

Коловозне конструкције за екстра тешка оптерећења на терминалима за мултимодални саобраћај

Александар Грујић¹, Стефан Стојиловић¹, Владимир Вослар¹

¹ Саобраћајни институт ЦИП

ПОДАЦИ О РАДУ

DOI: 10.31075/PIS.70.02.05
Стручни рад
Примљен: 22.04.2024.
Прихваћен: 10.05.2024.
Кореспондент аутор:
aleksandargrujic93@gmail.com

ORCID ID

Александар Грујић: N.A.
Стефан Стојиловић: N.A.
Владимир Вослар: N.A.

Кључне речи

Heavy Duty Pavements
Reach Stacker
Контејнерски терминал

РЕЗИМЕ

Предмет овог рада је кратак увид у неке од начина димензионисања коловозне конструкције на контејнерским терминалима који се најчешће налазе у лукама и у оквиру теретних железничких станица, а за оптерећења проузрокована дејством веома тешких возила (Heavy Duty Pavements). У оквиру овог рада дат је осврт на методе димензионисања цемент бетонских коловозних конструкција за нестандартна осовинска оптерећења, као и на резултате добијене применом ових метода.

1. Увод

Мултимодални транспорт подразумева употребу најмање две различите гране саобраћаја за транспорт робе у контејнерима стандардних димензија.

Контејнери се бродовима или железницом допремају до терминала, где се врши њихов претовар и даљи транспорт железничком или друмском инфраструктуром до крајњег одређишта.

Коловозне конструкције контејнерских терминала се знатно разликују од путних коловозних конструкција. Коловозне конструкције контејнерских терминала предвиђене су за саобраћај возила великих тежина, доста већих од оних која се могу наћи на путевима. Њихово оптерећење се простире до знатно веће дубине у односу на стандардна теретна возила. Самим тим неопходно је да ове коловозне конструкције имају већу дебљину од класичних, како би биле у могућности да прихвате и пренесу оптерећење без штетних последица по коловозну конструкцију и труп пута. Из претходног се намеће да методе које се користе за димензионисање коловозне конструкције на путевима нису адекватно решење за ове површине.

Постоји више „приручника“ који прописују начин димензионисања коловозних конструкција овог типа, од којих су најпознатији:

- „ROM 4.1-94, Guidelines for the design and construction of port pavements“ издат од стране државног лучког одбора државе Шпаније 1994. године.
- „Richtline 800 06, Netzinfrastruktur Technik entwerfen; Bauliche Anlagen des Kombinierten Verkehrs“ издат од стране „Deutsche Bahn Gruppe“ 2004. године.
- „The structural design of heavy duty pavements for ports and other industries“ издат од стране удружења „Interpave“ 2007. године.

Поред поменутих приручника, за потребе димензионисања коловозне конструкције за нестандартна осовинска оптерећења, у широкој примени већ дуги низ година је метода „Picket & Ray“. Ова метода се највише примењује при димензионисању коловозних конструкција на аеродромима.

У свету су тренутно у примени софтвери који се базирају на методи коначних елемената. Један од таквих софтвера је и „Tower“, који се већ дуги низ година користи и у нашој земљи. Програм није замишљен и дизајниран за димензионисање крутих коловозних конструкција, међутим може се применити и у ту сврху. Иако постоје различите опције у погледу врсте материјала у застору коловозне конструкције, у овом раду акценат је стављен на коловозне конструкције са застором од неармираног бетона.

2. Коловозна конструкција на контејнерским терминалима

Коловозне конструкције на контејнерским терминалима се могу разликовати од објекта до објекта, а у зависности од дефинисаних утицајних параметара. У данашње време, са развојем ове врсте транспорта, порастао је број потенцијалних решења коловозне конструкције које задовољавају исте утицајне параметре. Усвојено решење за одређени терминал може имати веће иницијалне трошкове, док ће трошкови одржавања бити мањи кроз време. Са друге стране иницијални трошкови могу бити мањи док ће трошкови одржавања бити већи. У зависности од конкретних услова, треба анализирати могућа решења и усвојити оптимално.

Модерни терминали најчешће захтевају велику површину за складиштење и манипулисање контејнерима. Трошкови израде коловозне конструкције на једној таквој површини могу изнети и до 25% укупне инвестиције за изградњу контејнерског терминала.

Коловозне конструкције контејнерских терминала последњих деценија добијају на значају из следећих разлога:

- нови терминали заузимају све већу површину, услед глобалног раста контејнерског транспорта;
- повећање тежине терета који се транспортује;
- већи избор возила за манипулисање контејнерима,
- повећање трошкова изградње коловозних конструкција (услед потребе за квалитетнијим решењима и квалитетнијим материјалима);
- претходна искуства у вези брзине пада нивоа услужности током експлоатације постојећих коловозних конструкција на површинама сличне намене;
- већи избор материјала за израду слојева коловозне конструкције.

Првобитно димензионисање оваквих типова коловозних конструкција базирало се на методама које су се користиле код аутопутева. Недостатак оваквог приступа је чињеница да се димензионисање код аутопутева базира на броју стандардних осовина од 80 kN, 100 kN или 120 kN, у зависности од државе до државе.



Слика 1. Изглед једног модерног контејнерског терминала (Интернационални контејнерски терминал у Манили)
Извор: <http://portwings.in/international-container-terminal-services-posts-record-productivity/>

Коловозне конструкције у лукама и осталим објектима овог типа димензионишу се тако да могу да поднесу много већа осовинска оптерећења. Осовинска оптерећења од преко 1000 kN (преко 100t) нису неуобичајна. Возила која изазивају оваква оптерећења крећу се много спорије и самим тим праве веће утицаје на коловозну конструкцију.

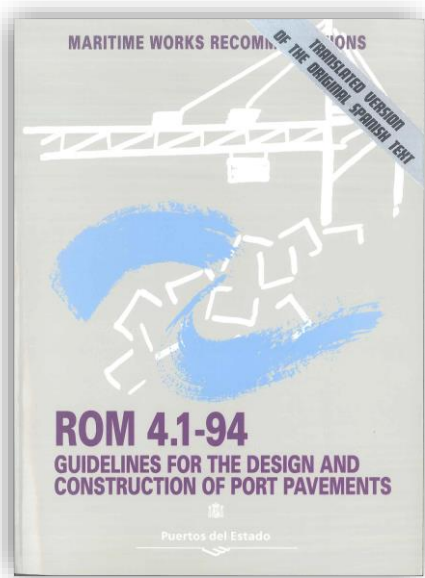
Коловозне конрукције за екстра тешко оптерећење изложене су динамичком утицају механизације која манипулише контејнерима и статичком утицају изазваном приликом привременог складиштења контејнера.

3. Приручници за димензионисање коловозне конструкције

У оквиру овог поглавља дат је преглед претходно поменутих приручника који се користе за димензионисање коловозних конструкција за осовинска оптерећења вишеструко већа од стандардног.

Приручник „ROM 4.1-94, Guidelines for the design and construction of port pavements“, саставни је део документа „Recommendations for Maritime Works – ROM (Препорука за поморске радове)“, који је донесен на иницијативу Шпаније.

Програм је покренут 1987. године формирањем техничке комисије, којој је додељен задатак да успостави темељ будуће регулативе у овом пољу инжењерства. Примарни задатак ове комисије је био формирање смерница које би пружале потребне информације пројектантима, надзорним инжењерима, извођачима радова, као и инвеститорима при реализацији различитих пројеката у овој области.



Слика 2. Насловна страна шпанског приручника
Извор: [https://www.puertos.es/es-s/BibliotecaV2/ROM%204.1-94%20\(EN\).pdf](https://www.puertos.es/es-s/BibliotecaV2/ROM%204.1-94%20(EN).pdf)

Приручник дефинише неколико модела коловозних конструкција за екстра тешка саобраћајна оптерећења у зависности од врсте материјала у застору. Применом овог приручника пројектант на основу утицајних параметара везаних за квалитет материјала у подтлу и интезитет саобраћаја, дефинише потребну дебљину слоја постелице, дебљину невезаног носећег слоја, односно дебљину застора (у овом случају дебљина бетонске плоче). Саветује се одабир адекватне коловозне конструкције на основу економске анализе више варијантних решења, при чему треба обратити пажњу како на трошкове градње, тако и на трошкове одржавања.

Приручник „Richtline 800 06, Netzinfrastruktur Technik entwerfen; Bauliche Anlagen des Kombinierten Verkehrs“ је приручник графичког типа.

Приручник дефинише саобраћајну, радну и површину за складиштење, где за сваку од њих дефинише структуру коловозне конструкције са одговарајућим дебљинама слојева.

Генерално, предложена решења коловозне конструкције састоје се из следећих слојева:

	Цемент-бетонска плоча
	Цементна стабилизација
	Невезани материјал
	Природно тло

По правилу, немачки приручник предвиђа слој цементне стабилизације као подлогу испод цемент бетонске плоче.

За одређивање дебљине слоја од невезаног материјала, користе се подаци из табеле 1, (поглавље 800.0612), који дефинишу осетљивост

материјала у природном тлу на мраз. Осетљивост на мраз дефинисана је класама F1, F2 и F3. Након што се одреди класа материјала из природног тла, на основу ње се дефинише дебљина слоја за заштиту од мрза.

Такође, у оквиру приручника дата је могућност прецизнијег дефинисања дебљине слоја цементне стабилизације помоћу дијаграма, а у зависности од планираног оптерећења површине у току експлоатације.

У прилогу овог приручника постоји дијаграм који за предложено решење структуре коловозне конструкције дефинише типове возила чији је саобраћај допуштен, без угрожавања стабилности коловозне конструкције.

Британски приручник, „The structural design of heavy duty pavements for ports and other industries“, издат од стране „Interpave“ удружења, акценат ставља на коловозне конструкције са зазором од префабрикованих бетонских елемената. Тренутно је актуелно четврто издање овог приручника (објављено 2007. године).

Приручник фаворизује застор од префабрикованих бетонских елемената, али се може применити и за прорачун дебљине цемент бетонске плоче у застору коловозне конструкције.



Слика 3. Насловна страна британског приручника
Извор: http://www.paving.org.uk/documents/heavy_duty_pavements.pdf

Димензионисање коловозне конструкције путем овог приручника врши се помоћу дијаграма.

Дијаграми су проистекли као резултат димензионисања коловозне конструкције применом методе коначних елемената.

Постоје две врсте дијаграма. Применом првог дијаграма одређује се дебљина основног слоја који је по правилу цементна стабилизација - (Cement Bound Granular Mixture - CBGM) класе C8/10. Дебљина основног слоја се одређује у зависности од оптерећења еквивалентног тачка (Single Equivalent Wheel Load - SEWL) који изазива максималне напоне затезања у основном слоју и прогнозираног броја прелаза меродавног возила.

Помоћу другог дијаграма могуће је дефинисати дебљину основног слоја, у зависности од статичког оптерећења контејнера. Слој дефинисан као „основни слој“ у оквиру овог приручника представља носећи слој коловозне конструкције и сачињен је од цементне стабилизације (CBGM) класе C8/10.

Приручник нуди могућност да се материјал од кога је сачињен основни слој може заменити (делимично или у целости) неким другим материјалом, применом фактора еквиваленције (Material Equivalence Factor - MEF), при чему долази до промене дебљине носећег слоја. Приручник садржи табелу са широким избором алтернативних материјала и одговарајућим факторима еквиваленције.

Највећа предност примене овог приручника је широк спектар могућих решења коловозних конструкција за различите улазне параметре. Ово је резултат континуалног рада на приручнику, с обзиром да је доживео неколико издања.

4. Анализа меродавног оптерећења за димензионисање коловозне конструкције на контејнерским терминалима

У оквиру контејнерских терминала саобраћај различити типови механизације. Њихово ослањање на подлогу и пренос оптерећења врши се преко пнеуматика, односно преко шина. Један од најчешћих типова возила који се среће на контејнерским терминалима је „Reach Stacker“. Ово возило је у највећем броју случајева усвојено као меродавно возило за димензионисање коловозне конструкције.

„Reach Stacker“ представља утоваривач код кога је хватаљка за контејнер монтирана на телескопској руци. Телескопска рука омогућава прихватање контејнера са горње стране. Применом ове технологије возилу је омогућен приступ контејнерима позиционираним како у другом или трећем реду, тако и контејнерима на различитим висинама.



Слика 4. Приказ возила типа „Reach stacker“,
Извор: www.kalmarglobal.com

Предња осовина предметног утоваривача има четири пнеуматика, два са једне и два са друге стране осовине. Ова осовина због своје функције прихвата највећи део оптерећења и из тог разлога су предвиђена четири пнеуматика за пренос оптерећења на подлогу.

Задња осовина преузима мањи део оптерећења и она има по један пнеуматик на крајевима. На основу претходно наведеног може се закључити да је управо предња осовина та која прави највећи утицај на коловозну конструкцију и као таква се усваја као меродавна за димензионисање коловозне конструкције.

Просечна укупна тежина оптерећеног „Reach Stacker“ - а код новијих модела готово увек прелази 100 t. Преко предње осовине се на подлогу преноси око 80% укупне тежине оптерећеног „Reach Stacker“ - а, док остатак од око 20% преноси задња осовина.

„Reach stacker“ је доминантан у употреби на мањим и терминалима средње величине. Ово возило се користи за манипулацију са пуним и празним контејнерима. Возило је постало доминантно у употреби на терминалима због својих оперативних могућности, флексибилности и изузетних могућности слагања контејнера.

Возило одликује веома брз транспорт контејнера на кратким растојањима, као и слагање контејнера на различите висине. Слагање контејнера се може вршити у више редова, односно не само у првом реду, непосредно испред возила.

По неким проценама оптерећење испод тачка „Reach Stackera“ који преноси контејнер, простира се и до 4 m дубине, мерено од површине коловозне конструкције.

5. Избор метода за димензионисање коловозне конструкције

У оквиру овог рада за исте улазне параметре одређена је дебљина бетонске плоче у застору круте коловозне конструкције применом различитих метода димензионисања.

Дебљина бетонске плоче у застору, одређена је:

- применом методе „Picket & Ray“,
- применом софтвера „Tower“,
- применом приручника: „The structural design of heavy duty pavements for ports and other industries“, који је издао „Interpave“.

У оквиру поглавља 3 описан је принцип димензионисања применом приручника: „The structural design of heavy duty pavements for ports and other industries“, који је издао „Interpave“.

Метода „Picket & Ray“ се заснива на утицајним дијаграмима за моменат савијања и угиб, за два положаја оптерећења и то у унутрашњости и на ивици плоче. Потребно је прочитати број утицајних поља са дијаграма у одређеној размери, на основу чега се рачунају напон и угиб. Као што је већ поменуто, дијаграми су своју највећу примену нашли при димензионисању круте коловозне конструкције на аеродромима.

Ова оптерећења спадају у нестандартна, па се с обзиром на претходно наведено доноси закључак да се овај принцип димензионисања може применити и код димензионисања коловозне конструкције контејнерских терминала. Предност ове методе је релативно лака примена. Недостатак ове методе се огледа у томе што је метода прилично стара и у неку руку превазиђена. Такође, велика је вероватноћа прављења грешке приликом коришћења дијаграма.

„Tower“ представља софтвер за статистичку и динамичку анализу површинских и просторних конструкција. Применом методе коначних елемената, геометрија прорачунског модела се дефинише у оквиру програма исцртавањем контура конструктивних елемената и дефинисањем оптерећења.

6. Примери резултата димензионисања коловозне конструкције

Прорачун коловозне конструкције урађен је за следеће улазне параметре:

- Природно тло сачињава муљевита глина чија носивост изражена преко калифорнијског индекса носивости износи: $CBR = 2\%$,
- Дубина продирања мрза износи приближно 1m,
- Саобраћајно оптерећење: Подаци о „Reach Stacker“-у потребни за димензионисање коловозне конструкције дати су у табели 1.

Табела 1. Подаци о „Reach Stacker“-у

Модел возила	Terex PPM TFC 45
Маса празног возила:	67,6 t
Притисак у пнеуматичима:	0,75 МПа
Максимална маса предње оптерећене осовине:	97,2 t
Максимална маса задње оптерећене осовине:	24,3 t

Приликом прорачуна максималног осовинског оптерећења усвојено је да меродавно возило манипулише стандардним контејнером од 12,2 m (40 стопа). Меродавна осовина за димензионисање је предња осовина.

Дебљина неvezаних носећих слојева коловозне конструкције димензионисана је на основу података о вредностима физичко-механичких параметара материјала у подтлу. У подлози застора од цемент бетонских плоча захтева се постизање носивости $E_{v2} \geq 120$ МПа. Претходно наведено важи за димензионисање по методи „Picket & Ray“ и димензионисање применом софтвера „Tower“, док британски приручник има табелу помоћу које се на основу вредности CBR-а дефинише дебљина слоја постелице и дебљина слоја од неvezаног материјала испод цемент бетонске плоче.

У следећој табели приказане су вредности срачунатих напона у доњем влакну цемент-бетонске плоче у застору коловозне конструкције, за положај оптерећења у средини плоче, у углу плоче и на ивици плоче. Напони у бетонској плочи срачунати су применом методе „Picket & Ray“, а за исту коловозну конструкцију је извршена провера напона применом софтвера „Tower“.

Табела 2. Вредности срачунатих напона бетонске плоче применом методе „Picket & Ray“ и применом софтвера „Tower“

Положај оптерећења	Метода	
	Tower	Picket & Ray
середина плоче	2,51 МПа	3,15 МПа
угао плоче	1,63 МПа	/
ивица плоче	3,56 МПа	4,84 МПа

Решење коловозне конструкције димензионисане применом методе „Picket & Ray“, састоји се из следећих слојева:

d = 46 cm	ЦБ плоча класе C35/45
d = 15 cm	ДКА 0/31,5 mm
d = 25 cm	ДКА 0/63 mm
d = 70 cm	Posteljica: DKA 0/63mm
Природно тло	

Како су добијени напони мањи од граничне вредности за дозвољени напон у бетонској плочи (5 МПа), могуће је извршити оптимизацију дебљине бетонске плоче.

С обзиром на то, извршен је нови прорачун применом софтвера „Tower“, овога пута са дебљином цемент-бетонске плоче од 40 см. Добијени резултати су приказани у табели 3.

Табела 3. Вредности срачунатих напона бетонске плоче применом софтвера „Tower“

Положај оптерећења	Tower
середина плоче	3,82 МПа
угао плоче	2,12 МПа
ивица плоче	4,98 МПа

Решење коловозне конструкције димензионисане применом софтвера „Tower“, састоји се из следећих слојева:

	d = 40 cm	ЦБ плоча класе С35/45
	d = 15 cm	ДКА 0/31,5 mm
	d = 25 cm	ДКА 0/63 mm
	d = 70 cm	Постељица: ДКА 0/63mm
	Природно тло	

Поред претходно извршеног димензионисања коловозне конструкције применом методе „Picket & Ray“, као и применом софтвера „Tower“, за исте улазне параметре извршено је димензионисање коловозне конструкције применом приручника: „The structural design of heavy duty pavements for ports and other industries“, који је издао „Interpave“. Применом овог приручника, добијено је пројектно решење коловозне конструкције које се састоји из следећих слојева:

	d = 40 cm	ЦБ плоча класе С35/45
	d = 15 cm	ДКА 0/31,5 mm
	d = 60 cm	Постељица: ДКА 0/63mm
	Prirodno tlo	

Најоптималније решење коловозне конструкције добија се димензионисањем према британском приручнику. Дебљина цемент-бетонске плоче према поменутом приручнику је за 13% мања од дебљине добијене применом методе „Picket & Ray“, а идентична је дебљини плоче добијене применом софтвера „Tower“. Применом британског приручника срачуната дебљина независних носећих слојева је за око 32% мања од дебљине носећих слојева димензионисаних применом методе „Picket & Ray“ и применом софтвера „Tower“.

7. Закључак

Димензионисање коловозне конструкције на контејнерским терминалима представља посебан случај и као таквом му треба посветити додатну пажњу.

Постоје конвенционалне методе које би могле да се примене за димензионисање таквих коловоза, међутим поставља се питање колико су исте адекватне, с обзиром на време њиховог настанка као и на тадашња сазнања из ове области.

Поред конвенционалних, постоје и новије методе, које су адекватније и оријентисане управо на коловозне конструкције на контејнерским терминалима. Поузданост, односно трајност решења коловозних конструкција добијених применом новијих метода димензионисања, већ су се доказале у пракси у свету.

Метода коначних елемената представља модернији приступ димензионисању коловозне конструкције и до данас је развијено више софтвера који су базирани управо на овој методи.

Анализирајући решења коловозне конструкције применом различитих поступака димензионисања, може се закључити:

- метода „Picket & Ray“ даје прилично конзервативне резултате, то јест срачуната дебљина цемент-бетонске плоче је изузетно велика;
- прорачуном напона у цемент бетонској плочи применом софтвера „Tower“ добијају се мањи напони, а самим тим добија се и мања дебљина бетонске плоче, у односу на ону димензионисану методом „Picket & Ray“;
- дебљина плоче одређена применом методе удружења „Interpave“ је идентична као и она добијена софтвером „Tower“, али је дебљина независног дробљеног каменог материјала испод плоче мање укупне дебљине у односу на решење које је добијено софтвером „Tower“;

На основу свега претходно наведеног може се закључити да се димензионисање коловозне конструкције за изузетно велика саобраћајна оптерећења применом упутства удружења „Interpave“ и софтвера „Tower“ приближно поклапају у погледу дебљине коловозне конструкције. Овој тврдњи иде у прилог и то што се оба поступка базирају на методи коначних елемената.

Поступци димензионисања базирани на методи коначних елемената дају мању дебљину коловозне конструкције од методе „Picket & Ray“, која се углавном користила за овакав типа коловоза.

Основни бенефит коришћења Британског приручника, „The structural design of heavy duty pavements for ports and other industries“, који је издало удружење „Interpave“, огледа се у лакоћи примене. Иако је приручник заснован на методи коначних елемената, није потребно користити никакав софтвер, јер је приручник конципиран као скуп дијаграма и табела, преко којих се долази до потребне дебљине бетонске плоче. Приручник се може наћи бесплатно на интернету, а за примену овог поступка, као што је већ речено, само је потребно пратити дијаграме и упутства из приручника. Његовом применом се добија коректна дебљина бетонске плоче, што је потврђено и резултатима прорачуна у софтверу „Tower“.

Аутори рада предлажу примену приручника као брз и једноставан а довољно поуздан метод за одређивање димензија цемент - бетонских коловозних плоча великих дебљина.

У циљу даљег унапређивања процеса димензионисања коловозних конструкција за нестандартна оптерећења, од великог значаја би било праћење стања изведених коловозних конструкција димензионисаних применом британског приручника у току експлоатације. На овај начин би се стекао увид у меродавност коришћене методе.

Литература

- [1] Meletiou, Marios and Knapton, John. (1987-1990). *Container terminal pavement management*. Geneva: UNCTAD, 2 vol. UNCTAD monographs on port management
- [2] ROM 4.1-94 (1994). Guidelines for the Design and Construction of Port Pavements (Puertos del Estado, Spain)
- [3] Deutsche Bahn Gruppe (2004). *Netzinfrastruktur Technik entwerfen; Bauliche Anlagen des Kombinierten Verkehrs*
- [4] John Knapton (2007). Fourth Edition of the British Ports Association *Heavy Duty Pavement Design Manual*
- [5] Reach Stacker (https://en.wikipedia.org/wiki/Reach_stackler)

Pavement structures for extra heavy loads at multimodal traffic terminals

Aleksandar Grujić M.Sc.Civ.Eng.

Institute of Transportation CIP

Stefan Stojilović M.Sc.Civ.Eng.

Institute of Transportation CIP

Vladimir Voslar Grad.Civ.Eng.

Institute of Transportation CIP

Abstract: The subject matter of this study entails a brief overview of some of the methods for dimensioning pavement structures at container terminals, primarily located within ports and within freight rail stations, designed to withstand the loads imposed by very heavy vehicles (Heavy Duty Pavements). Within this study, an examination is provided on the methods for dimensioning cement concrete pavement structures for non-standard axle loads, as well as the results obtained through the application of these methods.

Keywords: Heavy Duty Pavements, Reach Stacker, Container terminal, Picket & Ray, Tower, Manual