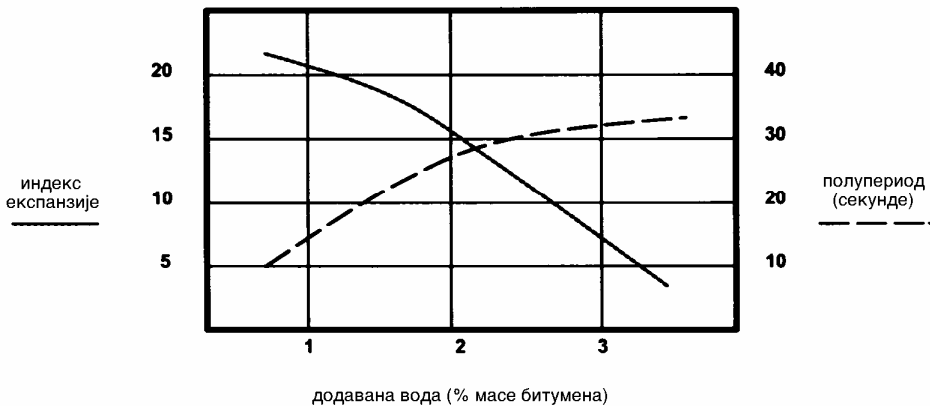
То је релативно нов стабилизатор. Још 1957. године је демонстрирано мешање пенушаваг битумена, који није вискозан, са влажним хладним агрегатом. Насупрот емулзијама, пенушави битумен се респрши међу fine честице у материјалу при околној температури, тако да остатак честица није обавијен. Пенушави битумен је, према томе, стабилизатор и не може се користити за производњу асфалта по хладном поступку.

Пенушави битумен је "произведен" убризгавањем малих количина воде распршене компримованим ваздухом у распршени млаз врућег битумена. Обично се додавањем 2% воде (по маси битумена) изазове да се битумен, на температури од 170 °C, распрши у милионе ситних мехурића, при чему честице воде апсорбују вишак топлоте и пређу из течног стања у пару. Два параметра карактеришу пенушави битумен:

- индекс експанзије - однос максималне запремине битумена у пенушавом стању и запремине битумена пре мешања са водом
- полупериод - време мерено у секундама за смањење пенушаваг битумена до половине од максимално постигнуте запремине

Оба параметра зависе од температуре, степена вискозности и типа битумена, као и количине додаване воде. Најбоља мешавина је кад су индекс експанзије и полупериод високи, али ова два параметра имају инверзан однос са количином додаване воде, што је приказано на следећем дијаграму.

Кад се пенушави битумен меша са агрегатом, мехурићи битумена се разбију у милион ситних “љуспица”, слично као кад се разбије танка стаклена чаша. Ове љуспице битумена имају довољну енергију да се повежу са ситним честицама агрегата, мањим од 0.075 mm. Због тога, за пенушави распршени битумен, агрегат мора да садржи довољно финих честица. По правилу мин. 5% материјала мора бити ситније од 0.075 mm, да би био задовољен квалитет мешавине.



Слика 12.19 Утицај воде на понашање пенушаваг битумена

Пенушави битумен постаје веома популаран као стабилизатор у поступцима рехабилитације коловоза, а велику предност има у примени кад се користе покретне машине за рециклажу. Поступак са пенушавим битуменом користи само битумен и пијаћу воду. Поступак није скуп. Материјали третирани са пенушавим битуменом се понашају на сличан начин, као и материјали који су без њега - битуменске честице једино утичу на акцију “лепљења” после сабијања. Сабијен асфалтни слој, третирани материјал показује све предности грануларног материјала са скелетном структуром, док битуменски малтер окружује крупнозрне честице омогућавајући еластичност која допушта асфалтном слоју толерисање затезних напона. На овај начин може бити конструисан јефтин слој са карактеристикама отпора на замор.

Предност поступка

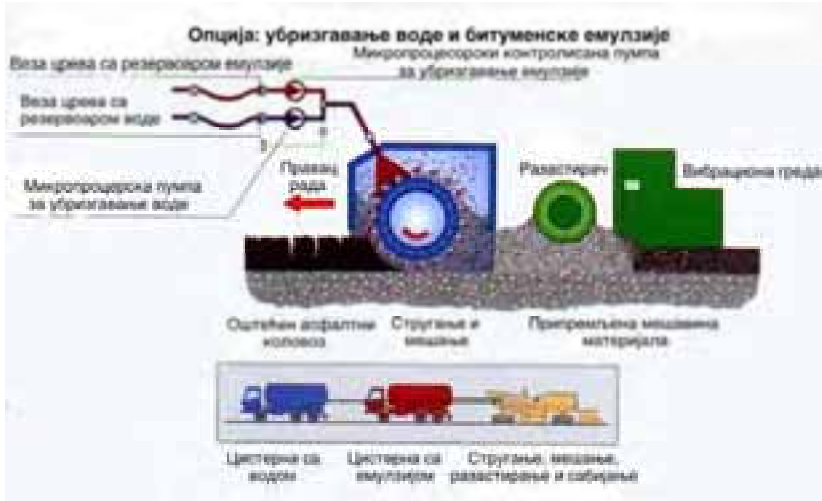
Поступак прераде застора приказан је на сликама: 12.20, 12.21, 12.22 и 12.23.

Предности поступка су:

- у једном пролазу машине, постојећи коловоз се копа до дубине од 25 (30) cm (оптималан учинак), меша са везивом и почетно сабија
- електронска контрола процеса
- аутоматско дозирање везива у функцији од брзине кретања машине

Могуће уштеде су:

- економичност (због рада на лицу места и повећање квалитета постојећег коловоза)
- смањење потребног времена за извођење радова



Слика 12.20 Убризавање воде и битуменске емулзије



Слика 12.21 Убризавање битуменске емулзије и муља



Слика 12.22 Убризгавање пенишаваг битумена и воде



Слика 12.23 Опција када машина ради као стругач - глодалица

Карактеристике материјала

У току стругања добијају се комади материјала до 38 mm или мањи, при чему је максимално дозвољена величина до 51 mm или 63 mm. У табели 12.8 приказан је прихватљив гранулометријски састав саструганог асфалтног материјала.

Запреминска маса саструганог асфалтног материјала креће се од 1950 до 2300 kg/m³, а количина (мало оксидисаног) битумена од 3 до 7%.

Табела 12.8 Типични гранулометријски састав саструганог асфалтног материјала (процента по маси прошлог кроз сито)

Величина сита (мрежа)	Проценти пролаза
37.5 mm	100
25 mm	95 - 100
19 mm	84 - 100
12.5 mm	70 - 100
9.5 mm	58 - 95
7.5 mm	38 - 75
2.36 mm	25 - 60
1.18 mm	17 - 40
0.60 mm	10 - 35 ^a
0.30 mm	5 - 25 ^b
0.15 mm	3 - 20 ^c
0.075 mm	2 - 15 ^d

a. Најчешће мање од 30 процената
b. Најчешће мање од 20 процената
c. Најчешће мање од 15 процената
d. Најчешће мање од 10 процената

Уобичајене карактеристике прерађеног асфалтног материјала по хладном поступку дате су у табели 12.9.

Табела 12.9 Физичко-механичке карактеристике прерађеног асфалтног коловоза

Карактеристике	Типичне вредности	
Физичке	Запреминска маса	1950 - 2300 kg/m ³
	Влажност	Нормално до 5% Максимално 7-8%
	Количина битумена	Нормално 4.5-6% Максимално 3-7%
	Пенетрација битумена	Нормално 10-80 на 25°C
	Апсолутни вискозитет битумена	Нормално 4,000 - 25,000 poises на 60°C
Механичке	Запреминска маса збијеног слоја	1600 - 2000 kg/m ³

12.4.1.7 ПРАДА АСФАЛТНИХ ЗАСТОРА ПО ТОПЛОМ ПОСТУПКУ

Асфалт бетонски застори под утицајем оптерећења и средине, оштећују се и губе еластичне карактеристике. Поступком њихове прераде на лицу места санирају се површинска оштећења, повећава носивост коловозне конструкције, побољшава равност, повећава безбедност (због повећања отпорности на клизање) и повећава еластичност (због освежавања везива).

Прерада или рециклажа асфалтних застора, по топлом поступку на лицу места, почела је да се примењује од 1930. године. Актуелни поступци и технологије прераде асфалтних застора примењују се од 1990. године.

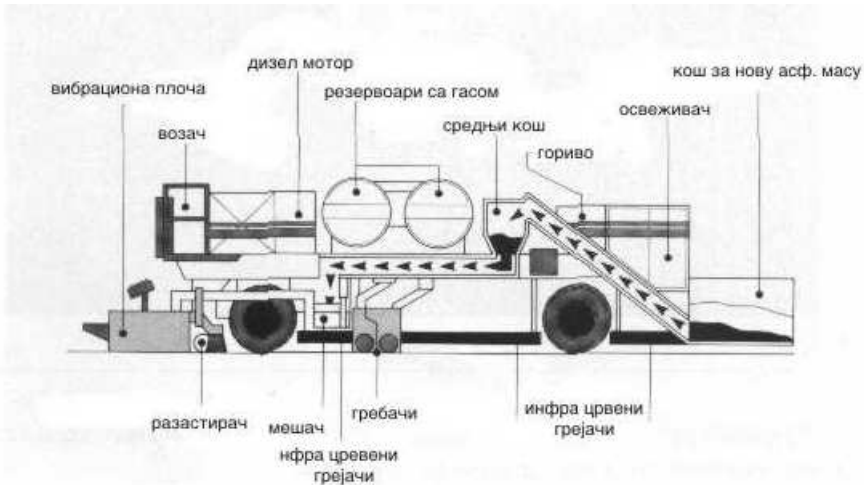


Слика 12.24 Постројење за обраду асфалтног коловоза по топлом поступку

Шта је прерада по топлом поступку на лицу места

Овај поступак састоји се од:

- загревања застора
- механичког гребања - скидања застора
- мешања изгребаног асфалтног материјала из застора са освеживачем везива или додатним агрегатом (по потреби)
- разастирања и почетног сабијања прерађене мешавине
- разастирања доведене асфалтне мешавине, као новог слоја (необавезно)



Слика 12.25 Шематски приказ постројења за ремикс асфалтног застора (WIRTGEN Remixer 4500)

Зашто се користи поступак прераде по толом поступку на лицу места

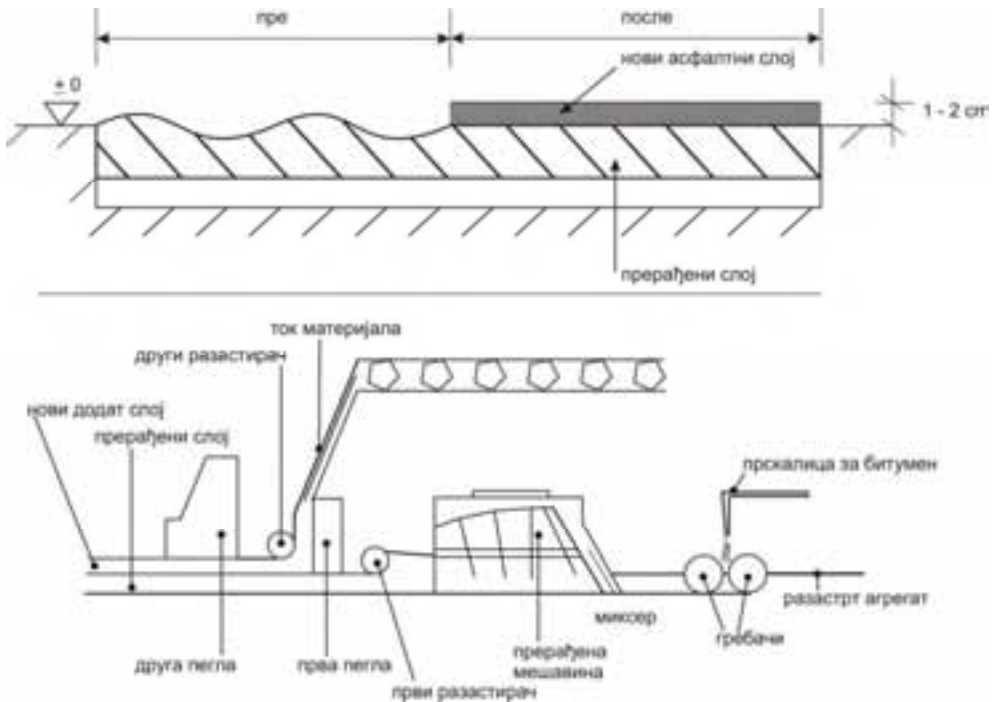
Пре свега јер:

- је то одличан поступак за обнову асфалтних застора (у дубини од 4 до 6 cm)
- је економски веома исплатив поступак и јефтинији до 50% од новог слоја дебљине од 5 cm
- штеди расположиве националне ресурсе - поштује "одрживи развој"
- штеди енергију, јер за производњу тоне асфалта у односу на класичан поступак троши приближно 60% мање енергије и такође мање загађује средину за око 60% (карбон диоксид)

Три основне функције WIRTGEN REMIXER 4500

Основне функције су:

- 100 % прерађује материјал из застора
- побољшава карактеристике постојећег материјала из застора
- ојачава - пресвлачи постојећи застор са донетом асфалтном масом



Слика 12.26 Шематски приказ поступка "remix - plus"

Карактеристично за поступак 100 % прераде је:

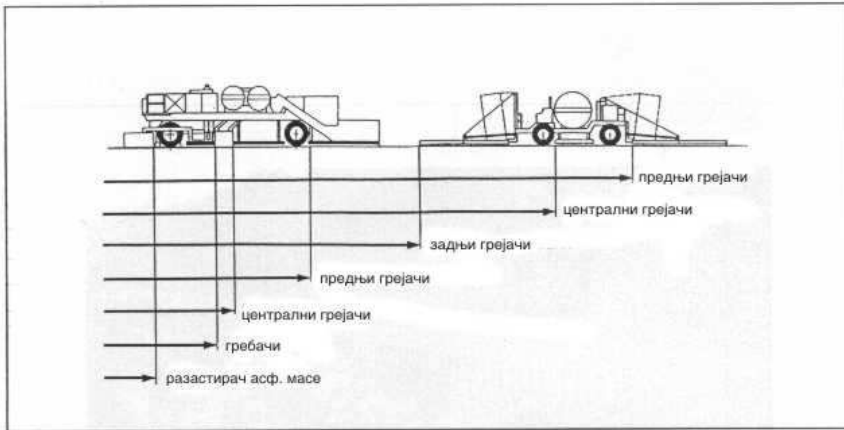
- не додаје се нова асфалтна маса или агрегат
- додаје се освеживач везива
- најчешће се гребе до дубине од 5 cm
 - најбоља примена
 - када је застор оштећен у дубини до 5 cm
 - пукотине нису повезане (пожељно је да су испуњене)
 - колотрази и рупе су испуњени
 - пружа идеалне услове за полагање новог асфалтног слоја

Поступак побољшања изгребане асфалтне мешавине обухвата:

- изгребани асфалтни материјал се меша са новим асфалтом или агрегатом и континуално разасири
 - најбоља примена
 - када се жели побољшање карактеристика постојећег застора у погледу равности и отпорности на клизање

Поступак прераде и ојачања обухвата:

- постојећи застор се прерађује или побољшава, уобичајено до дубине од 4 cm, а затим симултано наноси нови слој асфалта, најчешће дебљине од 2.5 cm. Оба слоја заједнички се збијају ваљцима
 - најбоља примена
 - када је потребно због повећања носивости извршити ојачање - пресвлачење
 - када се жели што мање ометање саобраћаја
 - када се постојећи материјал не може квалитетно побољшати поступком прераде



Изглед целокупне опреме за прераду асфалт бетонских застора по топлим поступку на лицу места

Слика 12.27 Шематски приказ опреме за прераду асфалта по топлим поступку

Предности у односу на остале расположиве методе обнове застора

Основне предности у односу на друге методе су:

- обнавља постојећи слој без деградације основних компоненти (не делује отвореним пламеном на застор већ, инфрацрвеним грејачима)
- не мења хемизам везива (не оксидише битумен)
- не оштећује зрна агрегата (постојећи застор се гребе на начин да се не ломе зрна и не стварају делови агрегата који нису обавијени везивом)
- изузетно мало учешће освеживача везива (0.2 до 0.3 % у односу на учешће битумена у асфалтној мешавини)

- могућност промене гранулометријског састава мешавине (због побољшања карактеристика)
- температурно хомогенизирање третираног материјала
- нивелација постојећег застора (уклањање колотрага и трајних деформација) и избегавање примене изравнавајућег слоја у случају пресвлачања новим слојем
- могућност истовремене обнове постојећег застора и ојачања наношењем новог слоја
- топло везани спојеви - шлусеви између појединих радних трака
- могућност обнове застора и повећања носивости без промене нивелете (градске саобраћајнице, мостови, тунели итд.)
- обнова коловозних конструкција на аеродромима без дужих прекида саобраћаја
- обнављање свих радова са минималним ометањем саобраћаја
- оптимално коришћење постојећег материјала (прерада) без додатних масовних транспорта материјала
- краћи рокови извођења радова
- изузетна мобилност система
- минимално еколошко загађење околине
- најквалитетније санирање свих површинских оштећења застора
- знатна уштеда енергије, људства и материјала



Слика 12.28 Централна јединица машине за прераду асфалт бетона - **Remixer 4500** (фирме Wirtgen)

Економија

Оријентациони трошкови у САД прераде 2.5 cm и наношења новог слоја од 1 до 2 cm асфалт бетона износе 3 €. Ако се прерађује 5 cm и додаје 1 до 2 cm, цена износи око 3.5 €. Код нас 1 cm /m² уграђеног асфалт бетона кошта око

2 €. На формирање цене највише утичу однос дубине прераде, дебљина новог слоја и окружење (температура и ветар). Практичне уштеде у односу на класичне поступке обнове застора крећу се од 19 до 50%.



Слика 12.29 Самоходна машина која почетно загрева асфалтни застор инфрацрвеним грејачима (у зависности од спољних услова може да се укључи још једна машина)



Слика 12.30 Машина у раду на магистралном путу М-23

ЛИТЕРАТУРА:

Површинска обрада:

- [1] ASPHALT TECHNOLOGY AND CONSTRUCTION PRACTICES, INSTRUCTORs GUIDE, The Asphalt Institute, Educational series No.1 (ES-1), 2nd Edition January 1983.
- [2] Robert N. Hunter, BITUMINOUS MIXTURES IN ROAD CONSTRUCTION 1994.
- [3] Best Practices Handbook on ASPHALT PAVEMENT MAINTENANCE, 2000.
- [4] PAVEMENT PREVENTIVE MAINTENANCE PROGRAM GUIDELINES, The Office of Pavement Engineering, May 1, 2001
- [5] James D. Thorne, ROADWAY MAINTENANCE GUIDE, September 2000

Микро-застор:

- [6] RECOMMENDED PERFORMANCE GUIDELINES FOR MICRO-SURFACING, ISSA A143 (revised), May 1996.
- [7] MICRO-SURFACING, Pavement Resurfacing, ISSA 1996
- [8] MICRO- SURFACING (QUALITY CONTROL), A Guide to Quality Construction, ISSA 1996
- [9] Roger E. Smith and C. Keith Beatty, Microsurfacing Usage Guidelines, Paper No. 99-1554, Preventive Maintenance and Evaluation of Pavements and Structures No. 1680, Transportation Reaserch Board - National Research Council, Washington 1999
- [10] ITEM 406 MICRO-SURFACING, 2002

Танки и ултра-танки асфалти:

- [11] Yves BROSSEAUD, Very thin and ultra-thin wearing courses using hot-mixed bituminous materials. A review of use and performance, Paper N° 990987
- [12] National Cooperative Highway Reaserch Program NCHRP Synthesis of Highway Practice 260, THIN-SURFACED PAVEMENTS, Transportation Reaserch Board, national reaserch Council. National Academy Press, Washington, D.C. 1998
- [13] Conception et dimensionnement des structures de chaussée – Guide technique. Translated version, May 1997, LCPC, SETRA

Рециклажа и Ремикс:

- [14] *Pavement Recycling Executive Summary and Report*, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-SA-95-060, Washington, DC, 1995.

- [15] *Engineering and Environmental Aspects of Recycling Materials for Highway Construction*, Federal Highway Administration and U.S. Environmental Protection Agency, Report No. FHWA-RD-93-008, Washington, DC, May 1993.
- [16] Kallas, B. F. *Flexible Pavement Mixture Design Using Reclaimed Asphalt Concrete*, FHWA/RD-84/088, June, 1984.
- [17] Smith, Richard W. ±State-of-the-Art Hot Recycling.² Transportation Research Board, Record No. 780, *Proceedings of the National Seminar on Asphalt Pavement Recycling*, Washington, DC, 1980.
- [18] Decker, D. S. and T. J. Young, ±Handling RAP in an HMA Facility.² *Proceedings of the Canadian Technical Asphalt Association*, Edmonton, Alberta, 1996.
- [19] Epps, J. A., D. N. Little, R. J. O-Neal, and B. M. Gallaway. ±Mixture Properties of Recycled Central Plant Materials.² American Society for Testing and Materials, Special Technical Publication No. 662, *Recycling of Bituminous Pavements*, West Conshohocken, Pennsylvania, December, 1977.
- [20] Nouredin, Ahmed Samy and Leonard E. Wood. ±Variations in Molecular Size Distribution of Virgin and Recycled Asphalt Binders Associated with Aging.² Transportation Research Board, Record No.1228, Washington, DC, 1989.
- [21] Senior, S. A., S. I. Szoke, and C. A. Rogers. ±Ontario-s Experience with Reclaimed Materials for Use in Aggregates.² Presented at the International Road Federation Conference, Calgary, Alberta, 1994.
- [22] Hanks, A. J. and E. R. Magni. *The Use of Bituminous and Concrete Material in Granular Base and Earth*. Materials Information Report MI-137, Engineering Materials Office, Ontario Ministry of Transportation, Downsview, Ontario, 1989.
- [23] DC Collings, AA Loudon & Partners. ±*Deep in-place recycling – a cost-effective method for strengthening flexible pavements*², Innovative road rehabilitation and recycling technologies, Pavement seminar for the Middle East and North African region, 24 – 26 October 2000, Amman, Jordan.

13

СПОЈНИЦЕ

13.1 УВОД

Спојнице или разделнице се раде да би било контролисано ломљење и спречило извијање плоча под утицајем промене температуре и влажности. Два основна типа спојница су попречне и подужне.

13.2 ПОПРЕЧНЕ СПОЈНИЦЕ

Четири основна типа попречних спојница које се примењују код класичних и армираних (укључујући и армиране влакнима) бетонских коловоза су:

13.2.1 ЕКСПАНЗИОНЕ (ДИЛАТАЦИОНЕ) СПОЈНИЦЕ

Првенствена намена је да омогуће простор за ширење бетонских плоча у случајевима када се температура подигне изнад оне при уграђивању (слика 13.1). Оне, такође, омогућавају обављање функција свих осталих типова спојница. У тренутку грађења ширина раздела је обично од 20 до 25 mm, а

понекад и мања од 12.5 mm (мања ширина раздела се примењује ако су спојнице на мањем размаку или је грађење обављено током топлог времена). Теоријска ширина раздела се одређује помоћу израза који су дефинисали Дартер и Баренберг [1]:

$$\Delta L = C \cdot L \cdot (\alpha_t \cdot \Delta T + \varepsilon) \quad (13.1)$$

где је:

ΔL - отвор спојнице изазван деловањем температуре и сушења бетона [m]

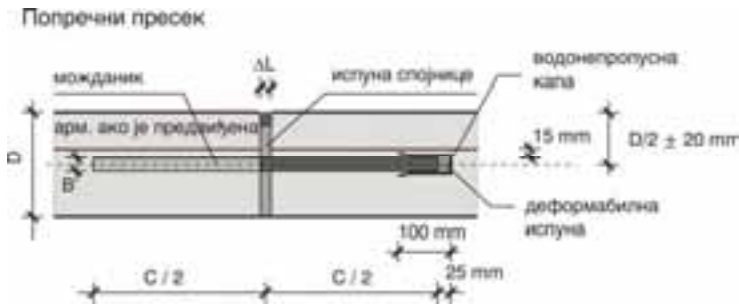
α_t - термички коефицијент ширења бетона [$1/^\circ\text{C}$] (9.0 до 10.8×10^{-6})

ε - коефицијент ширења бетона током сушења (0.5 до 2.5×10^{-4})

L - отвор спојнице или дужина плоче [m]

ΔT - температурна разлика [$^\circ\text{C}$]

C - фактор трења (0.65 за стабилизовану подлогу, 0.8 за подлогу од неvezаног агрегата)



Слика 13.1 Шема експанзионе спојнице



Слика 13.2 Шема експанзионе разделнице

Можданици имају основну намену да спрече релативно вертикално померање крајева плоча, али не и хоризонтално.

Један од крајева сваког можданика се премазује или заштићује пластичном фолијом да би се спречило његово везивање за бетон, тј. да не делује као армирања. Премаз може да се састоји од 66% битумена пенетрације 200 измешаног у топлом стању са 14% лаког креозетног уља и када се ова смеша охлади, дода се 20% нафте.

Потребне димензије можданика су приказане у табели 13.1 и на слици 13.1.

Табела 13.1 Димензије и растојања можданика код експанзионих и контракционих спојница

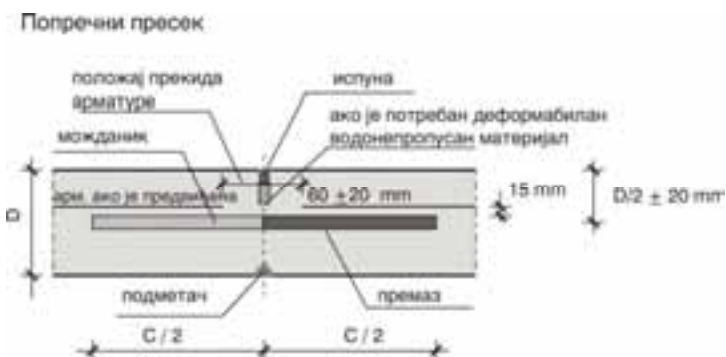
h_{pl} [mm]	Експанзионе спојнице			Контракционе спојнице			Дужина можданика ако се машински уграђују [mm]
	d [mm]	l [mm]	Међусобно растојање [mm]	d [mm]	l [mm]	Међусобно растојање [mm]	
150- 189*	20	550	300	12	400	300	400
190- 239	25	650	300	20	550	300	400
240 и више	32	750	300	25	650	300	400

* - за плоче које су тање од 150 mm, не препоручује се употреба можданика

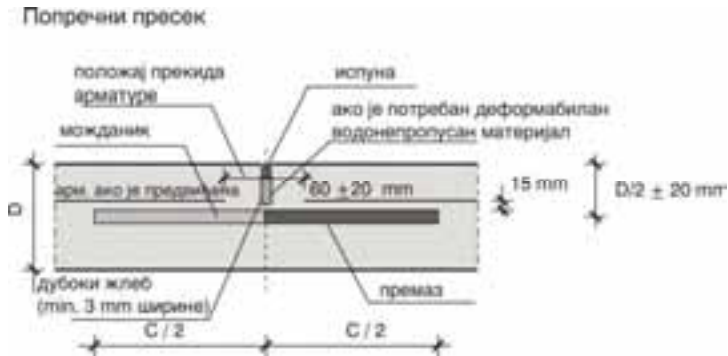
13.2.2 КОНТРАКЦИОНЕ (ПРИВИДНЕ) СПОЈНИЦЕ

То су трансферзалне спојнице намењене ослобађању плоче од напона затезања, што значи да треба да омогуће скупљање плоча и да спрече или контролишу настајање пукотина. Такође, треба да омогуће ширење до првобитне дужине плоче, а и да спрече продирање страних материјала у разделе. На месту раздела се слаби дебљина плоче израдом жлеба одозго и постављањем подметача (није обавезан) за изазивање пукотине одоздо. Тако се слаби дебљина плоче за 1/4 до 1/3. Ако се коловоз прави у летњем периоду, подметач за изазивање пукотина може бити изостављен. Код сечених спојница, такође, може да се остави подметач за изазивање пукотина.

Можданице се постављају у фази разастирања и сабијања бетонске масе. Жлебови се формирају у свежем бетону или секу.



Слика 13.3 Шема контракционе спојнице са подметачем



Слика 13.4 Шема контракционе спојнице без подметача

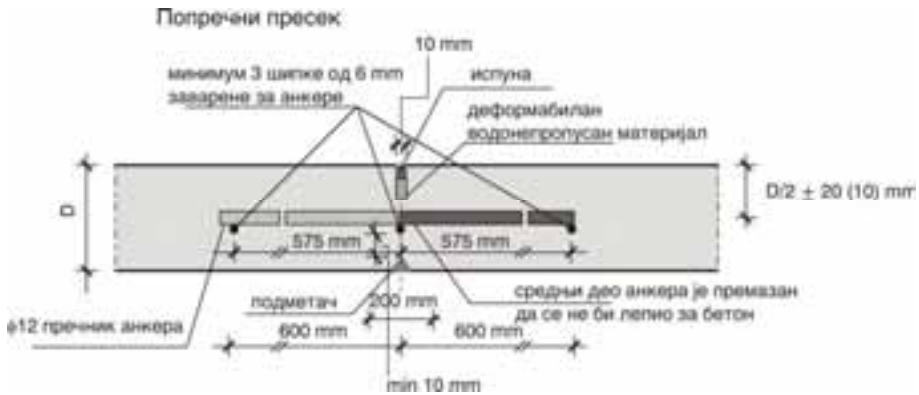
13.2.3 ВИТОПЕРНЕ СПОЈНИЦЕ

Основна намена им је да омогуће мала угаона померања између плоча. На тај начин треба да спрече појаву већих напона од температуре при савијању или витоперењу плоча. Ове спојнице не допуштају скупљање или ширење плоча, јер су анкери деформабилни, али нису премазани ни са једне стране, већ чврсто везани за бетонску плочу. Анкери су, у ствари, деформабилни можданици пречника 12 mm, дужине 600 mm и на међусобном растојању од 180 до 360 mm.

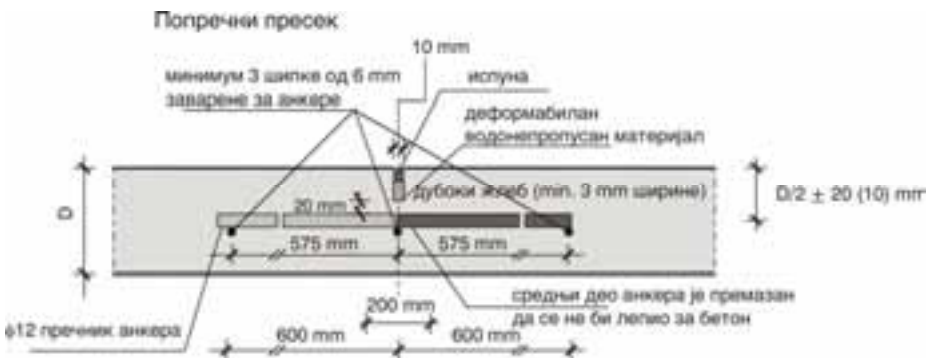
Могу да замене контракционе спојнице, али не би требало да их буде више од три - једна до друге.

Главна намена им је као и код подужних спојница.

Мања димензија можданика и анкера, код контракционих и витоперних спојница, у односу на експанзионе се оправдава међусобним укљештењем агрегата на месту формирања раздела (горња граница отварања раздела је 0.9 до 1.0 mm)



Слика 13.5 Шема витоперне спојнице



Слика 13.6 Шема витоперне спојнице са дубоким жлебом

13.2.4 РАДНЕ СПОЈНИЦЕ

При грађењу бетонских коловоза неминовни су прекиди у раду. На линији прекида се ради спојница (не мора да буде пројектом предвиђена) која је најчешће конструкциона или експанзиона. **Не може бити витоперна.**

13.3 ПОДУЖНЕ СПОЈНИЦЕ

Служе да у подужном правцу спрече појаву неправилних подужних пукотина и омогуће грађење коловоза пројектованих ширина. За ову сврху се користе, најчешће витоперне или радне конструкционе спојнице. Ако се коловозне траке раде у различито време, нема смисла постављати подметач за изазивање пукотина или ослабљивати пресек (ради се само жлеб, а контактна површина се са једне стране премаже премазом за спречавање везивања са бетоном).

13.4 ВЕЛИЧИНА ПЛОЧА И РАСПОРЕД СПОЈНИЦА

Величина плоча и број пукотина су директно зависни. Међутим, са економске тачке гледишта, треба тежити неком оптимуму. Најновија практично потврђена сазнања гласе:

1. Ширина плоча је једнака ширини једне коловозне траке. Може и две, ако укупна ширина није већа од 6.0 m
2. Експанзионе спојнице треба градити само уз објекте. (Ово је прилично радикалан став и не препоручује се у нашим условима. На аеродрому "Никола Тесла" у Београду, при изградњи нове пристанишне платформе он је примењен са успехом)
3. Све остале спојнице су конструкционе и делимично витоперне
4. Дужина плоча, т.ј. размак од једне до друге спојнице, у подужном смислу, не треба да буде већи од 5 до 6 метара

Распоред спојница зависи од дебљине бетонске плоче, трења између плоче и подлоге, температурних разлика и врсте агрегата. Максимално растојање експанзионих спојница за плоче дебљине 20 cm и више, износи 60 m. За плоче дебљине до 40 cm, интервал контракционих спојница је 5 m. Коришћењем кречњачког агрегата размак експанзионих спојница може да се повећа на 72 m (алетрнативно на 48 m), са интервалом контракционих спојница од 6.0 m. Ако се бетонски коловоз гради између 1. маја и 30. септембра (ова граница није строга и зависи од средње дневне температуре ваздуха) експанзионе спојнице могу бити замењене контракционим.

Подужне спојнице би требало да се изводе тако да ширина плоче не буде већа од 4.5 m.

13.5 ЖЉЕБОВИ И ЊИХОВА ИСПУНА

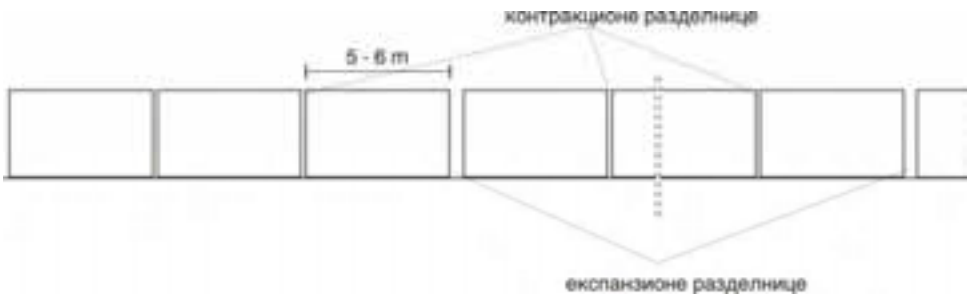
Сврха жљебова је да спрече продирање воде и страних материјала у спојнице. Да би жљебови могли да испуњавају своју функцију у њих се ставља испуна и заптивач. Оба материјала се стављају у експанзионе, а само заптивач у остале спојнице. Димензије жљебова су приказане у табели 13.2. Испуна спојница и жљебова је најчешће од меког дрвета, филца импрегнираног разређеним битуменом, плуте и сл. За заптиваче се постављају много строжи услови. То су најчешће масе састављене од меканог битумена и синтетичке гуме.

Табела 13.2 Димензије жљебова и дубина испуна

Тип спојнице	Растојање [m]	Ширина жљеба [mm]	Дубина испуне [mm]
контракционе	испод 8*	10	20 - 25
	8 - 15	15	20 - 25
	15 - 20*	20	25 - 30
	преко 20*	види **	25 - 30
витоперне	сва растојања	5	15 - 20
експанзионе	сва растојања	5 mm више од срачунате ширине експанзионе разделнице	25 - 30
подужне		5	25 - 30

* Када се примењују витоперне спојнице, растојања се односе на размак суседних попречних спојница

** Ако су контракционе спојнице на већем растојању од 20 m, ширина жљеба се повећава на сваких 5 m за 5 mm.



Слика 13.7 Распоред спојница

На Западу се препоручује примена двокомпонентног еластомера (ASTM стандард D1850) и неопренских трака (ASTM стандард D106-6). Почетни трошкови ова два материјала су већи од осталих, али су у погледу квалитета и трајности мањи, ако се посматра дужи временски период.

Најновија сазнања у свету су да треба правити што мање ширине жљебова (мање од 0.25 mm) и испуну радити од металних или пластичних трака.

13.6 КОСЕ И НА НЕПРАВИЛНОМ РАЗМАКУ ПОСТАВЉЕНЕ СПОЈНИЦЕ

Косе спојнице су први пут биле примењене 1932. године, а шире тек од 1951. Најчешће су под углом од $9^{\circ} 30'$ у односу на попречни профил. Предност се огледа у смањењу пукотина и углова, и постепеном доношењу оптерећења од тачкова на спојнице. Косе спојнице, донекле, смањују растојање између

површине раздела, омогућавајући боље укљештење зрна агрегата и удобнију вожњу. Постављање можданика је мало отежано, јер морају да буду положени паралелно са осовином пута. Често се косе спојнице комбинују са принципом неправилног размака спојнице, као што су 4.0, 5.8, 5.5 и 3.7 м. Овим неправилним размаком постиже се разбијање резонанције која може да се јави код неких возила. Међутим, примена овог типа спојница је веома ретка.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Darter M.I and E.J. Barenberg (1977), *Design of Zero-Maintenance Plain Jointed Concrete Pavement*, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-77-111, Vol. 1
- [2] Цветановић А, (1992), КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ, Нанучна књига, Београд
- [3] *Design of Terminals for Rigid Pavements to Control End Movements*, (1977), State of the Art transportation Research Board, Special Report 173, Washington
- [4] *Road Note 29*, (1970), "A Guide for the Structural Design of Pavements for New Roads", *Road Research Laboratory*, London
- [5] Salter R, (1979), *Highway Design and Construction*, The Macmillan Press Ltd, London
- [6] Friberg F, (1968), *Restrained temperature Movements in Long Slabs*, ACI, Vol. 60
- [7] *Design, Construction and Maintenance of PCC Pavement Joints*, (1973), *NCHRP*, Highway Research Board, Washington
- [8] *Joint-Related Distress in PCC Pavements: Cause, Prevention and Rehabilitation*, (1979), *NCHRP 56*, Transportation Research Board, Washington

14

ЗАСТОРИ ОД ПРЕФАБРИКОВАНИХ БЕТОНСКИХ ЕЛЕМЕНАТА

14.1 ОПШТЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ

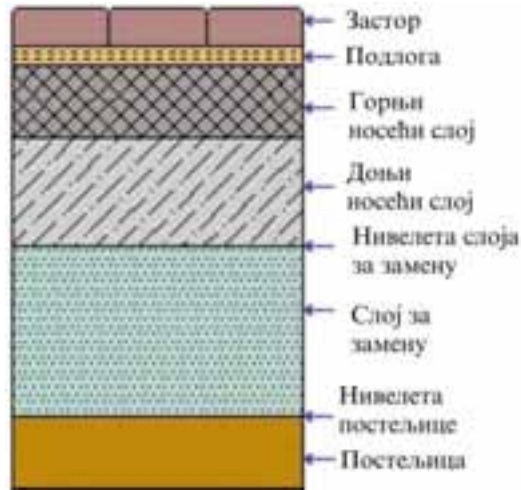
Савременим експериментима је утврђено да су застори од бетонских префабрикованих елемената погодни као саобраћајна подлога за брзине до 50 km/h. Најчешћа примена је на саобраћајницама у стамбеним зонама, паркиралиштима, пешачким зонама ... Успешно се, такође, примењују на раскрсницама - зоне појачаног кочења и убрзавања, већим подужним нагибима, бензинским пумпама и халама.

Предности застора од бетонских префабрикованих елемената су вишеструке:

- отпорност на дејство циклуса мржњења и отапања
- лако одржавање и поправка
- олакшан приступ инсталацијама
- толеришу се мала померања у постелјици

- једноставно грађење без скупе механизације
- могу да послуже као привремени застор
- велика трајност и коефицијент трења
- упозоравају возаче да су скренули са возних трака
- мали трошкови одржавања
- велики избор боја и облика, што даје пријатан естетски изглед

На слици 14.1 је приказан општи модел коловозне конструкције са застором од префабрикованих бетонских елемената.



Слика 14.1. Попречни пресек коловоза од префабрикованих бетонских елемената

Због намене коловозне конструкције, неки од слојева са слике 14.1 може бити и изостављен.

14.2 КАРАКТЕРИСТИКЕ МАТЕРИЈАЛА

Веома битну улогу, код префабрикованих бетонских елемената, имају карактеристике материјала који се користе за њихову израду:

- квалитет и порекло минералног агрегата за бетонску мешавину
- квалитет и порекло хидрауличног везива (цемента)

као и физичко-механичке карактеристике готових елемената, које треба да одговарају физичко-механичким карактеристикама бетона за класичне бетонске коловозне конструкције. А то су:

- технолошка својства свеже бетонске масе:
 - хомогеност
 - уградљивост (компактибилност)
 - повезаност (кохезивност)

- стабилност (сегрегација и издвајање воде) ...
- консистенција свеже бетонске масе
- физичко-механичке карактеристике очврслог бетона:
 - чврстоћа на притисак
 - чврстоћа на савијање
 - чврстоћа на затезање
 - чврстоћа при динамичком оптерећењу
 - водонепропустљивост бетона
 - отпорност према дејству мраза и соли
 - отпорност на хабање
 - отпорност на хемијске агенсе
 - деформацијске карактеристике бетона

14.3 ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ

С обзиром на предлоге о поступку димензионисања, а то је **AASHTO метод за флексибилне конструкције**, мора се водити рачуна и о карактеристикама материјала у горњем носећем слоју, доњем носећем слоју, слоју за замену (ако га има) и постељици, и слоју од хидроизолационог материјала (по потреби).

Суштински проблем димензионисања је приказ застора од блокова и слоја песка. На основу већег броја истраживања, "сложени модул" (блок + песак) би требало да износи, после изградње, око 350 МПа, а после 10000 понављања прелаза стандардног оптерећења око 3100 МПа.

Коефицијент носивости сложеног слоја (блок + песак) износи:

$$\alpha_{B/S} = 0.44 * \left(\frac{E_{B/S}}{450000} \right)^{1/3} \quad (14.1)$$

где је:

$E_{B/S}$ - модул сложеног слоја, psi (psi = 0.0069 МПа)

$\alpha_{B/S}$ - коефицијент сложеног слоја

За следећа саобраћајна оптерећења, у нашим условима, препоручене су марке бетона префабрикованих елемената (табела 14.1):

Табела 14.1 Препоручене марке бетона

Саобраћајно оптерећење	МВ (МПа)
Врло тешко	40
Тешко	35
Остало	30

У зависности од типова материјала од којих су израђени слојеви подлога за бетонске префабриковане елементе, на располагању су следећи модули слојева (табела 14.2):

Табела 14.2 Модули слојева за подлоге

Тип материјала у подлози	E (MPa)
Цементом стабилизован шљунак	7000 - 14000
Цементом стабилизован локални материјал	3500 - 7000
Битумензирани шљунак или дробина	2500 - 7000
Битуменом стабилизирани агрегат	300 - 2100
Стабилизација кречом	150 - 500
Невезани шљунак	100 - 200
Ситнозрни природни материјал у постељици	20 - 300

Приказани модули су одређени индиректно на основу лабораторијски измерених CBR вредности (California Bearing Ratio - калифорнијски индекс носивости).

Дебљине коловозних конструкција од бетонских префабрикованих елемената зависе од броја понављања прелаза стандарних осовина од 80 kN, а самим тим и дебљине бетонских елемената.

За одређивање дебљине доњег носећег слоја, потребно је знати намену коловозне конструкције.

На основу те констатације следи избор блокова. Облик и боја су променљиве карактеристике у зависности од околине у којој се налази саобраћајница. Због тога могу да се праве по наруџбини.

14.4 НАЧИН ПОСТАВЉАЊА БЕТОНСКИХ ЕЛЕМЕНАТА У ЗАСТОР

Полагање застора од бетонских блокова може се извести на више начина. У зависности од димензија, полагање се може обавити ручно или помоћу пнеуматских хватаљки на малим дизалицама.

Плоче се полагају, а затим набијају вибро плочама. Површине вибро-плоча су између 0.35 m² и 0.50 m², а центрифугалне силе су између 16 и 20 kN са фреквенцијама од 75 до 100 Hz.

Прва варијанта полагања већих бетонских елемената је у крупнозрни цементни малтер (цемент : песак = 1 : 3). Дебљина слоја малтера је од 25 до 50 mm.

Величине елемената су у табели 14.3:

Табела 14.3 Величине елемената

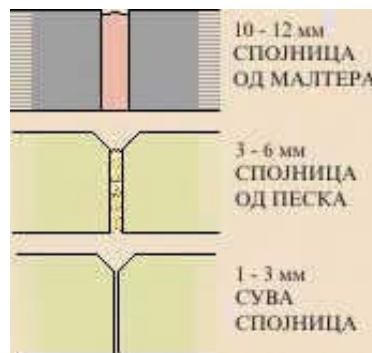
A * B (mm * mm)	H (mm)
450 * 600	50 - 100
600 * 600	50 - 100
750 * 600	50 - 100
900 * 600	50 - 100

Дебљине су од 50 до 100 mm, али претходно морају бити пројектом дефинисане, а затим поручене код произвођача. Ако тих димензија на тржишту нема, одабрани произвођач је дужан да задовољи захтеве пројекта. Спојнице се испуњавају цеметним малтером.

Други начин је да се блокови положе у слој песка, али се после сабијања вибро-плочама спојнице испуњавају малтером. Наиме, песок који се истисне из спојница чије су димензије унапред предвиђене - 10 до 12 mm - уклони се четкама, а потом се спојнице испуне цеметним малтером и изфугују.

Трећи начин је да се блокови полажу на подлогу од масивног бетона дебљине 100 до 150 mm, а спојнице обраде цеметним малтером. То се ради ако се очекује нешто обимнији саобраћај.

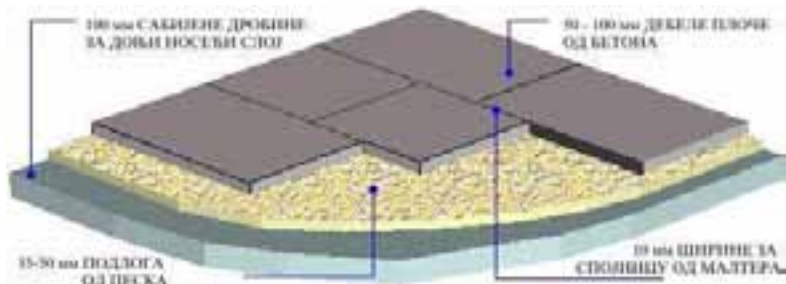
Четврти и пети начин испуњавања спојница је са асфалтним мастиксом и катраном.



Слика 14.2 Неке од могућих спојница бетонских елемената у застору

Прва три начина израде спојница су повољнија за средине у којима је број топлих и врућих дана доминантан. На тај начин се избегава могућност прљања бетонских елемената битуменом и катраном. Поступак чишћења је релативно скуп, због употребе хемијских препарата на пр. - трихлор-етилена (C₂HCl₃), који је канцерогена материја треће категорије, угљентетрахлорида, бензола, хлороформа.

На слици 14.3 је приказан један од могућих начина полагања бетонских префабрикованих елемената у застор.



Слика 14.3 Шема полагања бетонских префабрикованих елемената

14.5 НАЧИН ПОСТАВЉАЊА БЕТОНСКИХ ЕЛЕМЕНАТА У ЗАСТОР НА ПЕШАЧКИМ СТАЗАМА

Блокови се полажу на подлогу од песка дебљине од 2 до 5 cm (најчешће 2.5 cm). После сабијања вибро-плочама, спојнице, чији су отвори од 3 до 6 mm, се испуне песком. Овај начин полагања односи се на бетонске елементе мањих димензија, јер је и предвиђено оптерећење за те елементе мање. У табели 14.4 су неке од предложених димензија блокова:

Табела 14.4 Предложене димензије блокова

A * B (mm * mm)	H (mm)
400 * 400	50 - 80
300 * 300	50 - 80
450 * 450	50 - 80

Према искуствима из Енглеске, гранулометријски састав материјала који служи као непосредна подлога за полагање бетонских елемената је приказан у табели 14.5:

Табела 14.5 Гранулометријски састав материјала за подлогу

Величина отвора сита [mm]	Процент пролаза %
5	90 - 100
2.35	75 - 100
1.18	55 - 90
0.6	35 - 59
0.3	8 - 30
0.15	0 - 10

Код коловозног застора од блокова, као и код застора за мешовите саобраћајнице (пешаци и возила) и пешачке зоне, треба посебну пажњу обратити на текстуру газне површине. Она мора бити довољне храпавости да би било омогућено комотно одвијање саобраћаја, а посебно у влажним условима. У периодима снежних падавина се на засторима, по обичају, налазе разни загађивачи који у садејству са водом производе танку емулзију која је погубна, како за возила тако и за пешаке. **Оптимални гранулометријски састав за цемент бетонску мешавину, од које се праве елементи, се постиже од дробљеног каменог агрегата од 0 до 8 mm.**

На основу већ приказаних вредности модула за материјале у подлози - доњем носећем слоју конструкције, треба водити рачуна о збијености, која треба да буде од **85 до 95%** од максималне збијености добијене Прокторовим опитом. Досадашња искуства показују да су оштећења застора од блокова углавном настајала због непоштовања пројектом предвиђене збијености.

Код пешачких површина, веома битну конструктивну целину чине геометријска решења ивица застора око стабала, сливника, косих паркиралишта, зидова.

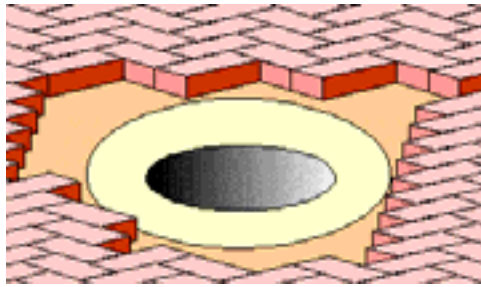
Од центра стабла, најмање на 60 cm може да се постави застор, али мора бити тако обликован да може лако да се уклопи у нове блокове који ће бити постављени уместо стабла, ако оно буде уклоњено. Слободна површина око стабла служи за прехрањивање водом.

На слици 14.4 је приказан изглед готовог отвора шахта. То мора бити прецизно урађено, јер је могућност оштећивања блокова на тим местима најчешћа. Велики је избор фазонских елемената за обраде ивица, али ако их нема, блокови могу бити обрађени на месту полагања. Постоји читав сет алата којима се на једноставан начин обрађују блокови. Такође, на слици 14.4 је приказано како на елегантан и дискретан начин може да се уклопи поклопац шахта у застор од префабрикованих бетонских елемената. Наиме, кад се заврши бетонирање вертикалних зидова шахта, бетоном се обложи површина око отвора шахта на 25 до 30 cm од отвора ка пољу. У влажан бетон се положи носач поклопца и изнивелише се према пројектованој коти. Тек када се бетон осуши, преко њега се поставља подлога од песка (25 до 50 mm) на коју се постављају блокови, тако да се потпуно уклопе у пројектом предвиђену шару и нивелету површине. Спојнице се обрађују на начин који је раније наведен.

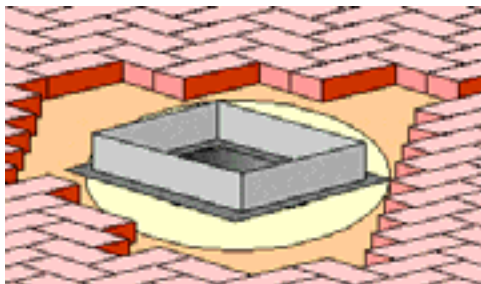


Слика 14.4 Изглед готовог поклопца шахта у застору од префабрикованих бетонских елемената

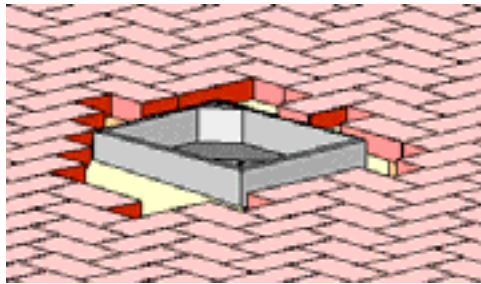
На сликама 14.5, 14.6 и 14.7 је приказан шематски поступак постављања поклопца шахта:



Слика 14.5 Постављање бетонског прстена



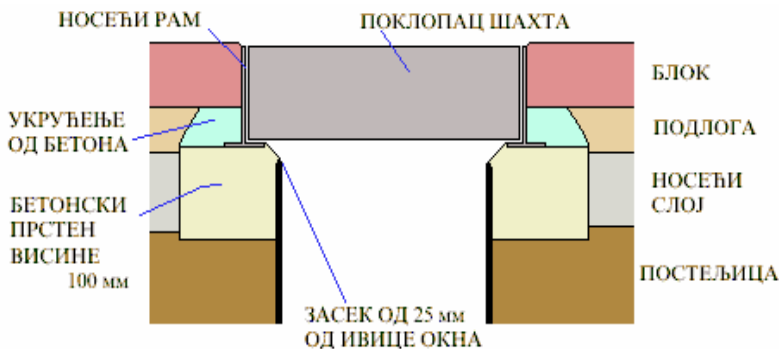
Слика 14.6 Постављање металног рама



Слика 14.7 Затварање застора елементима око металног рама

На слици 14.5 се види површина око отвора окна која је избетонирана. На слици 14.6 је постављен метални рам поклопаца шахта, док је на слици 14.7 приказано уклапање бетонских префабрикованих елемената и носача поклопаца.

На слици 14.8 је приказан попречни пресек отвора шахта. Троугаони засек од 25 mm служи за обрубљивање ивице да се радници **службе одржавања** не би повређивали приликом силаска у шахт.



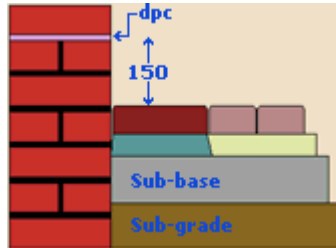
Слика 14.8 Шематски приказ попречног пресека шахта

14.6 ПОСТАВЉАЊЕ ЗАСТОРА ОД БЕТОНСКИХ ЕЛЕМЕНАТА У ДВОРИШТИМА ИНДИВИДУАЛНИХ СТАМБЕНИХ ОБЈЕКТАТА

Основни принципи су исти као и код постављања елемената на јавним површинама - трговима и пешачким зонама. Сви слојеви испод застора морају бити прописано набијени, сходно прорачуну из пројекта. Засторни блокови се полажу у слој песка чија је гранулација наведена у поглављу о тротоарима и трговима. Дебљина слоја песка је од 35 до 50 mm, а спојнице су испуњене песком, после извршеног набијања бетонских елемената.

Разноликост шара које се праве ређањем елемената је препуштена пројектантовој машти.

Општи принципи постављања префабрикованих бетонских елемената уз ивице и ивичњаке, на стазама око објеката и уз зидове ограда су приказани на следећим детаљима. Подужни нагиби су $1:80 = 1.25\%$ до $1:60 = 1.67\%$, док је попречни $i_p = 2.5\%$. Стаза уз зид мора бити у својој највишој коти 150 mm испод линије хидроизолације у зиду. То се може видети на слици 14.9.



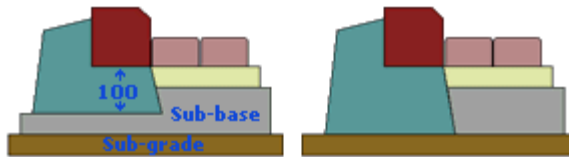
Слика 14.9 Положај ивице застора поред зида

dpc - слој хидроизолације у зиду

sub-base - доњи носећи слој

sub-grade - постељица

На сликама 14.10 и 14.11 се могу видети детаљи постављања издигнутог ивичњака и ивичњака у равни застора. И један и други начин постављања ивичњака је погодан за оивичење травнатих површина у двориштима.



Слика 14.10 Ивичњак изнад равни застора



Слика 14.11 Ивичњак у равни застора

На наредним сликама ће бити приказан поступак постављања слојева неопходних за квалитетан завршни слој од бетонских префабрикованих елемената.

На слици 14.12 се види да прво мора бити постављен и исправно решен одвод воде. То је најбитнији корак у постављању застора. У слојевима који носе застор учешће воде мора бити сведено на минимум, јер подлога мора да задовољава захтеве чврстоће и еластичности. Вода томе не доприноси ако је стално присутна у носећим слојевима.



Слика 14.12 Постављање одводних инсталација

После постављања сливника на најнижој коти дворишта, поставе се одводне цеви са падом од 2.5% до шахта где се повезују на кишоводну мрежу. Затим се озидва ивица постојећег зеленог појаса у дворишту, тако да вода кроз ту конструкцију не може да продре у носеће слојеве застора.

На слици 14.13 се види озидана ивица травњака. Тако озидана ивица травњака даје утисак да површина, која ће бити под бетонским застором, личи на базен.



Слика 14.13 Обрада ивице постојећег травњака

Чitava површина на коју ће бити постављени носећи слојеви застора мора бити изолована од могућег капиларног подизања воде.

који буде истиснут између спојница се очисти, а спојнице поново попуне песком.



Слика 14.16 Полагање елемената у слој песка

Могуће су две варијанте обраде шахта. Једна је да се шахт види, а друга је да шахт буде камуфлиран префабрикованим бетонским елементима.

Варијанта са видљивим шахтом није препоручљива са естетског становишта. Њиме се ремети континуитет застора.



Слика 14.17 Видљив шахт

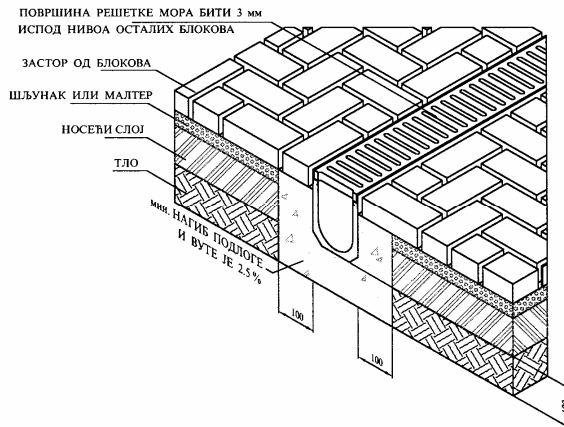
Варијанта камуфлираног шахта је елегантнија, јер се не ремети целина површине од бетонских префабрикованих елемената, односно шара која треба да има неку геометријску целину.



Слика 14.18 Камуфлирани шахт

14.7 ОДВОДЊАВАЊЕ СА ЗАСТОРА ОД БЕТОНСКИХ ЕЛЕМЕНАТА

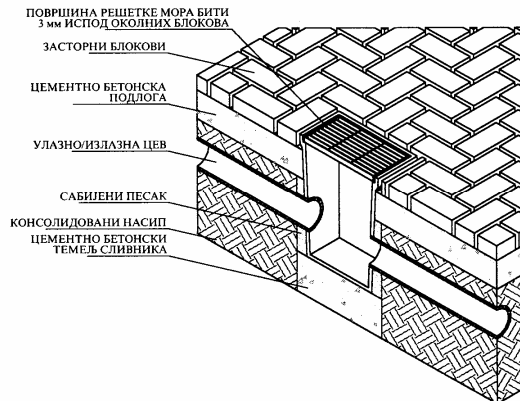
Свака површина мора бити нивелисана тако, да са ње вода може без препрека да отиче ка сливницима и сливничким решеткама. Попречни нагиб површине зависи од храпавости елемената и не сме бити мањи од $i_p = 2.5\%$. На следећим сликама се могу видети различити типови детаља везаних за одвођење воде са застора од бетонских елемената.



Слика 14.19 Положај и слојеви испод сливничке решетке

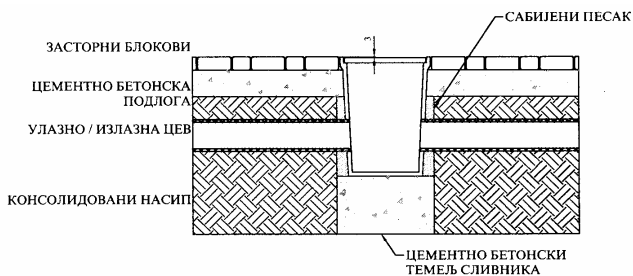
За детаљ на слици 14.19 је потребно истаћи да газна површина сливничке решетке одводног канала, мора бити 3 mm нижа од суседних блокова застора да би вода могла слободно да притиче. Подужни пад канала и подлоге канала мора бити 2.5%, да би било омогућено слободно подужно

отицање воде са свим прљавштинама које она носи. Такође треба истаћи да је оваква конструкција намењена оптерећењу стандардне осовине од 80 kN. Саобраћај не сме бити пуштен док блокови не буду положени. Извођач мора да обезбеди да се испоштују минималне димензије предвиђене пројектом.



Слика 14.20 Пресек кроз сливник и положај одводне цеви

Детаљ на слици 14.20 представља положај сливника када је оптерећење осовина од 80 kN. Поклопац сливника - решетка, мора бити 3 mm нижа од суседних блокова, због већ поменутог услова. Такође се види да цео сливник лежи на свом темељу, који је димензионисан према оптерећењу које на њега делује. Веза цеви и тела сливника мора бити еластична. Подужни нагиб цеви мора бити 2.5%.

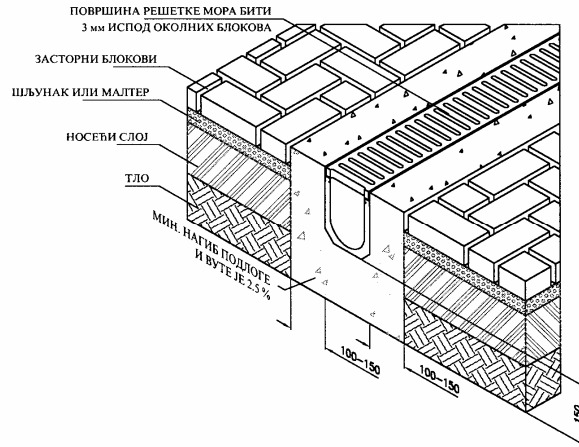


Слика 14.21 Попречни пресек сливника

Детаљ на слици 14.21 представља попречни пресек детаља са слике 14.20.

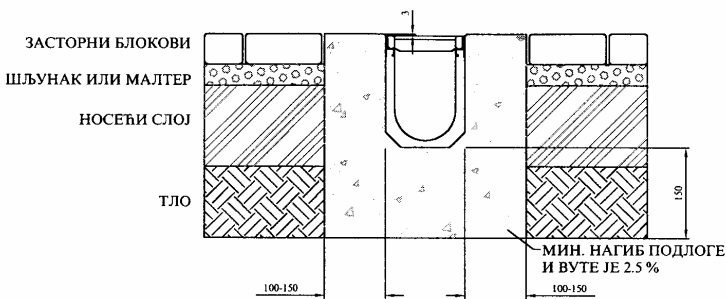
На слици 14.22 може се приметити да је због знатно већег осовинског оптерећења од 210 kN, начин постављања сливничких канала друкчији. Наиме, канал се поставља у бетонску масу јер су и оптерећења знатно већа, како статичка, тако и динамичка. Газна површина сливничке решетке

одводног канала, мора бити 3 mm нижа од суседних блокова застора да би вода могла слободно да притиче.



Слика 14.22 Деталј сливничке решетке за веће оптерећење

На слици 14.23 је приказан попречни пресек детаља са слике 14.22, на коме се види потребан положај сливничке решетке. Она мора бити 3 mm нижа од бетонске облоге.



Слика 14.23 Попречни пресек решетке за веће оптерећење

14.8 ПОСТАВЉАЊЕ ИВИЧЊАКА

Ивичњаџи су веома битни пратећи елементи свих саобраћајница. Њихова улога је да визуелно и физички одвоје саобраћајнице намењене моторним возилима од саобраћајница намењених пешацима и бициклистима. Код оивичења зелених површина имају и естетску улогу.

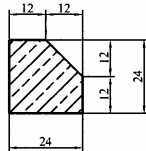
Материјали од којих се ивичњаџи праве су: камен, бетон, дрво...

Бетонски ивичњаки спадају у савремене пратеће елементе саобраћајница. Морају да задовоље све већ наведене параметре за бетонске производе. Треба да буду упадљиви. Димензије и облици су стандардизовани по типовима:

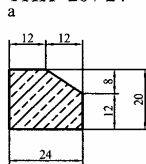
ТИП	Димензије (cm)
24 / 24	24 * 24
20 / 24	20 * 24
18 / 24 а и б	18 * 24
12 / 18 а и б	12 * 18

Ознаке **а** и **б** представљају могућност двојаког постављања ивичњака - положено и усправно. На слици 14.24 и 14.25 су приказани ивичњаки онако како су наведени у табели, са свим својим димензијама.

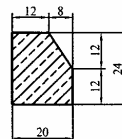
ТИП 24 / 24



ТИП 20 / 24

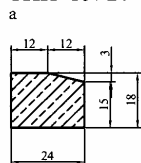


б

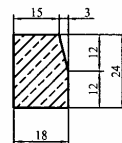


Слика 14.24 Модели стандардних бетонских ивичњака

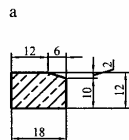
ТИП 18 / 24



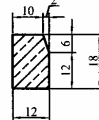
б



ТИП 12 / 18



б



Слика 14.25 Модели стандардних бетонских ивичњака

Ако се ивичњаци употребљавају за разграничење зелених површина и пешачких стаза, у парковима, на пример, није императивна употреба беле боје при изради ивичњака. У тим случајевима избор боје може бити слободна воља пројектанта, али да се уклапа у околну комбинацију боја.

Ивичњак **типа 24/24** се користи за разграничење саобраћајних трака и ивичне разделне траке. Дужине су му 40 и 80 см и може да се поставља бетонски префабриковани елемент димензија 40/40 см иза њега (али не и обавезно). **Тип 24/24** се користи на саобраћајницама ранга:

- ГА - градски аутопут
- ГМ - градска магистрала
- (ГС) - градска саобраћајница (евентуално)

Ивичњак **типа 20/24** употребљава се за разграничење саобраћајних трака и ивичних разделних трака. Дужине су му 40, 80, 50 и 100 см. Као и код претходног типа, могућа је, али није обавезна примена елемената од бетона димензија 40/40 см. Поставља се на саобраћајницама ранга:

- ГА - градски аутопут
- ГМ - градска магистрала
- ГС - градска саобраћајница

Код оба ова типа је висина горње ивице 12 см изнад површине коловозног застора.

Ивичњак **типа 18/24** се користи на два начина - као високи ивичњак који је 12 см изнад површине застора својом горњом ивицом и у обореном положају кад је 6 см изнад површине застора својом горњом ивицом, у случају уличног паркирања. Употребљава се на саобраћајницама ранга:

- (ГМ) - градска магистрала (евентуално)
- ГС - градска саобраћајница
- СУ - сабирна улица

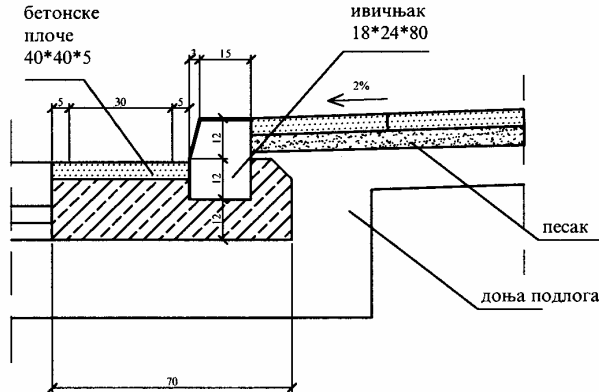
Дужине ивичњака **типа 18/24** су 40, 80, 50 и 100 см.

Ивичњак **типа 12/18** се користи на саобраћајницама ранга:

- (СУ) - сабирна улица (евентуално)
- ПУ - приступна улица
- П - пешачке површине

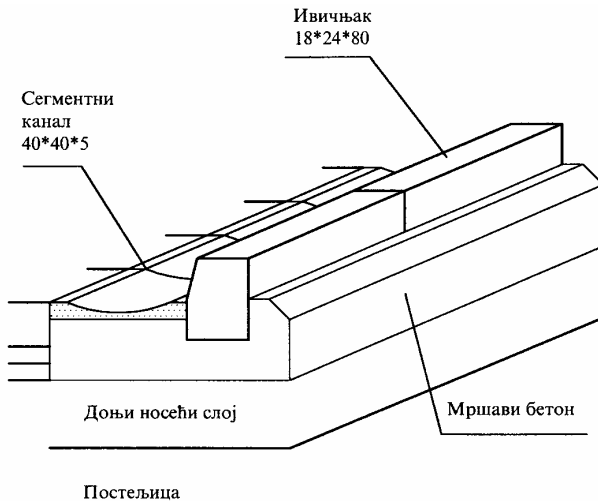
У обореној варијанти се користи као разграничење пешачких стаза и зелених површина и пешачких стаза и уличног паркирања. Тада је својом горњом ивицом 4 см изнад равни застора. Као високи ивичњак се поставља између саобраћајне траке и уличног паркирања и између уличног паркирања и пешачке стазе. Његова висина је у том случају 8 см изнад равни застора. Дужине су му 40, 80, 50 и 100 см. У обореној варијанти се користи и за разграничење пешачке и бицикличке траке.

У свима варијантама, ивичњаџи се полажу у мршави бетон чија је марка од МВ 10 до МВ 15.

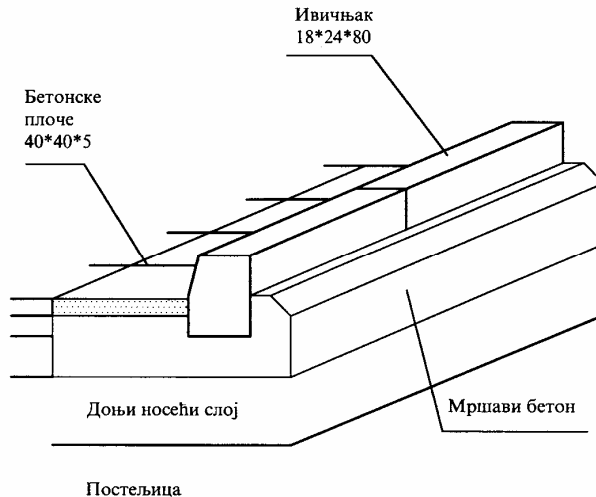


Слика 14.26 Детаљ постављања бетонског ивичњаџа ТИПА 18 / 24

На слици 14.27 и 14.28 је приказан аксонометријски изглед постављања бетонских ивичњаџа на мршави бетон, а на слици 14.26 је приказан попречни пресеџ са свим потребним котама за **тип 18 / 24**.



Слика 14.27 Постављање ивичњаџа ТИПА 18 / 24 уз блокове за сегментни канал



Слика 14.28 Постављање ивичњака ТИПА 18 / 24 уз бетонске плоче

14.9 ОДРЖАВАЊЕ ЗАСТОРА ОД БЕТОНСКИХ БЛОКОВА

Сам процес одржавања застора од бетонских блокова је озбиљан и педантан задатак.

Први корак одржавања је чишћење и прање застора, барем једном дневно и то у тренуцима најмањег саобраћаја. То је задатак хигијенских комуналних служби.

Други корак је редовно прегледање коловозног застора и тачно позиционирање, обележавање у документацији и на скици, откривених оштећења, ради одређивања површине оштећења.

Трећи корак је анализирање оштећења, откривање узрока настанка оштећења и припремање стратегије отклањања оштећења.

Четврти корак је спровођење оправке.

Оштећења застора од блокова могу бити:

- Појава пукотина
Овај тип оштећења настаје због понављања оптерећења и скупљања бетонских елемената. Карактеристичан је по томе што дели елементе на два или више делова, у зависности од величине елемената.
Оштећење испуне спојница доводи до продирања чврстих материјала у жлебове, што доводи до губитка функције спојница и настајања пукотина.

- Ломови бетонских елемената
Круњење углова ствара косе ломове бетонских елемената у односу на правце спојница.
Круњење ивица бетонских елемената настаје због превеликих напона и продирања недозвољених материјала у жљебове.
Дробљење бетонских елемената се одсликава издељеношћу елемената на четири и више делова. Узрок су најчешће недовољна носивост подлоге и преоптерећење.
- Неравнине
Један од облика неравнина је слегање или издизање бетонских елемената и настаје услед губитка материјала у подлози, дејства мраза и бубрења.
Пумпање настаје продирањем материјала кроз оштећене спојнице и пукотине на површину као последица угиба плоча при проласку возила. Избачени материјал угрожава носивост, ствара пукотине и ствара неравнине на коловозу.
- Губитак отпорности на трење
Поједини агрегати, нарочито кречњаци, под саобраћајним оптерећењем могу бити брзо углачани. На тај начин се угрожава безбедност саобраћаја при влажним условима.

Наведена оштећења застора од бетонских елемената се могу поправљати следећим поступцима:

- Пукотине:
 - Најједноставнији начин је замена елемената који су испуцали а заједно са њима и замена материјала у подлози, што повлачи и израду нових спојница. Елементи треба да буду истих карактеристика као они који су замењени. Морају бити прописно набијени.
 - Ако је оштећење испуне спојница на време откривено, онда је најбољи лек да се спојнице очисте и запуне истим материјалом који је био пре оштећења.
 - Ломови бетонских елемената:
 - Код сва три облика ломова бетонских елемената, њих треба поводити, заменити подлогу и поставити нове елементе. Треба их прописно набити и спојнице залити на исти начин као и претходне.
- Неравнине:
 - Због различитих услова настајања неравнина, најједноставније оправке су замена материјала у подлози. Ако су оштећења у носећим слојевима, материјал треба заменити до постељице.
 - Узроке пумпања треба отклонити заменом материјала у подлози и поновном обрадом спојница.
- Губитак отпорности на трење
 - Једини лек је замена елемената

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Александар Цветановић: *КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ*, Научна књига, Београд 1992.
- [2] Александар Цветановић: *ОДРЖАВАЊЕ ПУТЕВА*, Београд 1993.
- [3] A.J. McCormack and Son: *Laying Block Paving*
- [4] A.J. McCormack and Son: *Designing Flexible Pavements for Highways And Commercial Applications*
- [5] A.J. McCormack and Son: *Laying Flags / Slabs*
- [6] A.J. McCormack and Son: *Edgings*
- [7] A.J. McCormack and Son: *Pre-Cast Concrete Flags*
- [8] A.J. McCormack and Son: *Recessed Tray Manhole Covers*
- [9] A.J. McCormack and Son: *Screeding a Bedding Layer*
- [10] A.J. McCormack and Son: *Cutting - in Block Paving*
- [11] A.J. McCormack and Son: *Step - by -Step Block Paving*
- [12] Regulations for Excavating and Restoring Streets in San Francisco, The Department of Public Works, San Francisco

15

ТРОШКОВИ

15.1 УВОД

Основни трошкови који се јављају код путева су: инвестициони (трошкови грађења), одржавања (претежно коловоза) и експлоатације (корисника). У оквиру експлоатационог периода трошкови корисника најчешће вишеструко превазилазе трошкове изградње.

Примена принципа инжењерске економије на пројекте коловоза ради се на нивоу мреже и нивоу пројекта. На нивоу мреже, утврђују се у оквиру дугорочне стратегије, оправданост и приоритети улагања за више путних праваца.

На нивоу пројекта дефинише се најповољнија економска стратегија (алтернативно инвестирање) у функцији различитих трошкова и стања конкретног пута или деонице пута.

Анализа трошкова циклуса трајања (**Life cycle cost analysis - LCCA**) је алат помоћу кога се доносе одлуке о избору коловоза, тј. доносе економске оцене између различитих типова коловоза, флексибилних или крутих, или оцењују различите стратегије одржавања. LCCA је подређена анализи трошкови - добит (**Benefit-cost analysis - BCA**), као економско средство анализе са којим се пореде добити, као и трошкови при избору оптималног пројекта или применљивости алтернативе.

Типичне разлике и сличности између LCCA и BCA приказане су у табели 15.1.

Табела 15.1 Упоређење елемената који се анализирају код LCCA и BCA

Пројектни елементи	LCCA	BCA
Трошкови грађења, рехабилитације и одржавања	да	да
Трошкови корисника током грађења, рехабилитације или одржавања	да	да
Трошкови корисника током нормалне експлоатације	да	да
Трошкови корисника настали од пројекта	не	да
Екстерни трошкови корисника настали од пројекта	не	да

Почетни трошкови означавају трошкове грађења или реконструкције коловоза, чишћење и стругање, израду постељице, подлоге и застора. Такође, ови трошкови се односе и на параметре алтернативних решења који нису укључени у анализу алтернативних решења при анализи века трајања. Обавезно треба тежити да се добију реални трошкови. Требало би у анализи трајања периода, укључити и трошкове одржања саобраћаја (непрекидног тока). Ако је могуће треба размотрити, дане потребне за изградњу сваког коловоза и њихов утицај на трошкове кашњења код корисника. Међутим, то је тешко дефинисати, јер је често време грађења, ископа итд. најдрагоценије време.

Периодични трошкови одржавања/рехабилитације означавају трошкове слари сила, микростора, површинских обрада, пресвлачења итд. или рехабилитација насталих у анализираном периоду. Они употпуњују увид у стварне трошкове грађења и одржавања, јер продужавају трајност коловозне конструкције. Нпр. ојачање од 4 cm може да продужи век трајања за 10, а од 10 cm за 18 година.

Трошкови годишњег одржавања означавају трошкове годишњег редовног одржавања. У њих спадају: заливање пукотина и крпљење рупа. Под нормалним околностима ови трошкови су мали и не утичу на избор коловоза.

Преостала вредност представља вредност коловоза на крају анализираног периода. Када је анализиран период 40 година, при дисконтној стопи од 4%, фактор садашње вредности је 0.21. Нпр. ако је садашња вредност коловоза 100 000 \$, након 40 година он ће вредети 21 000 \$.

Трошкови застоја корисника су трошкови корисника моторних возила настали због изгубљеног времена и трошкова возила. Они су често и највећи код оптерећених путева. Нпр. за путничка возила, оријентационо износе

12.27 \$ (11.58 \$/часу возача +0.77 \$/часу експлоатације возила) и 23.13 \$ за теретна возила (22.31 \$/часу+0.82 \$/часу).

Период анализе представља временски период у оквиру кога се врши оцена укупних улагања у изградњу или реконструкцију коловоза, подразумевајући испуњење одређеног нивоа квалитета коловоза. Овај временски период нормално се креће од 30 до 40 година и у овај временски период може бити укључена бар једна рехабилитација.

Период трајања или "животни век" представља трајање коловоза тј. његових карактеристика до одређеног нивоа квалитета.

Садашња вредност је збир свих будућих трошкова, дисконтованих на почетну годину изградње, плус почетни трошкови изградње. Користе се за јасно дефинисање економски најповољније алтернативе код избора између више коловоза. Поред ове методе у употреби су и "еквивалентни униформни годишњи трошкови".

Дисконтна стопа представља трошкове оствареног посла. Ако инвестирате новац са годишњом каматом од 7% за наредних пет година, при годишњој инфлацији од 3%, онда је реална стопа повраћаја 4%. Дисконтна стопа представља реалну стопу повраћаја инвестиције. Нормално је да та стопа износи годишње од 3 до 5%.

Оцена стања коловоза, од које највише зависи стратегија одржавања коловоза, заснива се на регистровању:

- оштећености коловоза
- равности коловоза
- отпорности на клизање
- носивости коловозне конструкције

Терминолошки, са гледишта финансијера, одржавање коловоза - пута се дели на: редовно, превентивно и рехабилитацију/реконструкцију.

Редовно одржавање представља свакодневно одржавање и поправке оштећења по њиховом настанку. То су заливање пукотина и крпљење ударних рупа.

Превентивно одржавање представља одржавање постојећег пута са најекономичнијим поступцима, који штите, успоравају појаву будућих оштећења и одржавају или побољшавају функционално стање без повећања конструктивне носивости. Технике одржавања зависе од типа коловозне конструкције (флексибилне, круте и земљане), а састоје се најчешће од површинских обрада и танких застора.

Рехабилитације представљају наношење новог слоја по целој ширини коловоза одређене носивости и корекцију облика постојећег застора или коловоза (укључујући мале поправке система за одводњавање), ради обнове конструктивне носивости и потребне целовитости, са циљем продужења употребљивости. Нпр. наношење нових слојева, прерада застора, стругање и наношење нових слојева итд.

Реконструкција представља обнову у пуној ширини (по AASHTO упутствима и дебљини) и дужини коловоза и банклина, укључујући системе за одводњавање и геометријске елементе пута. Односи се на кориговање нивелете и кориговање конструкције у погледу носивости, као и на комплетну реконструкцију система за одводњавање.

Управљање одржавањем путева ради се на два нивоа: мрежи и пројекту.

Управљање одржавањем на нивоу мреже се односи на дефинисање стратешких одлука које имају значаја за мрежу путева у целини. Ниво података који се користи је мање детаљности. Деонице се раде по случајном (статистичком) узорку на основу величине саобраћајног оптерећења и стања, а одлуке се свде на избор оптималне стратегије одржавања за сваку од тих репрезентативних деоница. Ови резултати се користе и за одређивање приоритетних деоница за задати буџет.

Управљање одржавањем на нивоу пројекта се бави техничким одлукама специфичним за одређени пројекат (пут или путни правац). На нивоу пројекта се детаљно разматрају алтернативна решења пројектне геометрије, коловозне конструкције, поступци одржавања и конкретни поступци рехабилитације. Ниво података за доношење оцене стања коловоза је далеко детаљнији. На основу анализе трошкови/добит утврђује се оптимална пројектна алтернатива рехабилитације.

Анализом трошкова на нивоу пројекта баве се LCCA и PAV - ECO.

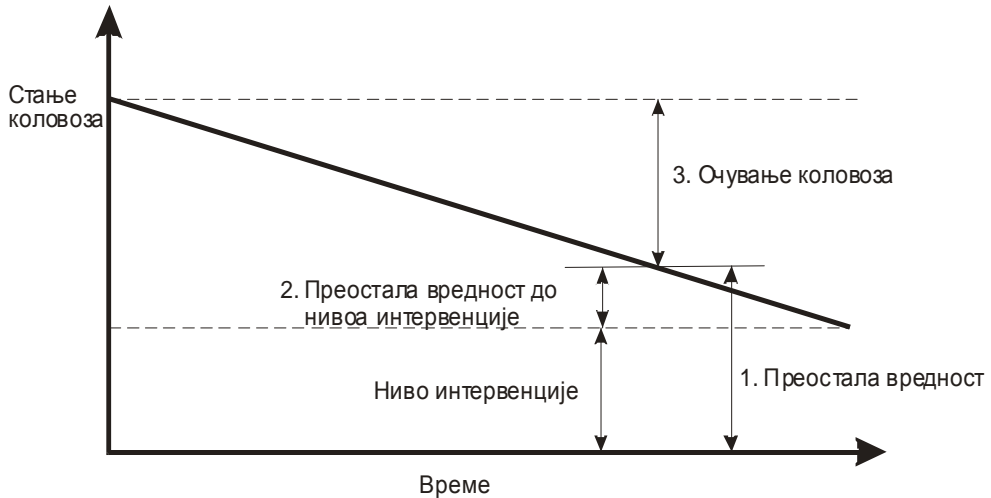
Економске анализе PAV - ECO (Economic Evaluation of Pavement Maintenance) и LCCA се заснивају на поређењу могућих стратегија одржавања укључујући финансијске трошкове власника пута за различите алтернативе одржавања, годишње трошкове корисника пута, трошкове корисника пута услед одложеног одржавања, додатне трошкове корисника пута због радова на одржавању са аспекта повећаних трошкова трајања путовања, оперативних трошкова возила, трошкова незгода и очување коловоза на крају анилизираниог периода у односу на стање коловоза (ово последње представља меру вредности коловоза). На основу ове анализе и одговарајућих информација, инвеститор може да одабере економски и временски најповољнију стратегију одржавања.

Овим анализама дефинише се и:

- остатак века трајања као време до достизања нивоа за интервенцију
- преостала вредност као новчана вредност преосталог века трајања
- очување коловоза као трошак одржавања који је потребан на крају периода анализе за повраћај конструктивног стања коловоза на почетни ниво

Што је већа преостала вредност коловоза, то ће бити нижи трошкови рехабилитације и очувања коловоза, слика 15.1.

Циљ анализе трошкова у току века трајања на нивоу пројекта је да се упореде различите алтернативе одржавања, где се само они трошкови који се разликују између алтернатива, укључују у анализе.



Слика 15.1 Илустрација концепције преостале вредности коловоза и очувања коловоза

Најпознатити економски индикатори дати су у табели 15.2.

Табела 15.2 Формуле за срачунавање економских показатеља

Бр. формуле	Показатељ	Скраћеница	Формула
1	Нето садашња вредност	NPV	$NPV = \sum_{t=0}^T \frac{B_t - C_t}{(1+d)^t}$
2	Коефицијент добити - трошкови	B/C	$\frac{PVB}{PVC} = \sum_{t=0}^T \frac{B_t / (1+d)^t}{C_t / (1+d)^t}$
3	Еквивалентни униформни годишњи трошкови	EUAC	$EUAC = NPV \cdot \left[\frac{1(1+d)^t}{(1+d)^t - 1} \right]$
4	Интерна стопа повраћаја	IRR	$\sum_{t=0}^T \frac{B_t - C_t}{(1-IRR)^t} = 0$

NPV=нето садашња вредност добити и трошкова у будућности, IRR=интерна стопа повраћаја, B=C=добит/трошкови, PVB=садашња вредност добити у будућности, PVC= садашња вредност трошкова у будућности, d=стопа дисконтовања, t=век трајања пројекта или период анализе (година), B_t=добити постигнуте у времену t, C_t=трошкови задужени у времену t

15.2 ПОСТУПЦИ АНАЛИЗЕ ТРОШКОВА ВЕКА ТРАЈАЊА

Са анализом трошкова века трајања треба започети у раној фази израде пројекта, односно, још у фази пројектовања коловоза треба мислити на његову трајност, одржавање и експлоатацију.

Основни кораци у LCCA процесу су:

1. Установљење алтернативних стратегија пројектовања коловоза у оквиру анализираних периода
2. Одређивање периода трајања активности на грађењу и одржавању
3. Процена трошкова (управе и корисника)
4. Прорачун трошкова у оквиру века трајања
5. Анализа резултата
6. Поновна оцена стратегија пројектовања

Основни циљ LCCA је да квантификују последице пројектног решења на будуће трошкове одржавања и рехабилитације, а који су неопходни са гледишта одржања нивоа услуге у оквиру пројектног периода.

Под **стратегијом пројектовања коловоза** подразумева се израда пројекта коловозне конструкције и будућих пројеката одржавања и рехабилитације. Први корак у спровођењу анализе LCCA алтернативних пројеката коловоза је да се одреде алтернативне стратегије пројектовања коловоза за период који се анализира. Сваки алтернативни пројекат ће имати очекивани почетни пројектни век (од изградње па до прве рехабилитације), периодично одржавање и можда серију рехабилитација. Важно је да се идентификује обим, време и трошкови појединачних рехабилитација - реконструкција у оквиру периода анализе, јер од њих зависе трошкови управе (трошкови изградње и трошкови одржавања) и трошкови корисника (у периоду изградње и током активности над одржавањем).

У трошкове управе спадају трошкови грађења, трошкови редовног одржавања, трошкови рехабилитација (реконструкција), трошкови одржавања саобраћаја (регулисања саобраћаја на деоницама где се изводе радови) и оперативни трошкови (енергетски трошкови осветлења у тунелима и вентилације и губици бензинских пумпи), који ће настати у посматраном периоду анализе.

У трошкове корисника спадају трошкови којима је изложен корисник пута током века трајања пројекта. Три карактеристичне компоненте ових трошкова су: експлоатациони трошкови возила (vehicle operating cost, настали због утицаја стања коловоза и ширине попречног профила коловоза, на трошкове експлоатације возила), трошкови застоја и трошкови удеса.

15.3 ПРЕОСТАЛА ВРЕДНОСТ УСЛУГЕ

Преостала вредност услуге (remaining service life value) се заснива на коштању пројекта и проценту преосталог века трајања на крају анализираног периода. Она постоји само ако алтернативни пројекат наставља да живи и после истека анализираног периода. За разлику од преостале вредности (salvage value), која је коначна, на крају пројектног периода.

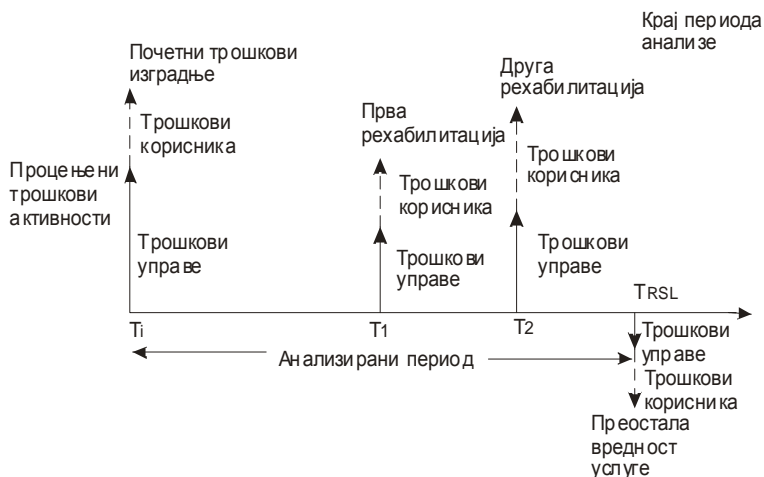
Дијаграм тока трошкова (expenditure stream diagrams) је графичка представа трошкова током анализираног периода. На дијаграму, сл. 15.2 су за различите алтернативне пројекте приказани почетне и будуће активности, трошкови управе и корисника и временски редослед ових активности и трошкова.

Најпознатији модели за анализу трошкова су: HDM - 4, FHWA LCC и PAV - ESO.

Основни фактори који се анализирају код LCCA су:

- почетни трошкови
- трошкови периодичног одржавања или обнове
- трошкови годишњег одржавања
- трошкови корисника и трошкови застоја корисника
- остатак вредности
- период анализе
- период трајања до прве рехабилитације
- стопа дисконтовања (%)
- садашња вредност

Код LCCA анализе трошкови настали у различито време могу да се сведу на заједничку вредност у изабраном тренутку.



Слика 15.2. Дијаграм тока трошкова

Код FHWA анализе се препоручује примена садашње вредности (present value - PV), али и еквивалентних униформних годишњих трошкова (equalent uniform annual cost EUAC).

15.4 АНАЛИЗА ЕКВИВАЛЕНТНИХ УНИФОРМНИХ ГОДИШЊИХ ТРОШКОВА

Анализом еквивалентних униформних годишњих трошкова, производе се за разматране алтернативе годишњи трошкови, који су настајали континуирано у разматраном периоду времена. Садашња вредност (PV) тока униформних годишњих трошкова је иста као и PV стварног тока трошкова. Еквивалентни униформни годишњи трошкови - EUAC су други начин за увид у резултате анализе трошкова циклуса трајања. Применом PV или EUAC, у анализама, постиже се иста одлука. Међутим, EUAC могу да одлуче боље с обзиром како пројектне алтернативе утичу на ресурсе управе у анализираном периоду, посебно ако је питање финансирање пројекта.

15.5 ИНФЛАЦИЈА И ДИСКОНТОВАЊЕ

Због поређења трошкова насталих у различитим временским периодима битно је познавање појма "инфлација" и "дисконтовање".

- Инфлација: Сведоци смо да у току времена новац губи своју вредност. Тако нпр. ако је 1980. год. за куповину неког добра плаћено 1980 \$, 2002. год. је плаћено 2002 \$. У принципу пораст цена током времена назива се инфлацијом, а опадање дефлацијом. Долари који укључују ефекте инфлације или дефлације у неком временском периоду, називају се номиналним, текућим или дневним годишњим доларима (евидентирани су дневне промене курса). Долари који не укључују инфлацију или дефлацију називају се константним или основним - базичним годишњим доларима.
- Дисконтовање: Трошкови или добит (у константним доларима) настали у различитим временима (прошлости, садашњости и будућности) не могу да се пореде без узимања у обзир времена њиховог настанка. Дисконтавањем се преко дисконтне стопе вредност неког посла у неком времену, своди на вредност у датом времену.

Трошкови и добити у будућности изражавају се у номиналним доларима, а веза између номиналних и константних долара је у инфлаторном индексу:

Долари_{у базној год.} = долари_{у датој год.} x (индекс цена_{у базној год.} / индекс цена_{у датој год.})

Величина индекса цена одређује се на основу бруто националног дохотка или пораста цена на мало. Реално стопа дисконтовања, која се примењује у LCCA, креће се од 3 до 5 процената.

Формула за дисконтовање будућих трошкова константне вредности у садашњу вредност, гласи:

- садашња вредност = будућа вредност $\times \frac{1}{(1+r)^n}$

где су:

- **садашња вредност.** Било која комбинација токова (коначних или бесконачних) и укупни износ могу се збирно приказати као јединична вредност у јединичној тачки времена.
- **r.** Реална стопа дисконтовања
- **n.** Број година у будућности настанка трошкова
- **$1/(1+r)^n$.** Фактор дисконтовања који је мањи или једнак јединици. Тако нпр. ако се вредност од 1000 \$ која ће настати након 30 год, дисконтује на садашњу вредност са стопом дисконтовања од 4%, добиће се садашња вредност од 308 \$. У пракси се често користи и термин "нето садашња вредност - NPV" када се анализира садашња вредност у трошковима циклуса трајања - LCCA.

Код детерминистичког LCCA, дискретним вредностима су означени индивидуални параметри. Супротно, пробабилистички LCCA дозвољава да вредности улаза индивидуалних анализа буду дефинисани дистрибуцијом фреквенције (пробабилистичке).

Са детерминистички или пробабилистички срачунатом LCCA, садашња вредност PV-а различитих трошкова, може да се пореди приликом обрачуна алтернативних решења. Зато што детерминистички приступ резултира као јединична PV за сваку алтернативу, а пробабилистички приступ омогућује дистрибуцију PV резултата.

У пракси, при разматрању LCCA најчешће се алтернативни пројекти пореде са гледишта најмањих трошкова управе (финансијера), а са гледишта корисника једино ако постоји много велика разлика у трошковима корисника између разних варијанти.

ПРИМЕР ДЕТЕРМИНИСТИЧКОГ ПРИСТУПА АНАЛИЗИ ТРОШКОВА ЦИКЛУСА ТРАЈАЊА - LCCA

Дат је пример поређења детерминистичког LCCA за две стратегије пројектовања. Свака од алтернатива има исти ниво перформанси или добити, тако да је примена LCCA оправдана. Једнаки трошкови у алтернативама не разматрају се у анализама. Коришћена је дисконтна стопа од 4% и 35 - годишњи период анализе.

Први корак: установљење пројектних алтернатива

За алтернативу А, у односу на алтернативу Б, су карактеристичне мање активности на грађењу и рехабилитацији (мањи трошкови). Алтернатива Б због одржавања планираног нивоа услуге захтева чешће запоседање радних зона, али је трајање радних зона по активностима мање у односу на алтернативу А.

Други корак: одређивање трајања активности

Година	Активности на алтернативи А	Активности на алтернативи Б
0	почетак грађења	почетак грађења
12		прва рехабилитација (век трајања 8 год.)
20	прва рехабилитација (век трајања 20 год.)	друга рехабилитација (век трајања 8 год.)
28		трећа рехабилитација (век трајања 8 год.)
35	крај периода анализе - за прихватљиви ниво века трајања	

Трећи корак: процена трошкова (управе и корисника)

Трошкови управе и корисника за сваку алтернативу за базу годину су исти. Трошкови корисника се заснивају на експлоатационим трошковима возила и застојима саобраћаја, као и трошковима због активности у радним зонама. Трошкови корисника опадају за сличну дужину посла повећавајући дужину времена за одвијање саобраћаја. Трошкови за 35. годину утичу на вредност преосталог века трајања за све алтернативе.

Год.	Активности на алтернативи А		Активности на алтернативи Б	
	Трошкови управе константни \$	Трошкови корисника константни \$	Трошкови управе константни \$	Трошкови корисника константни \$
0	26 000 000 \$	11 000 000 \$	20 000 000 \$	8 000 000 \$
12			6 000 000	10 000 000
20	15 000 000	30 000 000	6 000 000	16 000 000
28			6 000 000	28 000 000
35	(3 750 000)	(7 500 000)	(750 000)	(3 500 000)

Четврти корак: прорачун трошкова циклуса трајања

Користећи стопу дисконтовања, срачунава се садашња вредност PV за трошкове сваке управе и корисника.

Година	Алтернатива А			Алтернатива Б	
	Стопа дисконт.	Дисконт. трошкови управе	Дисконт. трошкови корисника	Дисконт. трошкови управе	Дисконт. трошкови корисника
0	1.0000	26 000 000 \$	11 000 000 \$	20 000 000 \$	8 000 000 \$
12	0.6246			3 747 582	6 245 970
20	0.4564	6 845 804	13 691 608	2 738 322	7 302 191
28	0.3335			2 000 865	9 337 369
35	0.2534	(950 308)	1 900 616	(190 062)	(886 954)
Укупни трошкови (PV)		31 895 496	22 790 992	28 296 707	29 998 576

Пети корак: Резултати анализе

Алтернатива А има комбиновано најниже трошкове управе и корисника, где алтернатива Б има ниже почетне трошкове грађења и укупне трошкове управе. Само на основу ових информација, може се донети одлука да су обе алтернативе оправдане, било алтернатива А (на основу општих трошкова) или алтернатива Б (због нижих почетних и укупних трошкова управе). Међутим, детаљније анализе могу да буду оправдане. На пример алтернатива Б би могла да се поправи у смислу испитивања смањења трошкова корисника кроз побољшање управљања саобраћајем током грађења и рехабилитације. Детаљнију анализу требало би засновати на дисконтним стопама или кључној претпоставци смањења трошкова грађења и рехабилитације. Коначно, пробабилистичка анализа може да помогне да се обухвате ефекти неизвесности у процени времена или развоја величине трошкова за било коју од алтернатива.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design, Publication No. FHWA SA-98-079, Federal Highway Administration, september 1998.
- [2] Life-Cycle Cost Analysis in Primer, U.S. Department of Transportation FHA Office of Asset Management, august 2002.
- [3] H.J. Ertman Larsen, Gregers Hildebrand and Robin A. Macdonald: Economic Evaluation of Pavement Maintenance PAV-ECO, Danish Road Institute, Report 114, 2002.
- [4] Kaan Ozbay, Neville A. Parker, Dima Jaward and Sajjad Hussain: Guidelines for Life Cycle Cost Analysis, Department of Civil & Environmental Engineering, The State University of New Jersey, july 2003.
- [5] Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, Final report appendix C, NCHRP, march 2004.

16

ИЗБОР ТИПА КОЛОВОЗНЕ КОНСТРУКЦИЈЕ

16.1 УВОД

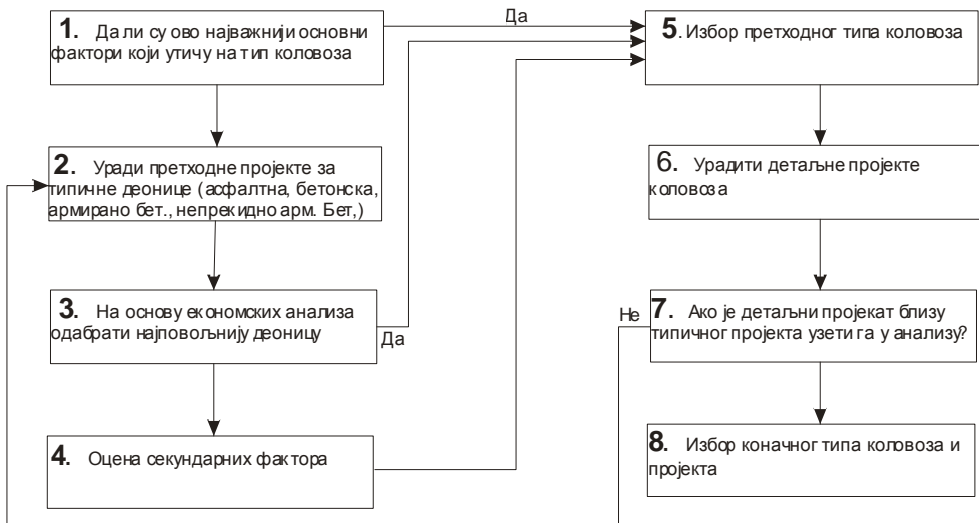
Избор типа коловозне конструкције зависи од величине деонице, саобраћаја, тла, времена, материјала, грађења, одржавања и околине. Сам процес избора се базира на поређењу алтернативних типова заснованих на теоријским или емпиријским методима. Пресудни значај за избор оптималног решења најчешће имају трошкови грађења, одржавања и експлоатације. Неки од наведених фактора су, такође, актуелни и код димензионисања коловозних конструкција и имају своју економску вредност приликом избора типа коловозне конструкције. Други фактори су од мањег значаја, али могу да буду "језичак на ваги" код две сличне коловозне конструкције, слика 16.1. Најчешће се пореди асфалтна са бетонском коловозном конструкцијом, али има смисла и поређење у оквиру истог типа коловозне конструкције. *Анализа трошкова века трајања - LCCA* представља основну алатку у процесу избора типа коловозне конструкције. Резултати LCCA указују да је најчешће разлика између најјефтинијег бетонског и асфалтног коловоза мања од 5 %.

16.2 ОСНОВНИ ФАКТОРИ

Саобраћај. Обим саобраћаја утиче на геометријске елементе пута, али проценат комерцијалног саобраћаја и фреквенција великих оптерећења

имају веома битан утицај на пројектовање коловозних конструкција. Саобраћајном студијом треба предвидети обим и пораст саобраћаја и значај пута у будућем саобраћајном систему, у односу на остале видове транспорта (железнички и водни саобраћај). Ако је превоз путем по обиму доминантан у односу на остале видове саобраћаја, онда је веома важно да он буде солидно саграђен и да на њему буде што мање интервенција у експлоатационом периоду (због застоја у саобраћају).

Карактеристике тла. Носивост тла у постелици директно утиче на тип и дебљину слојева коловозне конструкције. На пример бетонске у односу на асфалтне коловозне конструкције могу да се граде и преко слабије носивих терена. Са друге стране на тлу које мења запремину у току времена, треба градити коловозну конструкцију фазно (флексибилне коловозне конструкције).



Слика 16.1. Поступак избора типа коловозне конструкције

Време. Време - природна средина (падавине, мраз, снег и лед) утичу на носивост терена, трајност застора и отпорност на клизање. У топлим поднебљима често долази до трајних деформација на асфалтним засторима. Циклуси мржњења и отапања доводе до оштећивања бетонских застора, али и до формирања пукотина.

Грађење. Флексибилне коловозне конструкције имају приоритет, јер је могућа фазна изградња, бржа изградња, могућа је изградња у присуству саобраћаја и лакше их је обнављати. Међутим, грађење крутих коловозних конструкција је спорије, али имају знатно већу трајност и знатно мање потребе за одржавањем у току века трајања.

Прерада (рециклажа). Могућност прераде застора такође утиче на избор типа коловозне конструкције. У принципу оба типа застора могу да се прерађују, али асфалтни далеко јефтиније и ефикасније.

Трошкови. Када има више алтернативних типова коловозних конструкција, сличних карактеристика, финансије су одлучујући критеријум (трошкови грађења, одржавања и поправки). Најреалније је трошкове посматрати у оквиру експлоатационог периода - века трајања, јер су у њих тада укључени трошкови грађења, фазне изградње, обнове, одржавања и преостале вредности. Такође, треба узети у обзир и трошкове корисника за време трајања реконструкција или активности на одржавању. Важно је да период анализе буде довољно дуг и обухвати све активности на одржавању.

Број комбинација и могућности за формирање алтернативних типова коловоза је велики. За почетнике се препоручује сценарио рехабилитације приказан на слици 16.1.

Првобитна коловозна конструкција	Асфалт бетон на неvezаној подлози	Асфалт бетон на неvezаној подлози	Класични бетонски коловоз	Класични бетонски коловоз	Непрекидно армиран бетонски коловоз
Саграђена Очекивани век трајања год.	12 - 16 (недренирана) 15 - 20 (дренирана)	12 - 16 (недренирана) 15 - 20 (дренирана)	20 - 25 (недренирана) 25 - 32 (дренирана)	20 - 25 (недренирана) 25 - 32 (дренирана)	20 - 25 (недренирана) 25 - 32 (дренирана)
I рехабилитација	пресвлачење	пресвлачење	поправка и стругање	дробљење и пресвлачење	поправка и пресвлачење
Очекивани век трајања год. I рехабилитације	10 - 12	10 - 12	10 - 12	10 - 15	12 - 17
II рехабилитација	стругање и пресвлачење	стругање свих асф. слојева и пресвлачење	поправка и пресвлачење	поправка и пресвлачење	стругање, поправка и пресвлачење
Очекивани век трајања год. II рехабилитације	10 - 12	12 - 16	10 - 15	10 - 15	12 - 17
III рехабилитација	стругање и пресвлачење	стругање и пресвлачење	стругање, поправка и пресвлачење	стругање, поправка и пресвлачење	стругање, поправка и пресвлачење
Очекивани век трајања год. III рехабилитације	10 - 12	10 - 12	10 - 15	10 - 15	12 - 17

Слика 16.1. Могући рокови рехабилитације

16.3 СЕКУНДАРНИ ФАКТОРИ

Карактеристике сличних коловоза у околини. Искуствени подаци о понашању и стању коловоза на путевима у суседству, тј. сличном амбијенту и условима експлоатације имају изузетно велики значај код избора типа коловоза. Поузданост донетих одлука зависи од дужине периода посматрања и квалитета архивираних података.

Суседне деонице коловоза. Код разматрања и избора деоница за анализу треба узети у обзир и стање суседних деоница, јер нису пожељна значајна одступања у квалитету и типу коловозних конструкција (превасходно због једноставнијег одржавања).

Очување материјала и енергије. На избор типа коловозне конструкције могу да утичу расположивост минералних агрегата и везива у смислу експлоатације, али и могућности за куповину, као и неопходна енергија за њихово добијање, транспорт и уграђивање. Ово је од значаја посебно код малих пројеката.

Безбедност саобраћаја. Овде се пре свега мисли на карактеристике застора, визуелно одвајање саобраћајних трака од ивичних трака, рефлектујуће карактеристике застора и отпорности на клизање.

Експерименталне деонице. У појединим случајевима, карактеристике материјала или концепт пројектног решења, морају да се претходно утврде испитивањима на терену при условима изградње, природне средине или саобраћаја. Да би се потврдио избор, ово је пре свега важно када материјали или концепт пројектног решења преферирају одређеном типу коловоза.

Стимулација такмичењу. Веома је важно да се и поред великог притиска произвођачког лобија, приликом избора типа коловозне конструкције, развије здрав такмичарски дух. Када алтернативни пројекти коловозних конструкција имају упоредиве почетне трошкове, укључујући и пратеће трошкове земљаних радова, системе за одводњавање и остале пратеће садржаје, упоредив век трајања и трошкова у оквиру века трајања, управа за путеве може да изабере оптимално решење на основу јавно објављеног конкурса, по принципу најмањих трошкова. Ако постоји на тржишту већи избор агрегата (сличних задовољавајућих карактеристика), извођачима треба препустити могућност избора.

Локални интереси. Локални интереси политике и индустрије могу да се узму у обзир ако ће учествовати у покрићу трошкова, или пак, влада има посебану намеру да помогне њихов развој.

Пример листе за избор типа коловоза дат је у табели 16.2.

16.4 СТАНДАРДИ КВАЛИТЕТА

Пре разматрања избора типа коловоза треба дефинисати минималне стандарде квалитета застора. Ту се пре свега мисли на оштећења застора (колотрази, пукотине, огољивање зрна агрегата, љуспање, набори, закрпе, ...). Најважнији стандард је удобност вожње (директна је функција оштећења). Ниједан други стандард квалитета није универзалан за све типове коловоза и због тога избор типа коловоза и анализа трошкова постају ирелевантни. Најраспрострањенији стандард квалитета коловоза је међународни индекс равности (international roughness index - IRI).

Комбинацијом података о равности са оштећеношћу коловоза добија се оцена садашње употребљивости (present serviceability rating - PSR). Помоћу аутоматског анализатора пута - ARAN (слика 16.2), снима се аутоматски равност и оштећеност (али обрада оштећености се ради ручно).

Табела 16.2. Избор типа коловозне конструкције

Анализа	Алтернатива 1	Алтернатива 2
Трошкова		
Почетни		
Будућу		
Трошкови корисника због застоја		
Брзине грађења		
Брзо се граде		
Споро се граде		
Карактеристика		
Учестаност рехабилитација		
Лакоћа рехабилитације		
Потреба за реконструкцијом		
Могућности рециклаже		
Осталог		
Бука		
Равност		
Безбедност		



Слика 16.2. Возило ARAN за прикупљање података о коловозу

Оцена садашње употребљивости $PSR \geq 32$ сматра се прихватљивом за државне јавне путеве, $PSR \geq 31$ за преостале јавне путеве, а $PSR < 29$ неприхватљивим за било који пут (коловоз је у осредњем до лошем стању).

Препоручљиве вредности IRI m/km (inches/mile) дате су табели 16.3.

Табела 16.3. Препоручљиве вредности IRI m/km (inches/mile)*

Није потребно побољшање	
Магистрални	< 1.5 (95)
Остали	< 1.5 (95)
У ближој будућности потребно побољшање	
Магистрални	1.5 – 1.9 (95 – 120)
Остали	1.5 – 2.7 (95 – 170)
Потребно побољшање	
Магистрални	> 1.9 (120)
Остали	> 2.7 (170)

* IRI (in/mi) : 63.36 = IRI (m/km)

Искусвени податак је да асфалтне коловозе на оптерећеним магистралним путевима треба обновити - пресвући сваких 10 - 11 година. Очекивани век трајања, на основу искуства, асфалтних коловоза је 15 година, а бетонских 25 година. За LCCA пројектни период најчешће се узима 35 година. Код дефинисања протеклог периода - историјског трајања коловоза, треба дефинисати када је изведена рехабилитација, а не када је требало да се изведе с обзиром на стање коловоза. У развијеним земљама то кашњење у просеку износи око 3 год.

Препоручљиви пројектни периоди за рехабилитације асфалтних застора (побољшање подлоге и нов хабајући слој) је 20 година, уобичајеног пресвлачења асфалтом 15 година, а за пресвлачење бетонских коловоза 25 година. Препоручљиви пројектни периоди за нове коловозе данас се крећу од 40 до 50 година. Примена полимерисаних битумена повећава цену асфалтне масе од 5 до 10%/t, израда SMA асфалта је скупља око 15%/t, а

побољшање постељице стабилизацијом повећава цену коловоза за 5 до 10%.

Коштање одржавања класичних бетонских коловоза је:

Од времена изградње, год.	Активности на одржавању	Једнократно коштање по km
0 - 10	нема	0
10 - 15	мале поправке спојница	2 000 \$
15 - прва рехабилитација	мале поправке спојница	4 000 \$

Коштање одржавања асфалтних коловоза је:

Од времена изградње, год.	Активности на одржавању	Једнократно коштање по км
0 - 3	нема	0
3 - 5	испуна пукотина	1 000 \$
5 - прва рехабилитација	испуна пукотина и поправке	1 250 \$

У развијеним земљама за стопу дисконтовања се узима вредност од 5 %, а за анализирани период 15 година.

16.5 ЗАКЉУЧАК

Километар коловозне конструкције на аутопуту кошта око 2 000 000 \$, а изабрани тип коловозне конструкције директно утиче на век трајања, одржавање, безбедност и трошкове корисника. Овако сложен посао треба урадити крајње професионално.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Pavement Type Selection Protocol, Washington State Department of Transportation, Enviromental and Engineering Programs Division, Olympia, januar 2005.
- [2] DelDOT Road Design Manual, Pavement Selection, Chapter Nine, july 2004.
- [3] The Pavement Type Selection Process, Wisconsin Department of Transportation, august 1994.
- [4] Pavement Design and Type Selection Process, Missouri Department of Transportation, MoDOT/Industry, march 2004.
- [5] Pavement Type Selection Processes, The Asphalt Pavement Alliance, Lexington, USA, 2004.

17

ОЦЕНА СТАЊА КОЛОВОЗА

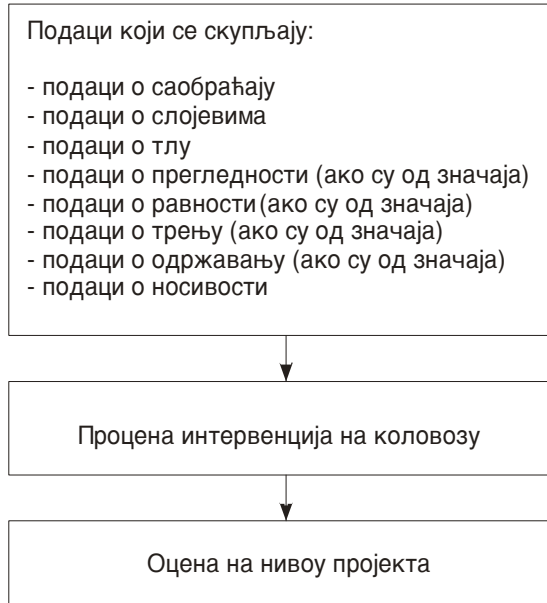
17.1 УВОД

Оцена стања путева може да се ради на нивоу мреже и нивоу пројекта. На нивоу пројекта се даје оцена стања о деоници пута на основу мерења:

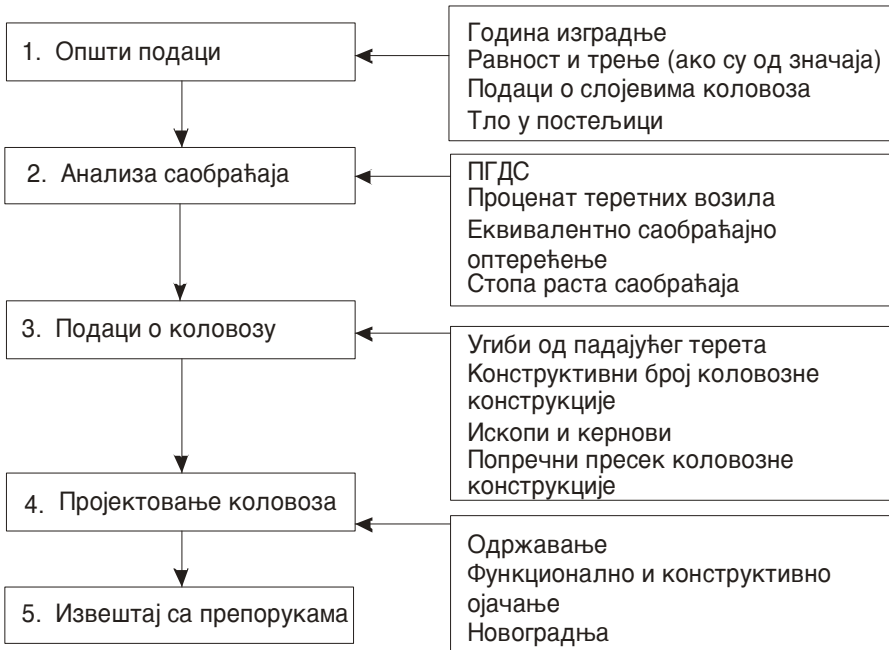
- оштећености коловоза и пратећих садржаја
- равности коловоза
- отпорности на клизање
- носивости коловозне конструкције

На нивоу мреже се раде иста мерења, само у мањем обиму. Оцена на нивоу мреже се користи за дефинисање годишњих буџета за одржавање, формирање стратегије одржавања и избор приоритетних путних праваца - деоница, а на нивоу пројекта за одређивање узрока настанка оштећења, одржавања и пројектовање нових коловозних конструкција.

На нивоу мреже се скупљају подаци приказани на слици 17.1, а пројекта на слици 17.2.



Слика 17.1 Подаци који се скупљају на нивоу мреже



Слика 17.2 Подаци који се скупљају на нивоу пројекта

17.2 ОЦЕНА НА НИВОУ МРЕЖЕ

На нивоу мреже треба:

1. Дефинисати опште податке
2. Проценити извршене интервенције на коловозу
3. Дати оцену на нивоу мреже

У оквиру општих података треба прикупити: податке о саобраћају (ПГДС, ЕСО, фактор раста саобраћаја, % теретних возила, ...), податке о слојевима коловозне конструкције (материјали, дебљине, година изградње, ...), податке о тлу (тип и носивост), визуелне податке о стању, податке о равности, податке о носивости конструкција (коловозних и објеката), податке о отпорности на клизање и податке о одржавању (укључујући датуме и типове рехабилитација).

У оквиру процене извршених интервенција на коловозу треба прикупити минималне податке са терена и то визуелним путем о коловозу (оштећењима и интервенцијама на коловозу - стругањима, пресвлачењима и закрпама) и стању система за одводњавање (ивичњаци, риголе, дренаже, јаркови, ...).

Оцене на нивоу пројекта треба да садрже: збирно еквивалентно саобраћајно оптерећење (на основу расположивих података), стање застора, потребну носивост коловозне конструкције, оцену о потреби побољшања коловоза (пресвлачењу, реконструкцији, новој конструкцији, ...), анализу трошкова трајања коловоза и приоритетне деонице за детаљнију даљу обраду (ниво пројекта).

Детаљнија обрада (обрада на нивоу пројекта) није потребна ако се раде послови из редовног одржавања: испуна пукотина, пресвлачење асфалтом до дебљине од 4 см (ако се ради само о побољшању равности или трења), пресвлачења од 5 см (ако се пресвлачи мање од 5% површине коловоза), површинска обрада (ако се изводи на мање од 5% површине коловоза) и крпљење (ако се изводи на мање од 5% површине коловоза).

17.3 ОЦЕНА НА НИВОУ ПРОЈЕКТА

На нивоу пројекта треба:

1. Дефинисати опште податке
2. Анализирати саобраћај
3. Прикупити и анализирати податке о коловозу
4. Урадити пројекте новог или одржавања и рехабилитације старог коловоза
5. Урадити коначни извештај
6. Урадити оцену деонице и извођачки пројекат коловоза

Општи подаци треба да садрже: годину градње (новог или обновљеног), оцену равности (ако је од значаја), величину отпорности на клизање (ако је од значаја), материјале у слојевима коловозне конструкције, и тип и носивост тла.

Подаци о саобраћају треба да садрже: пројектни период, просечни годишњи дневни саобраћај - ПГДС, број теретних возила, еквивалентно саобраћајно оптерећење, коефицијент раста саобраћаја и оптерећења од возила (ако постоји).

Подаци о коловозу треба да садрже: носивост мерену угибомером (пожељно динамичким), оштећеност, равност и отпорност на клизање. Сврха мерења угиба са падајућим теретом је да се одреди носивост коловозне конструкције и тла у постељици (конструктивни број коловозне конструкције $SN_{\text{ефективно}}$ модули еластичности слојева, повратни модул тла у постељици, могуће шупљине и код бетонских коловоза преношење оптерећења са једне плоче на другу или са једне стране пукотине на другу). Број мерења зависи од величине и стања деонице. Измерени угиби се коригују у функцији од температуре коловоза и влажности у постељици, статистички обрађују и одређују хомогене деонице (са приближно сличним угибима). На хомогеним деоницама врше се бушења да би се одредила дебљина и састав слојева у коловозним конструкцијама, карактеристике материјала у слојевима (повратни модули) и ниво подземних вода. Такође треба одредити деонице (количину) где се постојећи коловоз користи као подлога за нову коловозну конструкцију, тј. колико се слојева скида (сви или делимично).

Пројектовање коловоза се ради због: активности одржавања, функционалног пресвлачења, конструктивног пресвлачења, проширења коловоза и реконструкције - нове изградње. Активности одржавања претежно укључују: локална пресвлачења, замену више слојева, испуну пукотина, површинске обраде (слари сил, микро засторе, површинске обраде итд.), испуну спојница, чишћење спојница и стабилизацију плоча. За потребе израде пројекта одржавања треба дефинисати: тип коловоза, стање коловоза, саобраћај, карактеристике активности одржавања и локалне специфичности (расположиви материјали и технологије). У оквиру функционалног или конструктивног пресвлачења коловоза треба утврдити постојеће стање коловоза и дефинисати будући саобраћај. По могућству треба урадити више алтернатива и преко анализе трошкова у оквиру века трајања утврдити оптимално решење.

Завршни извештај треба да садржи: пројекте геометријских елемената пута (ситуационе планове и профиле постојећег и новопројектованог стања), оцену стања коловоза (равност - IRI, носивост - угиби са падајућим теретом, отпорност на клизање и оштећеност), податке о тлу у постељици, банкини и косинама (носивост, отпорност на дејство мраза, скупљање, ниво подземних вода итд.), податке о стању система за одводњавање, анализу саобраћаја (пројектни период, просечни годишњи дневни саобраћај - ПГДС, раст саобраћаја, еквивалентно саобраћајно оптерећење, проценат теретних возила итд.), димензионисање коловозних конструкција (провера постојећих и потребног ојачања), мере за побољшање одводњавања (ако је потребно), детаље уклапања старог и новог стања, технички извештај (општи опис трасе, приказ прикупљених и обрађених података), предмер и предрачун радова, пројекат заштите градилишта за време извођења радова, пројекат заштите природне средине и техничке услове за квалитет материјала, слојева и извршења радова.

17.4 ОЦЕНА ОШТЕЋЕНОСТИ

Узроци оштећења коловозних конструкција могу бити: оптерећење, параметри средине, физичко - хемијске промене у карактеристикама материјала и људски фактор. Својствено за сва оштећења је да се манифестују на површини коловоза преко:

1. пукотина
2. неравнина
3. ломова
4. губитка отпорности на трење

Круте коловозне конструкције

Две основне врсте оштећења су: пукотине и ломови.

Пукотине у бетонским коловозима настају због прекорачења напона или лошег неговања бетона у фази очвршћавања, а као последица недозвољених оптерећења, губитка носивости у постељици, дејства температуре и лоше пројектованих и одржаваних спојница.

Основни типови пукотина су:

- подужне, попречне и дијагоналне
- угаоне
- “Д” пукотине
- оштећења испуне спојница

Ломови бетонских плоча, који обухватају и љуспање и чупање агрегата су:

- љуспање
- круњење спојница
- круњење углава
- издизање
- дробљење плоча

Неравнине су манифестоване:

- пумпањем
- слегањем

Губитак отпорности на трење је изражен преко:

- глачања агрегата
- запрљаности

Флексибилне коловозне конструкције

Основни типови пукотина насталих због угиба застора преко слабо носиве подлоге, скупљања застора, лоше изведених спојева “шлусева” или рефлектовања су:

- подужне и попречне пукотине
- мрежасте пукотине
- пукотине у облику блокова
- клизајуће пукотине
- рефлектујуће пукотине

Основни типови ломова због недовољне збијености застора, премало везива у мешавини или прегревања су:

- ударне рупе

Неравнине застора настају због слегања подлоге, бубрења тла и дејства мраза у постељици. Основни типови неравнина су:

- колотрази
- набори
- улегнућа
- бубрења

Фактори који смањују отпорност на трење застора и изазивају појаву пливања на води су вишак везива у мешавини, превише емулзије на контакту између спојева, мекан агрегат и загађен - запрљан застор. Типична оштећења ове врсте су:

- излучевине
- углачан агрегат
- просуто гориво
- загађење

Основни параметри битни за анализу оштећености застора су:

- стандардизација терминологије којом се представља тип и величина оштећености
- идентификовање типова оштећења која имају значајан утицај на понашање коловоза
- утврђивање графичких и визуелних описа оштећења са одређеним оценама, да би се што више смањила грешка приликом њиховог представљања

Прикупљање, обрада и представљање оштећења обавља се по методологији изложеној у посебном упутству [3].

17.5 ОЦЕНА РАВНОСТИ

Равност (неравност) представља одступање површине застора од пројектованих кота коловоза. Мерење равности се обавља помоћу два основна типа опреме - два принципа рада: реакцијом на неравнине и регистрацијом стварних профила.

Опрема за мерење равности, по принципу реакције на неравнине бележи динамичко понашање механичког система у вожњи при константној брзини

(најчешће 50 km/h). Резултат таквог мерења је акумулисање свих угиба механичког система на посматраној деоници, а који се потом поделе са дужином деонице и добије вредност IRI изражена у јединицама нагиба [m/km].

Према иницијативи "Светске банке", уведен је репрезентативни параметар за оцену равности IRI - International Roughness Index, а према ASTM - у E807-82A (ASTM E807 - 82A) равност коловоза је дефинисана као одступање од нивелете коловоза са карактеристичним димензијама које динамички утичу на возило, квалитет вожње, динамичка оптерећења и дренажу. IRI је индикатор стања коловоза, а утиче на комфорност вожње, оперативне трошкове возила и безбедност. На укупну оцену равности, према моделу HDM - IV, утичу конструктивне деформације коловоза, пукотине, колотрази, рупе и околина (температура и влажност). Овај индекс равности - IRI је изражен у (mm/km). Вредности овог индекса (табела 17.1) нису уједначене ни у једној држави, управо због параметара који на њега утичу, али се као оријентационе вредности за флексибилан коловоз могу узети подаци који су усвојени у савезној држави Монтани [6], као нама најприближнијој по климатским условима:

Табела 17.1 Вредности индекса IRI

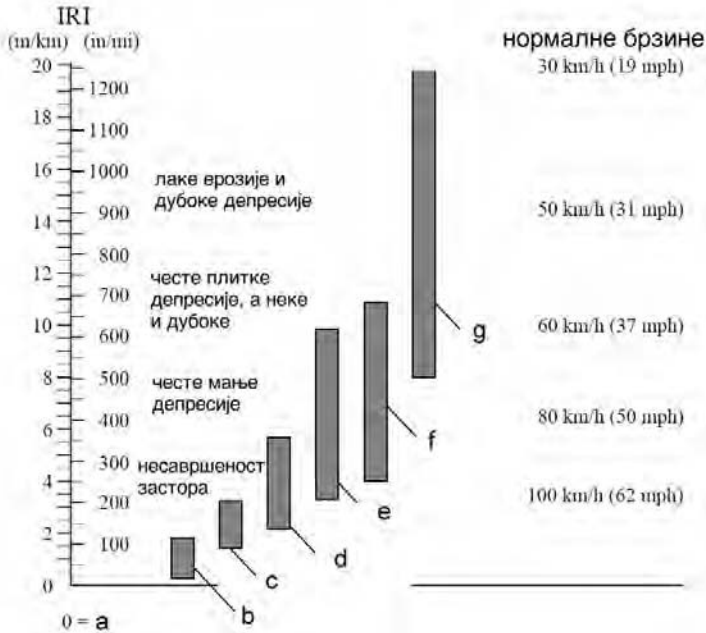
Оцена вредности IRI [mm/km]		
Оцена	Асфалтни коловоз	Бетонски коловоз
врло добар	0 - 71	0 - 134
добар	72 - 111	135 - 174
средњи	112 - 158	175 - 221
лош	159 - 213	222 - 276
врло лош	> 213	> 276

Препоручљиве вредности IRI [mm/km] са гледишта стања коловоза дате су у табели 17.2 (искуства из САД).

17.2 Препоручљиве вредности IRI [mm/km]

добар	IRI	побољшање није потребно	
		међуградски	< 150
		остали	< 150
средњи	IRI	ускоро ће бити потребно побољшање	
		међуградски	150 - 190
		остали	150 - 270
лош	IRI	потребно побољшање	
		међуградски	> 190
		остали	> 270

Према литератури [10] оријентационе вредности IRI према врстама оштећења коловоза и могућим брзинама вожње су приказане на слици 17.3.



$$\text{IRI (in/mi)} = 63.36 \times \text{IRI (m/km)}$$

- a - апсолутна перфекција
- б - полетно - слетне стазе и аутопутеви
- ц - нови коловози
- д - стари коловози
- е - одржавани коловози без застора
- ф - оштећени коловози
- г - неравни путеви без застора

Слика 17.3 Оријентационе вредности IRI према врстама оштећења и брзинама вожње

17.6 ОЦЕНА ОТПОРНОСТИ НА КЛИЗАЊЕ

Храпавост коловозне површине представља способност коловозног застора да се инерцијалним силама возила, супротстави својим реактивним силама трења и тако омогући контролисано кретање возила. Представља силу на ободу точка који је претходно укочен (блокиран) и почиње да клиза по застору. Оцењује се, уз велика упрошћења, најчешће мерењем отпорности на клизање (силе која делује у равни контакта точка и застора) тј. коефицијента трења, одговарајућим методима и уређајима.

Коефицијент трења је однос између силе која делује у равни контакта и нормалног оптерећења које се преноси са точка на коловоз.

Мерењем текстуре застора утврђује се храпавост, а мерењем отпорности на трење утврђује се учинак те храпавости.

За мерење дубине текстуре користи се поступак “пескарења” (посипање природним песком стандардне гранулације и познате запремине), мерење брзине истицања воде (JUS U.C4.018), узимање отисака фолије, фотографисање, ласерски профилограф (који омогућава континуално мерење текстуре при брзинама већим од 35 km/h и рачунарску обраду података) итд.

Најпознатији фиксни уређај (са гуменом површином која се таре о коловоз) за мерење способности трења коловоза су:

- “LEROUX” конструисан у Француској по принципу клатна баждареног на трење које одговара шмиргл - папиру
- апарат за испитивање отпорности на трење “Skid Resistance Tester” - SRT, развијен у Енглеској

и други.

На основу резултата мерења фиксним уређајима може се извршити категоризација коловозних површина, јер дају извесну меру трења између површине коловоза и опитне гумене папуче. Њихова примена је ограничена на засторе “фине” текстуре ($d_{\max} \leq 11.2 \text{ mm}$), када резултати дају индикацију о својствима отпорности на трење са коченим точком при брзини кретања возила од 50 km/h.

Препоручене минималне вредности “броја клизања” и вредности са клатном “SRT” [5] дате су у табели 17.3.

Табела 17.3 Препоручљиве вредности за “SRT”

Средња брзина саобраћаја V [km/h]	“SRT” вредност
48	50
64	55
80	60
96	65

На влажном коловозу у односу на суви [5] број несрећа је већи за око 15%.

При већој брзини од 90 km/h у присуству воде (пљускови и лоше одводњавање воде са коловоза) веома је извесна могућност појаве “пливања на води”. Зато је битна препорука да на деоницама пута, где је дебљина слоја воде већа од 2.5 mm (или више), треба обавезно ограничити брзину на 80 km/h.

17.7 ОЦЕНА НОСИВОСТИ

Носивост коловозних конструкција утврђује се лабораторијским и теренским истраживањима. У лабораторији се под контролисаним условима утврђују чврстоће материјала (модул крутости - еластичности, чврстоћа на затезање

при савијању, отпорност на замор и Поасонов коефицијент), а на терену “крутост” коловоза (однос оптерећења и одговарајућег еластичног угиба).

Мерење угиба (дефлексија) коловозне конструкције врши се једном од четири основне технике: статичком, динамичком, ударном и сеизмичком.

Због своје једноставности, Бенкелманова греда је у прошлости била најраспрострањенија метода мерења угиба. Међутим, динамички и ударни угибомери имају низ предности:

- већу осетљивост и тачност
- симултано мерење угиба у више тачака
- брже извођење опита

Тренутно је у свету најзаступљенији угибомер са падајућим теретом FWD (Falling Weight Deflectometer), на слици 17.4.

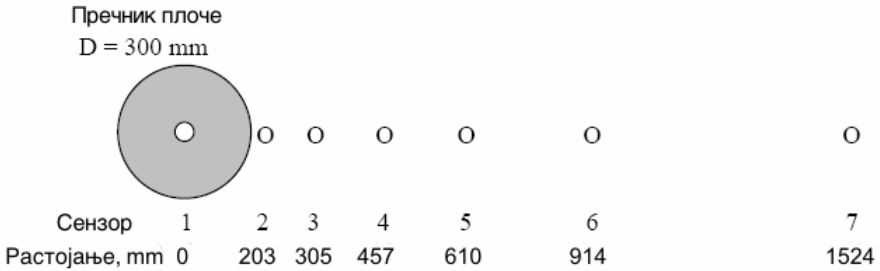


Слика 17.4 FWD (Falling Weight Deflectometer) уређај за мерење угиба са падајућим теретом

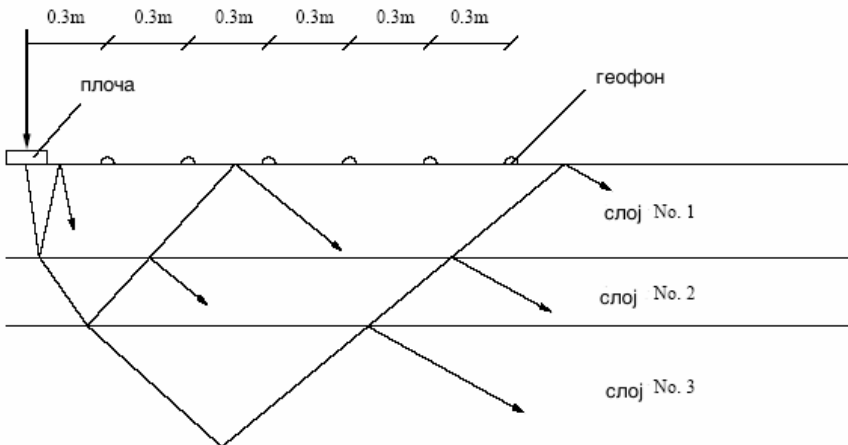
Угибомер се састоји од тега (масе од 150 kg за путеве и 400+250 kg за аеродроме) који вертикално пада (висина варира од 0.04 до 0.4 m) на плочу пречника од 300 до 450 mm) спрегнуту са опругом, слика 17.5 и 17.6 .

Максимална величина силе може да варира (од 15 до 150 kN) уз помоћ:

- промене масе терета
- промене висине пада (најпрактичнији начин за промену силе)
- промене константе опруге

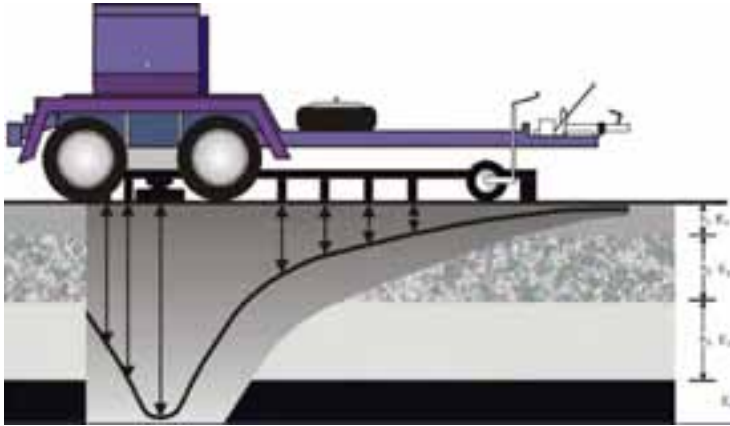


Слика 17.5 Положај оптерећења и сензора који мере угибе



Слика 17.6 Шематски приказ распрострања удара

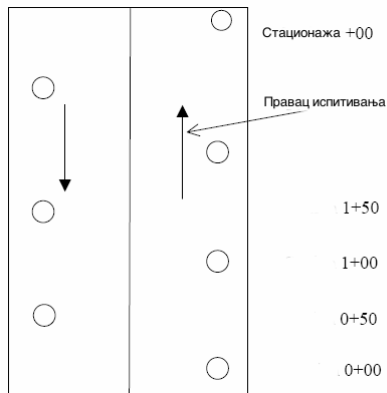
Угиб у средини оптерећења је функција карактеристика материјала и димензија коловозне конструкције (сл. 17.7). То, међутим, није довољно за тачну интерпретацију, јер коловозне конструкције са различитим облицима криве угиба, а с тиме и сасвим различитим карактеристикама, могу врло често да покажу исти угиб у средини оптерећења. Због тога се као допуна угиба у средини оптерећења d_0 , мери угиб у најмање још једној тачки на "r" метара од средине. Ова тачка може бити произвољно изабрана, или како се често примењује фиксирана на 0,2, 0,3, 0,6, 0,9, 1,2 или 2,3 m (данас се најчешће угиби мере на седам или девет позиција). У принципу угиб у осовини оптерећења (d_0) пружа податке о укупној носивости коловозне конструкције, угиби $d_0 - d_3$ о стању виших слојева, а угиб d_7 о крутости тла. Угиби се мере помоћу геофона.



Слика 17.7 Изглед криве угиба коловоза (дефлексионог базена)

Потребан број измерених угиба, најчешће се одређује на основу искуства, тј. треба да буде најмање 20 мерења и то на размаку од 30 до 75 m (најчешће 50 m на путевима за ниво пројекта и 200 m за ниво мреже), слика 17.8.

Резултати ових испитивања се обрађују статистички одређивањем хомогених деоница. Служе за одређивање карактеристичних угиба на хомогеним деоницама. Уз познато саобраћајно оптерећење, температуру коловоза и меродавни максимални угиб, процењује се модул постељице M_r , а затим одређује ефективни модул коловозне конструкције и ефективна носивост коловозне конструкције.



Слика 17.8 Положај мерних места

Упоредо са овим поступком димензионише се и нова коловозна конструкција. Разлика између ефективне носивости и носивости нове коловозне конструкције даје димензије ојачања постојеће коловозне конструкције.

17.7.1 КАРАКТЕРИСТИЧНИ УГИБ

Карактеристични или репрезентативни угиб, с обзиром да се понаша по законима статистике, може да се срачуна из израза:

$$\bar{X} = \frac{\sum Di}{n} \quad (17.1)$$

где је:

\bar{X} = средњи угиб на деоници која се мери

Di = појединачно измерени угиби на деоници

n = број мерења на деоници

Вредност 80 процентног угиба, представља ниво угиба који је приближно 80 процената од свих угиба мањи и 20 процената већи од срачунате вредности:

$$D_{80} = \bar{X} + 0.84 \cdot s \quad (17.2)$$

где је:

\bar{X} = средњи угиб на деоници која се мери

D_{80} = 80 проценатни угиб на застору за испитивану деоницу

s = стандардно одступање за све измерене угибе на испитиваној деоници

$$s = \sqrt{\frac{\sum (Di - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (17.3)$$

Овај приступ је на страни сигурности јер се добијају веће дебљине ојачања, него да су биле коришћене средње вредности угиба.

Међутим, због великог утицаја температуре коловоза на еластичне карактеристике коловозних конструкција (посебно флексибилних) и успостављања корелације са мерењима при различитим спољним условима, измерени угиби се коригују на референтну температуру од 20 °C:

$$D_{20} = D_T \cdot [10^{(A \cdot (20 - Td))}] \quad (17.4)$$

где је:

D_{20} = кориговани угиб на референтну температуру од 20 °C, mm

Td = температура у средини коловоза на дубини d , °C

D_T = угиб измерен на температури T (°C), mm

$A = 5.807 \times 10^{-6} \times (h_{AC}) \times 1.4635$ (за мерење у трагу точкава)

$A = 6.560 \times 10^{-6} \times (h_{AC}) \times 1.4241$ (за мерење у средини саобраћајне траке)

h_{AC} = дебљина асфалта, mm

Међутим, ако је облачно:

$$D_T = 0.95 + 0.892 \times IR_o + (\log(d) - 1.25) \times (-0.448 \times IR_o) = 0.621 \times (I \text{ дан}) + 1.83 \times \sin(hr_{18} - 15.5) + 0.042 \times IR_o \times \sin(hr_{18} - 15.5) + 0.042 \times IR_o \times \sin(hr_{18} - 13.5) \quad (17.5)$$

где је:

IR_0 = температура на застору, °C

d = дубина на којој се предвиђа температура, °C

I дан = просечна температура ваздуха дан пре мерења, °C

hr_{18} = време у току дана, у оквиру дневног 24 - часовног система, али срачунатог да циклус промена подизања и падања температура траје 18 часова

17.7.2 ХОМОГЕНЕ ДЕОНИЦЕ

Код путева се мерење угиба врши само у једном, а код аеродроме (због знатно веће ширине коловоза) у више подужних профила. Прикупљени подаци се статистички обрађују да би биле одређене деонице коловоза са приближно сличним карактеристикама носивости - тзв. хомогене деонице.

Уз сваки угибомер испоручује се покретни рачунар и програм за статистичку обраду података.

Постоји више начина за одређивање броја и дужине хомогених деоница. Најједноставнији је да се карактеристични угиб за одређену деоницу (најчешће дужине 100 m) не разликује од суседних за више од 10 %. У противном, то је граница хомогене деонице.

17.7.3 ПРОРАУН ЕЛАСТИЧНИХ КАРАКТЕРИСТИКА КОЛОВОЗНИХ КОНСТРУКЦИЈА ИЗ ИЗМЕРЕНИХ УГИБА

Прорачун еластичних карактеристика коловозних конструкција из измерених угиба обавља се по методи "прорачуна уназад" (back-calculation), анализирајући коловозну конструкцију најчешће као еластични носач на еластичној подлози. За сада, још експериментално, ради се и на одређивању модула супротним поступком тзв. "прорачуном унапред" (forward-calculation).

Три основна приступа прорачуну еластичних модула слојева коловозних конструкција су: метод еквивалентних дебљина (нпр. ELMOD и BOUSDEF), метод оптимизације (нпр. MODULUS и WESDEF) и интерактивни метод (нпр. MODCOMP и EVERCALC). Код свих ових рачунарских програма критични параметар је дебљина слојева коловозне конструкције, изузев неких где је придодат и Јангов модул еластичности (нпр. MICHBACK). Многи од ових рачунарских програма су слични, али резултати могу да буду различити због усвојених претпоставки, технике итерација, прорачуна уназад или алгоритама за прорачун уназад.

Четири основне категорије метода за прорачун уназад су:

- статичко (деловање оптерећења) - линеарна (карактеризација материјала) метода

- статичко (деловање оптерећења) - нелинеарна (карактеризација материјала) метода
- динамичко (деловање оптерећења) - линеарна (карактеризација материјала) метода
- динамичко (деловање оптерећења) - нелинеарна (карактеризација материјала) метода

Код примене технике прорачуна уназад треба срачунати еластичне модуле за најмање три слоја (из три различита дефлексиона базена). Анализирани системи коловоза састоје се од:

- застора (асфалтног или бетонског)
- подлоге (невезаног или шљунковитог за флексибилне коловозе и неvezаног или стабилизваног за круте коловозе)
- постелице (дубине до крутог слоја до кога се простира дефлексиони базен)

За круте коловозе везана подлога испод бетонске плоче разматра се као подлога.

Веза између угиба и карактеристика коловоза по Бусинеску (Boussinesq - [13]) за линеарно еластични полупростор (невезани материјал), али и за флексибилне коловозне конструкције као заједнички модул целокупне коловозне конструкције гласи:

$$E_0 = \frac{(1.5 \cdot a \cdot \sigma_0)}{d_0} \text{ или } E_0 = \frac{2(1-\nu^2) \cdot \sigma_0 \cdot a}{d_0} \quad (17.6)$$

где је:

E_0 = "површински" или комбинирани модул постелице испод оптерећене плоче, заснован на Поасоновом коефицијенту тла 0.5 - мада, реално он износи 0.35 - 0.45

a = радијус оптерећене плоче угибомера

σ_0 = највећи притисак испод оптерећене плоче

d_0 = угиб у средини оптерећене плоче

ν = Поасонов коефицијент

$$E_{0,r} = \frac{(0.84 \cdot a^2 \cdot \sigma_0) \cdot r}{d_r} \quad (17.7)$$

где је:

$E_{0,r}$ = "површински" или комбинирани модул постелице испод коришћеног сензора (на r растојању од осовине оптерећења); константа 0.84 одговара Поасоновом коефицијенту 0.4

a = радијус оптерећене плоче угибомера

$\sigma_0 =$ највећи притисак испод оптерећене плоче

$d_r =$ угиб на растојању r од осовине оптерећења

$r =$ растојање од осовине оптерећења (центра плоче) на коме се чита угиб d_r

Константа 0.84 одговара Поасоновом коефицијенту 0.4 (узгред, мале промене у Поасоновом коефицијенту имају минимални утицај на изложену једначину).

По Хоговом (Hogg - [14]) моделу и допунама Ваисмена и Гринштена (Wiseman and Greenstein - [14]), који се заснива на хипотетичном двослојном систему састављеном од релативно танке плоче на еластичној подлози (коначној постелјици), крутост подлоге гласи:

$$E_0 = I \frac{(1 + \mu_0)(3 - 4\mu_0)}{2(1 - \mu_0)} \left(\frac{S_0}{S}\right) \left(\frac{p}{\Delta_0 l}\right) \quad (17.8)$$

Растојање где је угиб приближно једнак једној половини од угиба насталог испод центра оптерећене плоче, гласи:

$$r_{50} = r \frac{(1/\alpha)^{1/\beta} - B}{\left[\frac{1}{\alpha} \left(\frac{\Delta_0}{\Delta_r} - 1\right)\right]^{1/\beta} - B} \quad (17.9)$$

Бочно растојање где је угиб једнак половини угиба у средини плоче:

$$l = y_0 \frac{r_{50}}{2} + \left[(y_0 r_{50})^2 - 4mar_{50} \right]^{1/2} \quad (17.10)$$

ако је $\frac{a}{l} < 0.2$, тада је $l = (y_0 - 0.2m)r_{50}$

Карактеристична дужина дефлексионог базена:

$$\left(\frac{S_0}{S}\right) = 1 - \bar{m} \left(\frac{a}{l} - 0.2\right) \quad (17.11)$$

ако је $(a / l) < 0.2$, онда је $(S_0 / S) = 1.0$

где је:

$E_0 =$ модул постелјице

$\mu_0 =$ Поасонов коефицијент за постелјицу

$S_0 =$ Теоријска тачка крутости оптерећења

$S =$ Крутост коловоза = p / Δ_0 (оптерећена површина)

p = примењено оптерећење

Δ_0 = угиб у центру оптерећене плоче

Δ_r = угиб на бочном растојању r

r = растојање од центра оптерећене плоче

r_{50} = бочно растојање где је $\Delta_r / \Delta_0 = 0.5$

l = карактеристична дужина

h = дебљина коловоза (од застора до постељице)

I = коефицијент (табела 17.4)

α = коефицијент корекције криве (табела 17.4)

β = коефицијент корекције криве (табела 17.4)

V = коефицијент корекције криве (табела 17.4)

y_0 = коефицијент карактеристичне дужине (табела 17.4)

m = коефицијент карактеристичне дужине (табела 17.4)

\bar{m} = коефицијент односа крутости l

Ваисмен и Гринштен у примени Хоговог модела разматрају три случаја. У првом случају коловоз је на неограниченој еластичној подлози, а у другом и трећем на ограниченој еластичној подлози одређене дебљине за коју се претпоставља да је приближно 10 пута карактеристична дужина l дефлексионог базена. За ове две коначне дебљине постељице Поасонов коефицијенти су 0.4 и 0.5. Различите константе су узете, као што је приказано у табели 17.4, за три верзије Хоговог модела. Применом другог случаја добијају се реалне пројектне вредности и оне се веома често користе за прорачун модула постељице приликом оцене коловоза у "прорачуну уназад".

Табела 17.4 Коефицијенти у Хоговом моделу

Случајеви Хоговог модела		случај 1	случај 2	случај 3
Дубина до чврстог дна	x/l	10	10	неограничен
Поасонов коефицијент	μ_0	0.50	0.40	све вредности
коефицијент	I	0.1614	0.1689	0.1925
однос Δ_r / Δ_0		> 0.70	> 0.43	све вредности
$r_{50} = f(\Delta_r / \Delta_0)$	A	0.4065	0.3804	0.3210
	β	1.6890	1.8246	1.7117
	B	0	0	0
однос (Δ_r / Δ_0)		< 0.70	< 0.43	
$r_{50} = f(\Delta_r / \Delta_0)$	A	$2.6947 \cdot 10^{-3}$	$4.3785 \cdot 10^{-4}$	
	β	4.5663	4.9903	
	B	2	3	
$l = f(r_{50}, a)$	Y_0	0.642	0.603	0.527
	m	0.125	0.108	0.098
$S / S_0 = f(a/l)$	\bar{m}	0.219	0.208	0.185

За круте коловозне конструкције у "Приручнику за пројектовање коловозних конструкција AASHTO" из 1993. користи се поступак површине дефлексионог базена "AREA":

$$A_{36}=6[1+2(d_{12}/d_0)+2(d_{24}/d_0)+(d_{36}/d_0)] \quad (17.12)$$

где је:

A_{36} = површина "AREA" дефлексионог базена у првих 914 mm (36 inches)

d_0 = угиб измерен у центру плоче угибомера са падајућим теретом

d_{12} = угиб измерен на 305 mm (12 inches) од центра оптерећене плоче

d_{24} = угиб измерен на 610 mm (24 inches) од центра оптерећене плоче

d_{36} = угиб измерен на 914 mm (36 inches) од центра оптерећене плоче

Када се рачуна A_{36} пречник оптерећене плоче мора да буде између 300 и 305 mm.

За флексибилне коловозне конструкције код којих је у односу на круте, радијус релативне крутости мањи, површина "AREA" дефлексионог базена:

$$A_{12}=2[2+3(d_8/d_0)+(d_{12}/d_0)] \quad (17.13)$$

где је:

A_{12} = површина "AREA" дефлексионог базена у првих 305 mm (12 inches)

d_0 = угиб измерен у центру плоче угибомера са падајућим теретом

d_8 = угиб измерен на 203 mm (8 inches) од центра оптерећене плоче

d_{12} = угиб измерен на 305 mm (12 inches) од центра оптерећене плоче

За асфалтне и бетонске коловозе рађена су истраживања релевантног AREA у смислу, шта се дешава ако сви слојеви вишеслојног еластичног система имају идентичну крутост или модул (и Поасонов коефицијент). Константовано је да вредност изабраног модула, ако су вредности модула слојева идентичне, $AREA_{36}$ за круте коловозе увек износи 11.04, а за флексибилне 6.85 ($AREA_{12}$).

Пошто E_0 представља и заједнички модул целокупне коловозне конструкције, он се с обзиром на контурне услове (круте и флексибилне коловозне конструкције) може прецизније изразити преко фактора AREA :

$$AF_{psc}=[(k_2-1) / (k_2-(AREA_{36}/k_1))]^{1.79} \quad (17.14)$$

где је:

AF_{psc} = фактор AREA, тј. побољшање у AREA са 11.04 на 1.79

k_1 = 11.04 (AREA када је крутост бетонског слоја иста као и нижих слојева)

k_2 = 3.262 (максимално могуће побољшање у AREA=36/11.037)

$$AF_{ac}=[(k_2-1) / (k_2-(AREA_{12}/k_1))]^{1.35} \quad (17.15)$$

где је:

AF_{ac} = фактор AREA, тј. побољшање у AREA на 1.79

k_1 = 6.85 (AREA када је крутост асфалтног слоја иста као и нижих слојева)

$k_2 = 1.752$ (максимално могуће побољшање у $AREA=12/6.85$)

Крутост или модул горњих слојева круте (бетонска плоча) и флексибилне (асфалтних слојева) коловозне конструкције је:

$$E_{pcc} = [E_0 \cdot AF_{pcc} \cdot k_3^{(1/AF_{pcc})}] / k_3^{2.38} \quad (17.16)$$

$$E_{ac} = [E_0 \cdot AF_{ac} \cdot k_3^{(1/AF_{ac})}] / k_3^2 \quad (17.17)$$

где је:

E_{pcc} = модул или крутост горњег бетонског (везаног) слоја- ева

E_{ac} = модул или крутост горњег асфалтног (везаног) слоја- ева

E_0 = као што је дефинисано у јед. 17.6

AF = као што је дефинисано у јед. 17.15 за асфалтне коловозе

k_3 = коефицијент односа дебљине горњег слоја / пречник оптерећене плоче = $x_1 / (2 a)$

a = пречник оптерећене плоче (угибомера)

Модул подлоге по Дорману и Меткалфу (Dorman and Metcalf - [14]) у функцији од дебљине невезаног слоја и модула постељице је:

$$E_{pod} = 0.2 h_2^{0.45} E_{pos} \quad (17.18)$$

где је:

E_{pod} = модул подлоге, МПа

h_2 = дебљина слоја подлоге, mm

E_{pos} = модул постељице, МПа

Код анализе угиба, а често и димензионисања круте коловозне конструкције, често се занемарује утицај међуслоја - тј. подлоге на носивост коловозне конструкције, јер су модул еластичности и носивост бетонске плоче у односу на подлогу испод ње значајно већи. Међутим, ако се узима у прорачун утицај подлоге на носивост бетонске плоче онда се често примењује поступак Казановича (Khazanovich - [15]).

За случај невезане подлоге, модул бетонске плоче је:

$$E_1 = \frac{h_1^3}{h_1^3 + \beta \cdot h_2^3} E_{pcc} \quad (17.19)$$

За случај везане подлоге, модул бетонске плоче је:

$$E_1 = \frac{h_1^3}{h_1^3 + \beta \cdot h_2^3 + 12 \cdot h_1 \left(x - \frac{h_1}{2}\right)^2 + 12 \cdot \beta \cdot h_2 \left(h_1 - x + \frac{h_2}{2}\right)^2} E_e \quad (17.20)$$

где је:

$$x = \frac{\frac{h_1^2}{2} + \beta \cdot h_2 \left(h_1 + \frac{h_2}{2} \right)}{h_1 + \beta \cdot h_2} \quad (17.21)$$

$$\beta = \frac{E_2}{E_1} \quad (17.22)$$

E_{pcc} = модул горњег бетонског слоја под претпоставком да нема утицаја подлоге

E_1 = модул горњег слоја, тј. бетонске плоче (модификован E_{pc})

E_2 = модул нижег слоја, тј. подлоге (или $E_{\text{под}}$)

h_1 = дебљина горњег слоја, тј. бетонске плоче

h_2 = дебљина нижег слоја, тј. подлоге

β = коефицијент односа модула слојева E_1 (бетонског) и E_2 (подлоге), табела 17.5

Табела 17.5 Коефицијенти односа модула слојева

ЛТРП код	Тип подлоге	Однос $\beta^* = 1 / \beta$
1	асфалт бетон	10
4	бетонски коловоз	1
321	стабилизација битуменом	50
333	стабилизација цементом	50
334	мршави бетон	2
15	рециклирани асфалтни материјал уграђен по хладном поступку	15
335	рециклирани бетон	100
292	дробљени агрегат	150
302	шљунак	200
306	песак	250

Треба истаћи да рачунски модули дају оквирну представу о еластичним карактеристикама слојева, а једино мерења на терену као нпр. поступак мерења угиба са падајућим теретом реалну представу.

Веза између дилатација и угиба по Молинару (Molenaar - [16]) и Гурпу (Gurp [17]) гласи:

$$\log \varepsilon_a = -1.06755 + 0.56178 \log h_1 + 0.03233 \log d_{1800} + 0.47462 \log SCI_{300} + 1.15612 \log BDI - 0.68266 \log BCI \quad (17.23)$$

$$\log \varepsilon_v = 2.93373 + 0.43358 \log d_{1800} + 0.61177 \log SCI_{300} - 0.90997 \log \sum h \quad (17.24)$$

где је:

ε_a = дилатација при затезању на дну асфалтног слоја ($\mu\text{m}/\text{m}$)

ε_v = дилатација при притиску на врху постељице ($\mu\text{m}/\text{m}$)

h_1 = дебљина асфалтног слоја (mm)

d_x = угиб измерен на растојању "h" (mm) од центра оптерећене плоче (μm)

$$SCI_{300} = d_0 - d_{300} \quad (\mu m)$$

$$BDI = d_{300} - d_{600} \quad (\mu m)$$

$$BCI = d_{600} - d_{900} \quad (\mu m)$$

$$\sum h = \text{дебљина коловоза (mm)}$$

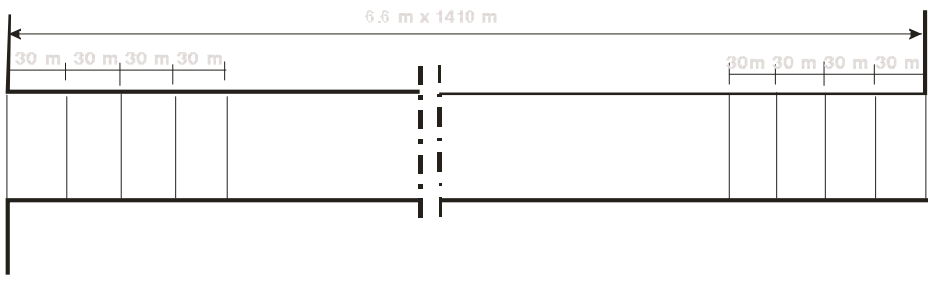
17.8 ОЦЕНА PCI, RCI ИТД

За успостављање Система за управљање коловозом (Pavement Management System - PMS) важно је познавање садашњег и могућност предвиђања будућег стања коловоза. Оцена садашњег стања коловоза заснива се на подацима, као што су: индекс стања коловоза (Pavement Condition Index - PCI), индекс удобности вожње (Riding Comfort Index - RCI), оцена стања коловоза (Pavement Condition Rating - PCR) итд.

17.8.1 PCI (Pavement Condition Index) - ИНДЕКС СТАЊА КОЛОВОЗА

Прорачун PCI се заснива на визуелном опажању типа, нивоа и количине оштећености (тј. степена оштећености коловоза), а треба да укаже на стање коловозне конструкције и услове за одвијање саобраћаја.

Деоница коловоза за коју треба да се одреди PCI дели се на контролне јединице - јединичне узорке, величине 225 m^2 плус или минус 100 m^2 , тј. дужине коловоза од 30 m и ширине 6.6 m (ове димензије су пожељне али не и обавезне).



Слика 17.9 Пример поделе асфалтног коловоза на јединичне узорке

Деонице коловоза које се снимају морају да буду јасно локацијски дефинисане на терену и мапама оштећења (због евентуалне контроле или допунских снимања).

Број јединичних узорака зависи од чињенице да ли се снимања раде за потребе управљања на нивоу мреже (планирање буџета) или на нивоу пројекта (конкретне саобраћајнице).

Снимање оштећења на нивоу пројекта

Минимални број “n” јединичних узорака за снимање на нивоу пројекта, одређује се на основу дијаграма приказаног на слици 17.10.

Дијаграм је конструисан на основу обрасца:

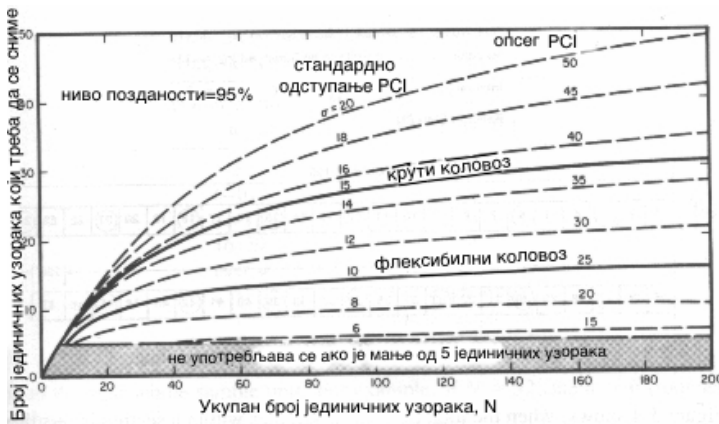
$$n = \frac{N \cdot s^2}{\frac{e^2}{4} \cdot (N - 1) + s^2} \quad (17.25)$$

где је:

N - укупан број јединичних узорака

e - дозвољена грешка у оцени PCI деонице (на дијаграму са слике 17.10 износи ± 5 тачака)

s - стандардно одступање PCI између јединичних узорака на посматраној деоници



Слика 17.10 Избор минималног броја јединичних узорака по Шахину (Shahin)

Стандардна девијација при првом прегледу флексибилних коловоза узима се да је 10 (или опсег PCI од 25), а крутих 15 (или опсег PCI од 35). На слици 17.10 види се, да ако је укупан број узорака у оквиру посматране деонице мањи од пет, препоручује се да се сниме сви јединични узорци.

На слици 17.11 је приказан пример избора јединичних узорака. Положај првог јединичног узорака није строго одређен, али се препоручује да међусобно растојање између њих буде једнако. Основни кораци при избору јединичних узорака су:

1. Интервал узорака “i” одређује се из односа $i = N/n$, где је “N” укупан број расположивих јединичних узорака, а “n” је минимални интервал јединичних узорака који треба да се сниме. Интервал узорака “i” се заокружује на мањи цео број (нпр. 3.6 се заокружује на 3)

2. Положај првог јединичног узорка узима се произвољно у оквиру положаја првог узорка и утврђеног интервала "i". На пример, ако је i=3, положај првог јединичног узорка је између бројева 1 и 3
3. Јединични узорци који ће се снимати, означавају се као s, s+i, s+2i итд. Ако је изабран почетак 3 и интервал узорака је 3, тада јединични узорци који треба да се снимају су 3, 6, 9, 12 итд.

Укупан број јединичних узорака на деоници је N=47. Минимални број узорака које треба снимити је n=13. Интервал је:

$$i = \frac{N}{n} = \frac{47}{13} = 3.6 = 3 \tag{17.26}$$

а, изабрани почетак је s=3



Слика 17.11 Пример избора узорака који треба да буду снимљени

Снимање оштећења на нивоу мреже

За потребе снимања на нивоу мреже, довољно је снимити само неколико јединичних узорака по деоници. У табели 17.6 приказани су критеријуми (најчешће коришћени) за одређивање броја једничних узорака за потребе снимања на нивоу мреже. Број узорака који ће бити снимљен "n" повећан је за 1 за свако повећање од 5 узорака на деоници "N", за "N"≤15. За вредности "N" између 16 и 40, вредност "n" је једнака 4. Када је вредност "N">40, ставља се да "n" износи 10% од "N" и заокружује на следећи цели број. На пример, ако је "N"=52, "n"=6 (заокружено од 5.2).

Табела 17.6 Пример критеријума за утврђивање броја узорака за снимање на нивоу мреже

Број јединичних узорака по деоници "N"	Број јединичних узорака који ће се снимити "n"
1 - 5	1
6 - 10	2
11 - 15	3
16 - 50	4
> 40	10%
	(заокружено на следећи цео број)

Поред табеле 17.6 може да се користи и табела 17.7, која се заснива на претходној једначини и претпоставци да је стандардно одступање "s", једнако дозвољеној грешци $e=5$ (овај избор нема теоријску подршку, већ чисто емпиријску). Из табеле 17.7 произилази веће "n" за $N<5$, док је у табели 17.6 веће "n" када је $N>40$.

Вредности у обе табеле су оријентационе и одговарају више путевима који су добро одржавани (развијеније земље).

Коначан број, локација и величина јединичних узорака које треба снимити, зависи пре свега од личног утиска (целу деоницу препешачити или прегледати при малој брзини кола) и жеље да се верно представи стање коловоза.

Табела 17.7 Број узорака на нивоу мреже

Број јединичних узорака по деоници "N"	Број јединичних узорака који ће бити снимљен "n"
1	1
2 - 4	2
5 - 20	3
> 20	4

Као што се види из табела 17.6 и 17.7 за ниво мреже, снима се од 10 до 20% од свих јединичних узорака.

Поступак оцене стања коловоза

После прегледа коловоза, успостављања јединичних узорака, регистрација оштећења у мапама оштећења и кодирања оштећења по методологији **Micro PAVER**, израчунава се PCI.

Унос оштећења препише се из теренских формулара (поглавље 1 оригинал приручника - обрасци од 1 до 7) [3] или директно унесе у формуларе приказане на сликама 17.12 и 17.13. Примери дијаграма за читавање губитака вредности и индукованог губитка вредности за флексибилне коловозе, приказани су на сликама од 17.18 до 17.22 (дијаграми су направљени према типу оштећења [3]), а за круте коловозе на сликама од 17.23 до 17.27 [3]. Сваки ред у формуларима садржи тип оштећења за одговарајући ниво оштећености. На пример, на слици 17.12 број 10 (подужне и попречне пукотине, малог нивоа оштећености) измерен је у дужним метрима, тако да 47 означава 47 m пукотина малог нивоа оштећености, итд. Сви подаци о оштећености користе се за израчунавање PCI јединичног узорака.

Прорачун PCI

После уноса података о стању оштећености коловоза у одговарајуће формуларе, приказане на сликама 17.12 и 17.13, приступа се ручном или аутоматском (помоћу рачунара) прорачуну PCI и то на основу индукованих

вредности (deduct value) - тежинских фактора који се крећу од 0 до 100 и представљају утицај сваког оштећења на стање коловоза. Индукована вредност 0 означава да констатовано оштећење не утиче на карактеристике коловоза, док вредност 100 означава изузетно озбиљно оштећење.

Прорачун PCI за асфалтне засторе

Основни кораци рада су:

1. корак: Одређивање индуковане вредности

У формулару на слици 17.12 у прву колону уноси се тип оштећења (шифра оштећења) и ниво оштећености. У наредним колонама се уноси величина оштећености, изражена у метрима, квадратним метрима или броју њеног појављивања. За сваки тип оштећења и ниво оштећености саберу се уписане вредности оштећења (m, m² или број) и унесу у колону "укупно", као што је приказано на слици 17.12. На пример у другом реду подужних или попречних пукотина (шифра 10) средњег нивоа (M) има 7 m и 9 m, тј. укупно (укупно) 16 m.

Подаци о стању асфалтних застора за јединични узорак				Скица:				
Одсек: R 12 Деоница: 801 Јединични узорак: 008 Снимио: М. М. Датум: 15.06.2004. Површина узорка: 180 m ²								
1. Пукотине од замора 2. Излучевине 3. Пукотине у облику блокова 4. Избочине и улегнућа 5. Жљебови 6. Улегнућа 7. Ивичне пукотине 8. Рефлектоване пукотине на спојницама 9. Слегање банкине				10. Подужне или попречне пукотине 11. Закрпе 12. Углачан агрегат 13. Рупе 14. Прелаз преко пруге 15. Колотрази 16. Набори 17. Клизајуће пукотине 18. Бубрење 19. Чупање зрна				
Тип оштећења	Количина				Укупно	Густина %	Индукована вредност	
10 L	10	20	17		47	26.1	14.5	
10 M	7	9			16	8.9	17.5	
1 L	53				53	29.4	46.5	
6 L	10	5			15	8.3	15.0	
15 L	20	45	10		75	41.7	30.5	
15 L	25				25	13.9	29.0	

Слика 17.12 Формулар за унос података о стању асфалтних застора у оквиру јединичног узорка

Подели се количина сваког типа оштећења, при сваком нивоу оштећености, са укупном површином јединичног узорка, а затим помножи са 100, да би се добио проценат густине по јединичном узорку за сваки тип оштећења и ниво оштећености.

Очитају се са дијаграма вредности, приказане за "индуковану вредност" за асфалт-бетон, за сваки тип оштећења и ниво оштећености.

Подаци о стању бетонских застора за јединични узорак				
Одсек: R 12		Деоница: В 03		Јединични узорак: 005
Снимио: Н.Н.		Датум: 15.06.2002.		Број плоча: 20
21. Експлозија 22. Угаоне пукотине 23. Подељене плоче 24. Дубоке пукотине 25. Слегање на попречним спојницама и пукотинама 26. Оштећење испуне спојница 27. Одвајање коловоза од банке 28. Линијске пукотине 29. Закрепе (велике) 30. Закрепе (мале)		31. Углачан агрегат 32. Чупање 33. Цурење и пумпање 34. Пробијен коловоз 35. Прелаз преко пруге 36. Љуспање 37. Скупљање 38. Круњење угла 39. Круњење спојница		Скица:
Тип оштећења	Ниво оштећености	Број плоча	Густина %	Индукована вредност
26	Н			8
22	L	2	10	9.5
22	M	1	5	9.0
23	L	3	15	15.5
23	M	3	15	30.0
36	L	1	5	1.5
39	L	3	15	3.5
39	M	1	5	2.0

Слика 17.13 Формулар за унос података о стању бетонских застора у оквиру јединичног узорка

Вредновање параметра PCI је следеће [11]:

0 - 10	10 - 25	25 - 40	40 - 55	55 - 70	70 - 85	85 - 100
не задовољава	веома лош	лош	просечан	добар	врло добар	одличан

2. корак: Одређивање максимално дозвољеног броја индукција (m)
- 2а. Ако је само једна (или ниједна) појединачна индукована вредност > 2 , онда се уместо максималне кориговане индуковане вредности (maximum corrected deduct value - CVD) представљене у кораку 4, користи збирна индукована вредност. Иначе следе корази 2б и 2ц
- 2б. Поређати појединачне индуковане вредности у опадајућем низу, као на пример, вредности са слике 17.12: 46.5, 30.5, 29.0, 17.5, 15.0 и 14.5
- 2ц. Одредити дозвољени број индукованих вредности, на основу формуле (слика 17.14):

$$m_i = 1 + \left(\frac{9}{98}\right)(100 - HDV_i) \quad (17.27)$$

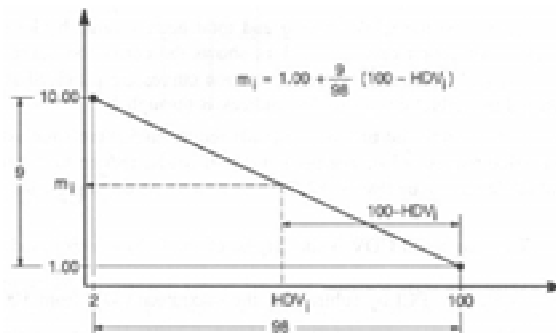
где је:

m_i - дозвољени број индуковања, укључујући и делове за јединични узорак и
 HDV_i - највећа индукована вредност за јединични узорак и

На пример, са слике 17.14:

$$m = 1 + (9/98)(100 - 46.5) = 5.91 \quad (17.28)$$

- 2д. Број појединачних индукованих вредности се смањује на m , укључујући и разломак. Ако је број индукованих вредности мањи од m , онда се узимају све индуковане вредности. На пример, на слици 17.14, све индуковане вредности се узимају у обзир, јер је њихов број мањи или једнак m .



Путеви и паркинзи

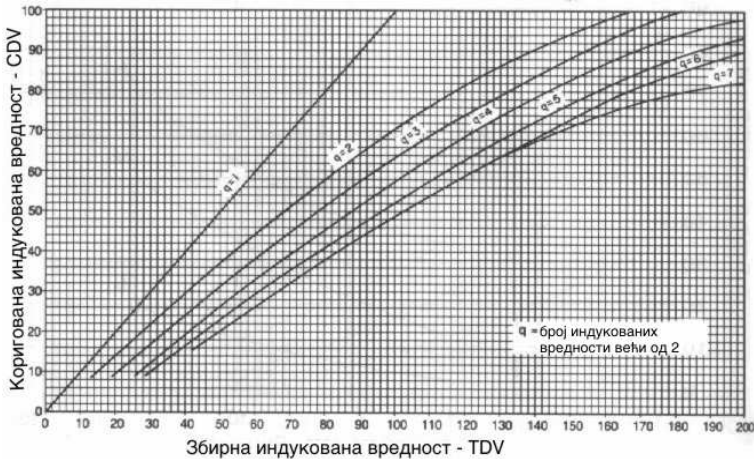
Слика 17.14. Одређивање максималног броја дозвољених индуковања (m)

3. корак: Одређивање максималне кориговане индуковане вредности (**CDV**)

Максимална **CDV** се одређује итеративно на следећи начин:

- 3а. Одредити број индукованих вредности које су > 2 . На пример, на сл. 17.12, $q = 6$.

- 3б. Одредити збир свих индукованих вредности. У датом примеру, збирна индукована вредност је 153.
- 3ц. Одредити **CDV** из q и збирне индуковане вредности, а на основу дијаграма на сл. 17.15.



Слика 17.15. Криве за корекцију индуковане вредности

- 3д. За путеве најмањи број индукованих вредности је 2. Ако је q једнако 1, треба поновити кораке од 3а до 3ц.

3е. Максимални **CDV** је већи од највећег одређеног **CDV**.

4. корак: Израчунати PCI одузимањем максималног CDV од 100

На слици 17.16 приказан је збирни преглед прорачуна PCI за асфалтни застор и део података приказаних на слици 17.12.

Број	Индуковане вредности						Σ	q	CDV
1	46.5	30.5	29.0	17.5	15	14.5	153.0	6	76
2	46.5	20.0	15.0	15.0	12.0	15.0	123.5	6	62
3	46.5	25.0	17.0	16.0	14.0	13.0	131.5	6	66
4	46.5	26.0	18.0	17.0	15.0	14.0	136.5	6	70
5									

Асфалтни застор, $m = 5.91 < 6$

$$PCI = 100 - 76 = 24$$

Слика 17.16. Пример прорачуна PCI за четири јединичне узорка

Прорачун PCI за бетонске засторе

1. корак: **Одређивање индукованих вредности**

- 1а. За сваку комбинацију типа оштећења и нивоа оштећености, наводи се број плоча, на којима су она заступљена. На пример, на слици 17.13 у другом реду стоји да се угаоне пукотине малог нивоа оштећености налазе на две плоче
- 1б. Подели се број плоча из 1а са укупним бројем плоча, који се налази у оквиру јединичног узорка, а затим помножи са 100, да би се добио проценат густине по јединичном узорку за сваку комбинацију нивоа и типа оштећења
- 1ц. Одреди се индиковане вредности за све комбинације типа оштећења и нивоа оштећености, уз помоћ кривих за индукцију

2. корак: **Одређивање максимално дозвољеног броја индуковања (m)**

Овај корак је идентичан као и код асфалтних застора. На пример, на слици 17.13, налази се осам индукованих вредности. Дозвољени број индуковања је $m=7.4$. Корекција на дозвољени број индуковања се ради на тај начин, што се узима од осам индукованих вредности, најмања индукована вредност, а она је 1.5 и од ње се узима 40%. Практично она се множи са 0.4 и смањује због тога на 0.6. (HDV=30, а срачунато $m=7.4$).

Број	Индиковане вредности									Σ	q	CDV
1	30	15.5	9.5	9	8	3.5	2	0.6*		78.1	7	40
2	30	15.5	9.5	9	8	3.0	2	0.6*		77.6	7	39
3	30	15.5	9.5	9	8	2	2	0.6*		76.6	7	38
4	30	15.5	9.5	9	5	2	2	0.6*		73.6	7	36
5	30	12	9.5	7	5	2	2	0.6*		68.1	7	33
6	30	8	7	6	5	2	2	0.6*		60.6	7	29
7	30	6	5	5	5	2	2	0.6*		50.6	7	23
8												
9												
10												

Бетонски застор $m=7.4$

* $0.6 = (0.4) \times \text{најмања индукована вредност} = (0.4) \times 1.5$

$$PCI = 100 - 40 = 60$$

Слика 17.17. Пример прорачуна PCI за седам јединичних узорака

3. корак: **Одређивање максимално кориговане индуковане вредности (CDV)**

Поступак одређивања максималног **CDV** је идентичан као и за асфалтне засторе, осим што се користи одговарајући дијаграм за бетонске засторе.

4. корак: **Израчунавање PCI одузимањем максималног CDV од 100**

На слици 17.17 је приказан збирни преглед прорачуна **PCI** за бетонски коловоз за део података приказаних на слици 17.13.

Прорачун **PCI** за деоницу

PCI целе деонице добија се као просечна вредност **PCI**-а јединичних узорака, који се налазе у разматраној деоници. Ако из неког разлога дође до увећања броја јединичних узорака, односно додатних испитивања, онда мора да се користи тежинска средња вредност (односно да већу тежину има податак са мањим одступањима од средње вредности).

Тежинска средња вредност може да се израчуна из формуле:

$$PCI_s = \frac{(N - A)PCI_r + APCI_a}{N} \quad (17.29)$$

где је:

PCI_s - **PCI** деонице коловоза

PCI_r - просечан **PCI** добијен из јединичних узорака који су изабрани насумице или као репрезентативни

PCI_a - просечан **PCI** додатних узорака

N - укупан број узорака на деоници

A - број додатних испитаних узорака

На пример, ако на деоници од 13 јединичних узорака, пет насумице изабраних јединичних узорака имају PCI_s 56, 72, 65, 69 и 61 и два додатна јединична узорка имају PCS_s 41 и 39, **PCI** деонице износи:

$$PCI_r = (56 + 72 + 65 + 69 + 61) / 5 = 64.6$$

$$PCI_a = (42 + 39) / 2 = 40.5$$

$$PCI_s = ((13 - 2)(64.6) + (2)(40.5)) / 13 = 61$$

Одређивање количине оштећења за деоницу коловоза

Приликом инспекције коловоза и одређивања узорака, веома често је потребно да се екстраполира количина или густина оштећења на посматраној деоници, да би била одређена укупна количина оштећења по деоници. Ако су сви јединични узорци изабрани као случајне величине

(поглавље Снимање оштећења на нивоу пројекта), екстраполација количине датог оштећења за дати ниво оштећености, може се одредити као у примеру за мрежасте пукотине средњег нивоа оштећености:

- тип застора: асфалтни
- површина: 2200 m²
- укупан број јединичних узорака на деоници: 10
- пет јединичних узорака је снимљено као случајно и количина мрежастих пукотина средњег нивоа оштећености износи:

Идентификациони број јединичног узорка	Површина јединичног узорка, (m ²)	Мрежасте пукотине средњег нивоа оштећености, (m ²)
02	225	9
04	225	18
06	225	13.5
08	225	4.5
10	180	9
Укупно	1080	54

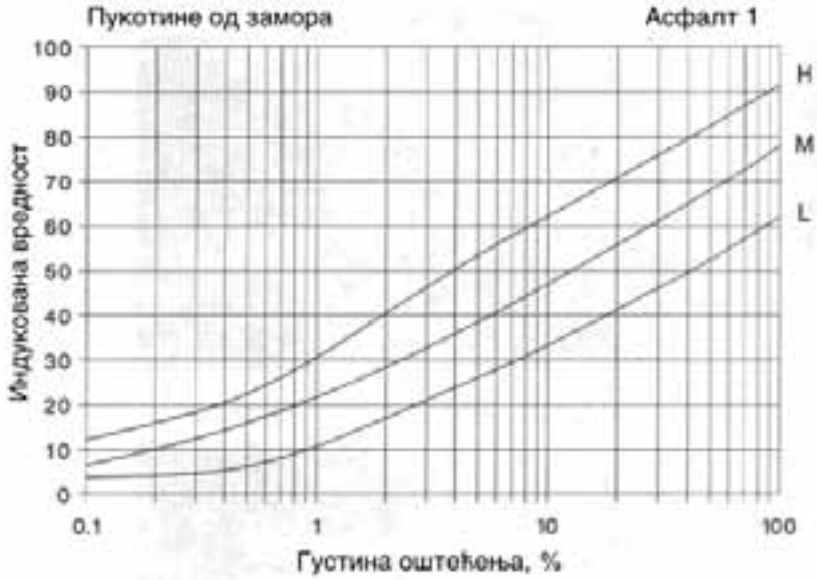
Просечна густина за мрежасте пукотине средњег нивоа оштећености износи $54:180 = 0.05$. Екстраполирана количина се добија множењем густине са површином деонице (тј. $0.05 \times 2200 = 110 \text{ m}^2$).

Ако се укључе додатни јединични узорци, поступак екстраполације се незнатно мења. Ако претпоставимо у претходном примеру да је јединични узорак 01 снимљен додатно и да се мрежасте пукотине средњег нивоа оштећености распростраиру на:

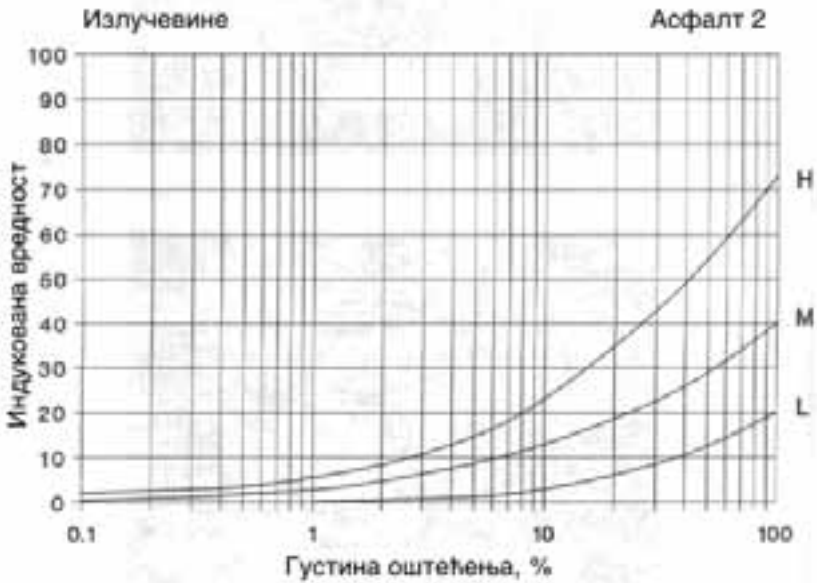
Идентификациони број јединичног узорка	Површина јединичног узорка, (m ²)	Мрежасте пукотине средњег нивоа оштећености, (m ²)
01	225	90
Укупно	225	90

Како су 225 m² снимљени додатно, величина деонице се коригује на површину $2200-225=1975 \text{ m}^2$. Екстраполована количина оштећења добија се множењем густине оштећења са површином деонице и сабирањем са износом додатног оштећења. У овом примеру екстраполована количина оштећења износи $(0.05 \times 1975) + 90 = 189 \text{ m}^2$.

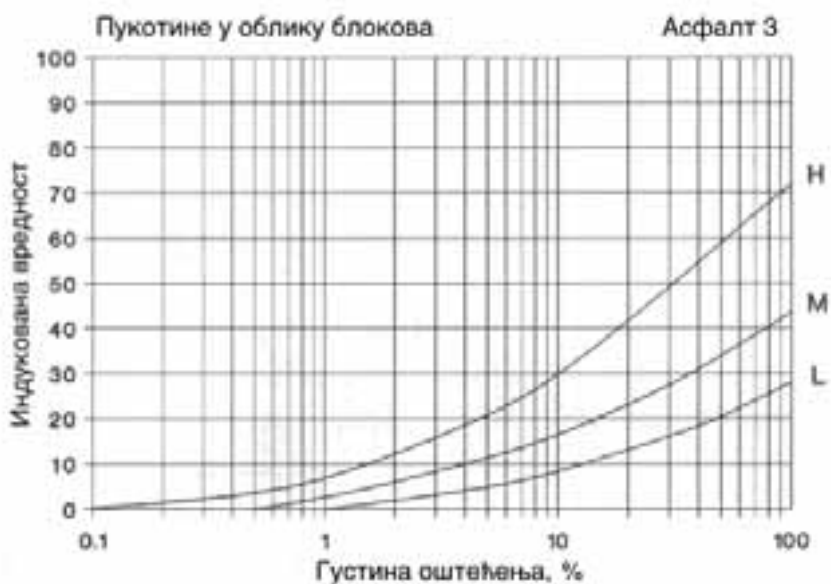
Дијаграми за читавање индукованих вредности оштећења [3]



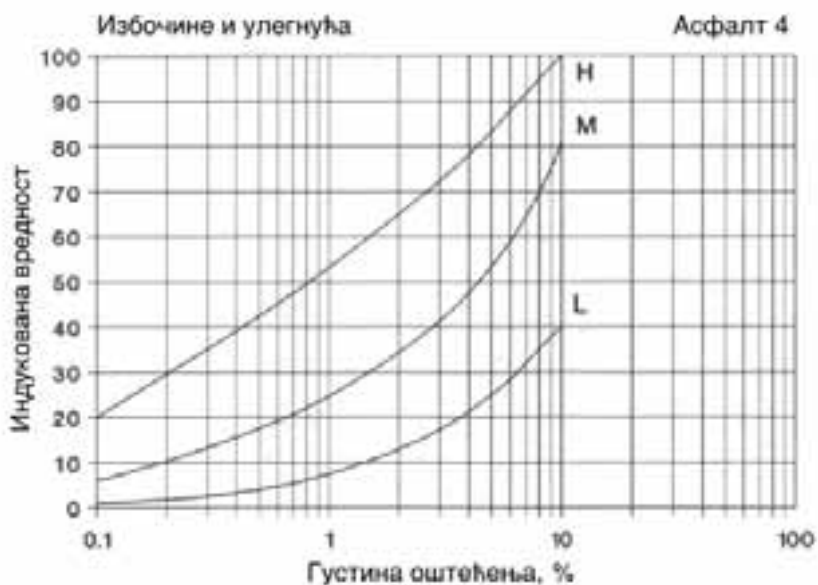
Слика 17.18. Пукотине од замора



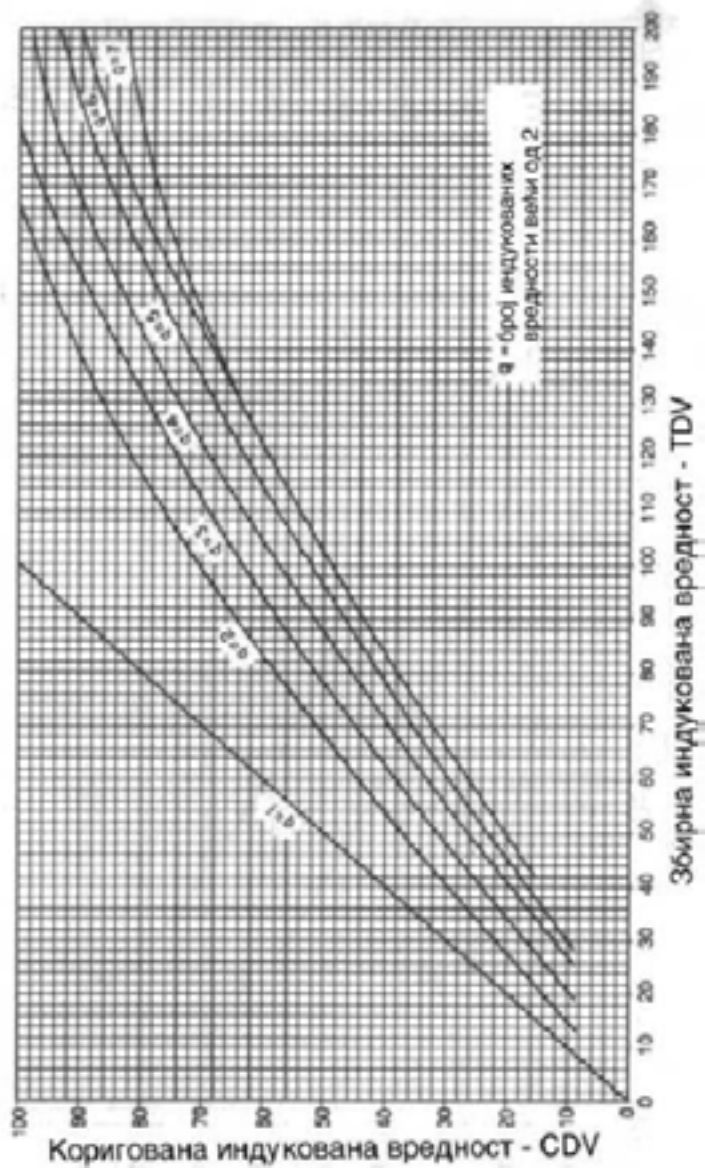
Слика 17.19. Излучевине



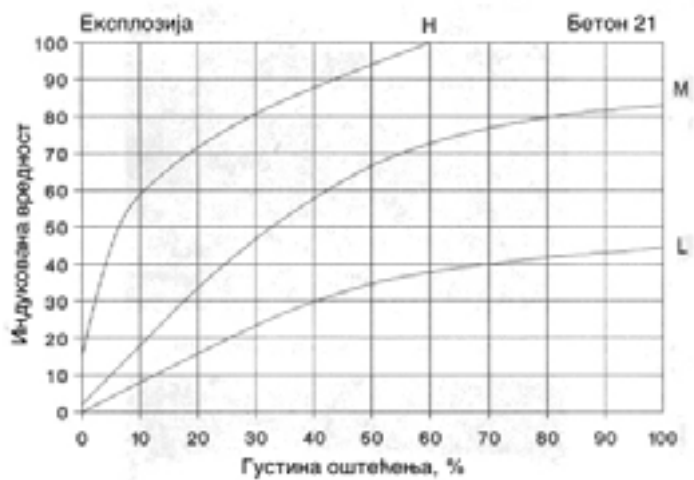
Слика 17.20. Пукотине у облику блокова



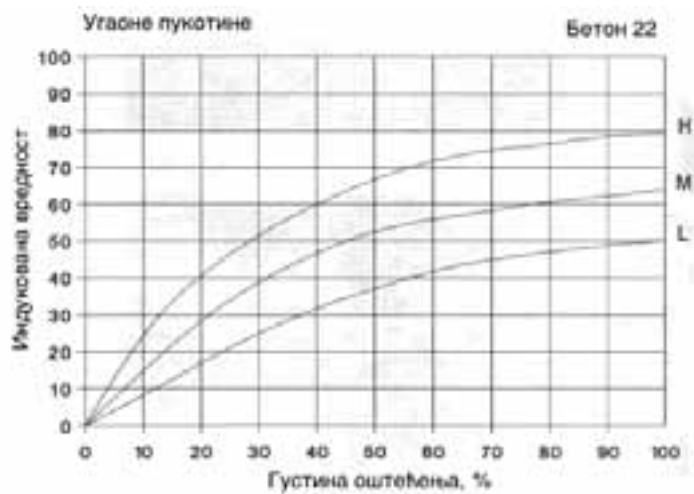
Слика 17.21. Избочине и улегнућа



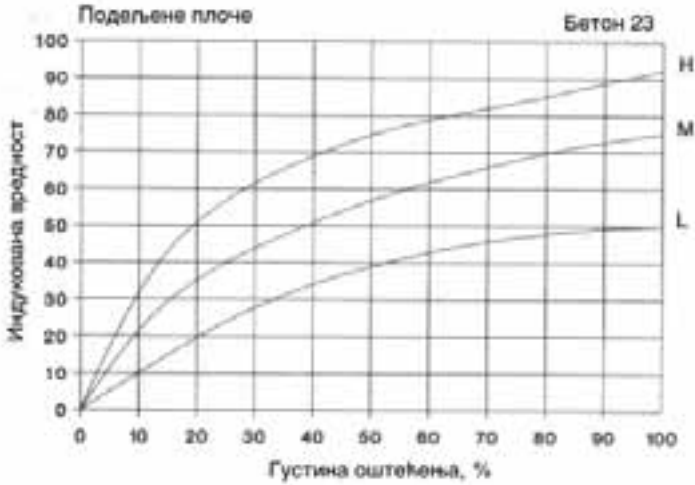
Слика 17.22. Криве за корекцију индукованих вредности



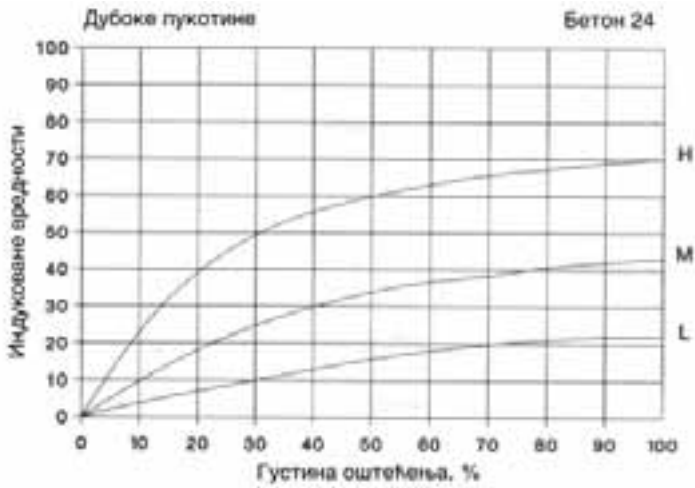
Слика 17.23. Експлозија



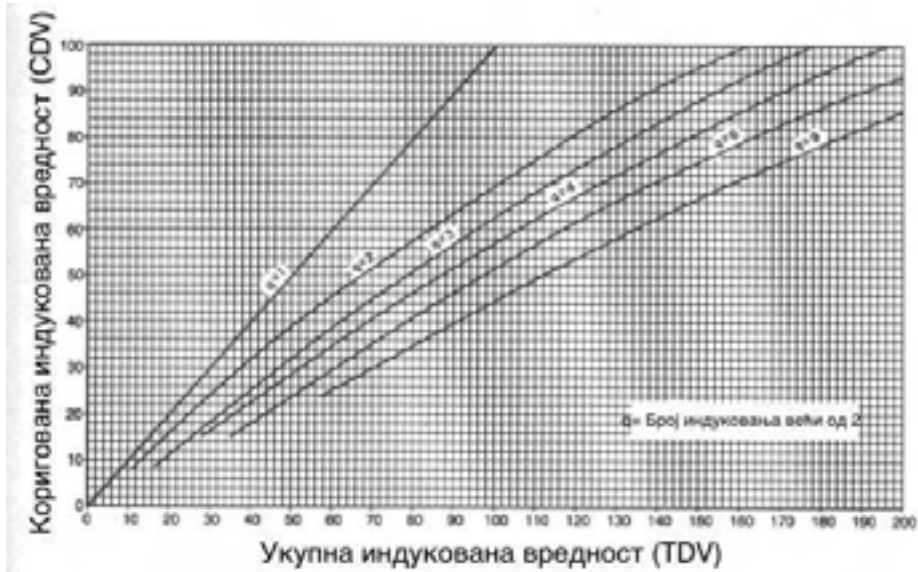
Слика 17.24. Угаоне пукотине



Слика 17.25. Подељене плоче



Слика 17.26. Дубоке пукотине



Слика 17.27. Корекција индукованих вредности за бетонске коловозе

17.8.2 RCI (Riding Comfort Index) - ИНДЕКС УДОБНОСТИ ВОЖЊЕ

Овај тип оцене стања коловозне конструкције је изразито регресионог карактера и може бити примењен после дугогодишњег сакупљања података. Овај поступак је примењен у Канади (покрајна Алберта). Сакупљани су подаци 25 година - равност, оштећење коловозне површине, саобраћајно оптерећење, дефлексије и други фактори. Статистичком обрадом података ових променљивих величина и одређивањем корелације дошло се до закључка да најбољу корелацију за RCI (вредности на скали од 1 до 10) дају подаци о RCI у било којој години и временски период AGE изражен у годинама.

Формула је следећег облика [8]:

$$RCI = -5.998 + 6.870 \cdot \ln_e(RCI_\beta) - 0.162 \cdot \ln_e(AGE^2 + 1) + 0.185 \cdot AGE - 0.084 \cdot AGE \cdot \ln_e(RCI_\beta) - 0.093 \cdot \Delta AGE \quad (17.30)$$

где је:

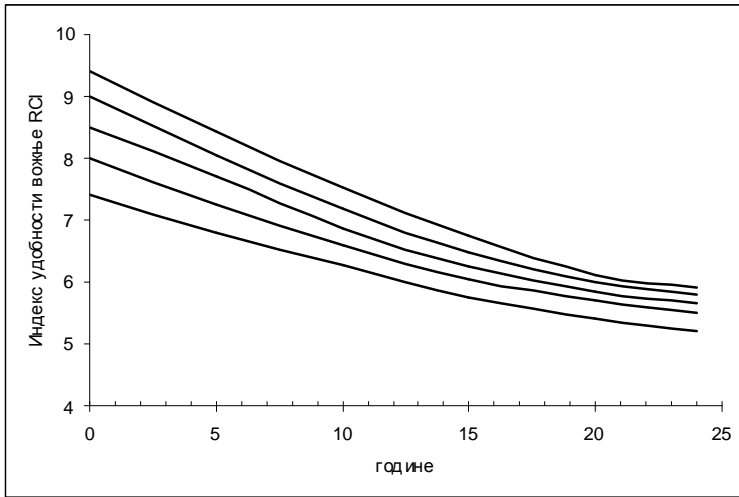
RCI - индекс удобности вожње (креће се од 1 до 10) у било којој години

RCI_β - индекс удобности вожње у претходном периоду

AGE - временски период изражен у годинама

ΔAGE - временски период изражен у годинама (за горњу једначину је 4, а може бити 1, 2, 3, 4 итд. година)

За горе наведену једначину коефицијент корелације је $P=0.91$, односно $P^2=0.84$, а стандардно одступање износи 0.38.



Слика 17.28. Индекс удобности вожње

17.8.3 PCR (Pavement Condition Rating) - ОЦЕНА СТАЊА КОЛОВОЗА

На сличан начин, регресионим поступком развијеним у држави Вашингтон, дугорочним посматрањем карактеристика коловоза и формирањем базе података дошло се до једначине [9]:

$$PCR = C - m \cdot A^p \quad (17.31)$$

где је:

PCR - оцена стања коловоза (скала од 0 до 100)

C = 100

m - коефицијент положаја линије

A - старост коловоза у годинама

p - константа облика линије

У табели 17.8 су приказани препоручљиви примери кривих линија за различите типове коловозних конструкција.

Овај поступак се показао као одличан приступ за креирање модела система за управљање коловозом. Примењена је техника вероватноће заснована на процесу Маркова. Стање елемента је дефинисано условима мерења. За коловозе, услови мерења укључују равност или употребљивост коловоза, индекс стања коловоза или проценат површинских пукотина и резултат опита проклизавања SN - број клизања (Skid number). За потребе нумеричке обраде података, стање елемента је дефинисано у зависности од нивоа и услова мерења.

Табела 17.8. Препоручљиве једначине за прорачун PCR-а

Тип коловозне конструкције / тип застора	Број анализираних јединица	Одговарајућа једначина*	Године за PCR=40
Нова или реконструисана / површинска обрада	2	$PCR=100-0.086*AGE^{2.50}$	13.7
Нова или реконструисана / асфалтни бетон	26	$PCR=100-0.22*AGE^{2.00}$	16.5
Нови или реконструисан / бетонски коловоз	19	$PCR=100-0.85*AGE^{1.25}$	30.1
Пресвлачење / површинска обрада преко асфалтног бетона	5	$PCR=100-8.50*AGE^{1.25}$	4.8
Пресвлачење / површинска обрада преко површинске обраде	6	$PCR=100-3.42*AGE^{1.50}$	6.8
Пресвлачење / ојачање асфалтним бетоном < 3.0 cm	75	$PCR=100-0.58*AGE^{2.00}$	10.2
Пресвлачење / ојачање асфалтним бетоном (од 3.0 до 6.0 cm)	126	$PCR=100-0.76*AGE^{1.75}$	21.1
Пресвлачење / ојачање асфалтним бетоном > 6.0 cm	19	$PCR=100-0.54*AGE^{1.75}$	14.8

* - односи се на државу Вашингтон (слична климатска зона)

AGE - године

Табела 17.9. Вредновање оштећења узорка по моделу Маркова

Равност коловоза	Оштећење застора, проценти површина под пукотинама		
	0 - 3	3 - 7	> 7
0 - 40	1	4	7
41 - 90	2	5	8
> 90	3	6	9

У табели 17.9 приказано је девет различитих услова стања узорка, по методу који је развио Марков, а на основу два услова мерења узорка и сваки у три нивоа. На пример стање узорка 5 одговара условима стања са средњим пукотинама и нивоом равности.

Табела 17.10. Матрица вероватноћа по моделу Маркова

Почетно стање	Стање у будућности								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0.90	0.04	0.02	0.03	0.01	0	0	0	0
2	0.01	0.90	0.03	0	0.05	0.01	0	0	0
3	0	0.01	0.92	0	0.01	0.03	0	0.01	0.02
4	0	0	0	0.92	0.05	0.02	0	0.01	0
5	0	0	0	0.01	0.94	0.03	0.01	0.01	0
6	0	0	0	0	0.01	0.94	0	0.01	0.04
7	0	0	0	0	0.02	0	0.95	0.02	0.01
8	0	0	0	0	0	0	0.01	0.96	0.03
9	0	0	0	0	0	0.01	0	0.01	0.98

У матрици вероватноћа је дефинисана вероватноћа да ће коловоз, који има своје карактеристике на почетку експлоатације, имати неке карактеристике и у будућности. У табели 17.10 је приказан пример матрице вероватноћа за девет услова стања коловоза који су дефинисани у табели 17.9.

ЛИТЕРАТУРА:

- [1] Maintenance Manual, M 51-01, March 2002, Washington State Department of Transportation, Maintenance & Operations
- [2] Др Александар Цветановић, дипл.грађ.инж, Коловозне Конструкције, Научна Књига, Београд 1992.
- [3] Др Александар Цветановић, дипл.грађ.инж, Упутство за идентификацију оштећења на коловозним конструкцијама, Друштво за путеве Србије VIA-VITA, Београд 2002.
- [4] Др Александар Цветановић, дипл.грађ.инж, Одржавање путева, Београд 1993.
- [5] Halstead W, Criteria for Use of Asphalt Friction Surfaces, NCHRP104, Transportation Research Board, Washington 1983.
- [6] Dr Khaled Ksaibati and Shahriar Al Mahmood, Utilizing the Long-Term Pavement Performance Database in Evaluating the Effectiveness of Pavement Smoothness, Department of Civil and Architectural Engineering The University of Wyoming, Laramie, Wyoming 82071-3295, March 2002.
- [7] Ralph Haas, W. Ronald Hudson, John Zaniewski, Modern Pavement Management, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida 1994.
- [8] Karan, M.A., T.S. Christinson, A. Cheetham and G. Berdahl, Development and Implementation of Alberta's Pavement Information and Needs System, Transportation Research Board Research record 938, 1983.
- [9] Jackson N. and J. Mahoney, Washington State Pavement Management System, Federal Hwy. Admin. Text for Advanced Course on Pavement Management, Nov. 1990.

- [10] Michael W. Sayers and Steven M. Karamihas, *The Little Book of Profiling, Basic Information about Measuring and Interpreting Road Profiles*, Spetember 1998.
- [11] Shahin M.Y., and S.D.Kohn, *Development of Pavement Condition Rating Procedures for Roads, Streets and Parking Lots Ђ Volume I Condition Rating Procedure*, Technical Report M-268, Constructions Engineering Research Laboratory, United States Corps of Engineers, 1979.
- [12] Von Quintus H. L. and Simpson, *Back-Calculation of Layer Parameters for LTPP Test Sections, Volume II, Layered Elastic Analysis for Flexible and Rigid Pavements*, Report no. FHWA-RD-01-113, 2002.
- [13] Richard N. Stubstad, *LTPP Data Analysis: Feasibility of Using FWD Deflection Data to Characterize Pavement Construction Quality*, NCHRP Web Document 52 (Project 20-50(9)), 2002.
- [14] *Guidelines for Review and Evaluation of Backcalculation Results*, Final Report, Chapter 2. *Development of Forwardcalculation Methodology*, February 2006 Publication No. FHWA-HRT-05-152
- [15] Khazanovich Tayabji and Darter, *Backcalculation of Layer Parameters for Long Term Pavement Performance (LTPP) Test Section, Volume 1: Slab and Elastic Solid and Slab on Dense Liquid Foundation Analysis of Rigid Pavements*, FHWA-RD-00-086, Washington, DC, FHWA, 2001.
- [16] Molenaar, A., *Structural performance and design of flexible pavements and asphalt concrete overlays*, PhD Thesis, Delft University of Technology, Delft, 1983.
- [17] Van Gurp C., *Characterisation of seasonal influences on asphalt pavements with the use of falling weight deflectometers*, PhD, Delft University of Technology, Delft, 1995.

Izdavač

AKADEMSKA MISAO

Bul. kralja Aleksandra 73, Beograd
tel./fax: (+381 11) 3218 354

office@akademska-misao.co.yu

www.akademska-misao.co.yu

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

CIP

625.8(075.8)

Цветановић, Александар

Коловозне конструкције / Александар
Цветановић, Боривоје Банић. Београд :
Академска мисао, 2007 (Београд : Супер
принт). 389 стр. : илустр. ; 24 cm

Тираж 500. - Библиографија уз свако
поглавље.

ISBN 978-86-7466-292-2

1. Банић, Боривоје

а) Путеви - Коловоз - Пројектовање
COBISS.SR-ID 140368396



ISBN 86-7466-272-2



www.akademska-misao.co.yu