



УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ
ФАКУЛТЕТ ЗА МАШИНСТВО И
ГРАЂЕВИНАРСТВО У КРАЉЕВУ

Виолета В. Ђорђевић

**РАЗВОЈ МОДЕЛА ОДЛУЧИВАЊА У
ПРОЦЕСУ КОНФИГУРИСАЊА
МОДУЛАРНИХ ЗВУЧНИХ БАРИЈЕРА**

докторска дисертација

Краљево, 2024



UNIVERSITY OF KRAGUJEVAC
FACULTY OF MECHANICAL AND CIVIL
ENGINEERING IN KRALJEVO

Violeta V. Đorđević

**DEVELOPMENT OF A DECISION-MAKING
MODEL IN THE MODULAR SOUND
BARRIERS CONFIGURATION PROCESS**

Doctoral Dissertation

Kraljevo, 2024

Аутор	
Име и презиме: Виолета Ђорђевић	
Датум и место рођења: 17. септембар 1975. године, Крушевац	
Садашње запослење: Асистент, Академија струковних студија Шумадија, Одсек Трстеник	
Докторска дисертација	
Наслов: Развој модела одлучивања у процесу конфигурисања модуларних звучних баријера	
Број страница: 235	
Број слика: 215	
Број библиографских података: 158	
Установа и место где је рад израђен: Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву	
Научна област (УДК): Производно машинство (621.7); Теорија одлучивања (519.816); Оптимизациони модели (519.863); Развој производа (001.892)	
Ментор: др Милан Коларевић, редовни професор, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву Универзитета у Крагујевцу	
Број и датум одлуке Већа универзитета о прихватању теме докторске дисертације: IV-04-864/8 од 16.11.2022. године	

Захвалност

Ова докторска дисертација представља резултат вишегодишњег образовања, научног и стручног усавршавања и урађена је на Катедри за производно машинство, Факултета за машинство и грађевинарство у Краљеву, Универзитета у Крагујевцу.

Највећу захвалност дугујем свом ментору, проф. др Милану Коларевићу, на великој помоћи и подршци, важним сугестијама и саветима током израде ове дисертације. Велико хвала за изузетно залагање и посвећену пажњу у свим фазама израде ове дисертације.

Захваљујем се и свим члановима Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације: проф. др Зорану Анишићу, проф. др Бранку Радичевићу и проф. др Владану Грковићу на издвојеном времену и корисним сугестијама, који су допринели квалитету ове дисертације.

На крају, желим да се захвалим и својој породици на стрпљењу, подршци и разумевању током израде ове дисертације.

Резиме

Комунална бука је важан проблем са којим се човек суочава последњих деценија и који, у великој мери, утиче на животну средину и здравље људи. Уз све већи индустријски развој, изградњу нових саобраћајница, повећан број превозних средстава и све већу примену разних уређаја у комуналној средини, долази до последица у виду буке, која доводи до поремећаја сна, па и до озбиљног нарушавања здравља људи.

Негативни утицај буке се не односи само на слух човека, већ утиче и на целокупно човеково здравље. Проблем „загађења буком“ је веома важан проблем, који утиче на целокупну животну средину и са еколошког и са здравственог становишта, и захтева предузимање одређених мера које треба да доведу до смањења нивоа буке у животној и радној средини.

Када је у питању бука у друмском саобраћају, неопходно је применити мере контроле буке на путевима којима се преноси звук од извора буке до пријемника, односно, објекта на које та бука утиче. Смањење нивоа буке на путевима простирања се врши применом: баријера (препрека), тунела, природних препрека (земљани насипи) и комбинацијом наведених начина.

Звучне препреке (акустички екрани, баријере за заштиту од буке) редукују ниво буке на задовољавајући ниво спречавањем простирања звучних таласа. Саобраћајне звучне баријере (СЗБ) могу бити рефлектујуће и апсорпционе. Слабљење нивоа буке применом рефлектујућих баријера се креће у опсегу 10-15 dB(A), а применом апсорпционих баријера још додатних 5 dB(A).

У овој дисертацији је развијен модел за подршку одлучивању у процесу избора оптималне конфигурације саобраћајних звучних баријера, заснован на примени метода вишекритеријумске анализе. Конфигурација баријере је заснована на принципима модларне градње како би комбинацијом модула и њихових геометријских и функционалних параметара било могуће обезбедити варијабилност по питању величине и облика баријере, могућности промене оријентације у простору, прилагођавање конфигурацији терена и могућности комбиновања са засадом, декоративним елементима и сл.

Модел омогућава да се из фонда расположивих модула конфигурише СЗБ која ће, за конкретне услове, на оптималан начин задовољити акустичке и неакустичке захтеве и која се истовремено уклапа у постојеће окружење како би била прихваћена од стране локалне заједнице.

Модел је заснован на методама вишекритеријумске оптимизације који дефинишу критеријуме (циљеве) одлучивања, поступак генерисања алтернатива, односно, могућих конфигурација баријера и предлог метода за оцену и рангирање алтернатива.

Понуђена конфигурација омогућава инвеститору да за конкретне услове сваке деонице пута одабере најквалитетнију варијанту која ће уједно бити и економски најисплативија, а предложена методологија произвођачима баријера обезбеђује јасна правила на основу којих могу градити своју конкурентност на тржишту СЗБ.

Кључне речи: модуларне саобраћајне звучне баријере, вишекритеријумско одлучивање, модел одлучивања, конфигурисање производа, fuzzy АНР метода, PROMETHEE metode, MODIPROM метода.

Abstract

Communal noise is an important problem that humans have been facing in recent decades and which, to a large extent, affects the environment and human health. With increasing industrial development, construction of new roads, an increased number of vehicles and increasing use of various devices in the communal environment, there are consequences in the form of noise, which leads to sleep disturbances, and even to serious damage to people's health.

The negative impact of noise does not only affect a person's hearing, but also affects a person's overall health. The problem of "noise pollution" is a very important problem, which affects the entire environment both from an ecological and a health standpoint, and requires taking certain measures that should lead to a reduction in the level of noise in living and working environments.

When it comes to noise in road traffic, it is necessary to apply noise control measures on the roads that transmit sound from the source of the noise to the receiver, that is, the objects that are affected by that noise. Reducing the noise level on roads is done by applying: barriers, tunnels, natural barriers (earth bunds, mounds or berms) and a combination of the aforementioned.

Sound barriers (acoustic screens, barriers for noise protection) reduce the noise level to a satisfactory level by preventing the propagation of sound waves. Traffic sound barriers (SZB) can be reflective and absorptive. Attenuation of the noise level with the use of reflective barriers is in the range of 10-15 dB(A), and with the use of absorption barriers an additional 5 dB(A).

In this dissertation, a decision support model was developed in the process of choosing the optimal configuration of traffic sound barriers, based on the application of multi-criteria analysis methods. The configuration of the barrier is based on the principles of modular construction so that by combining the modules and their geometric and functional parameters, it is possible to ensure variability in terms of the size and shape of the barrier, the possibility of changing the orientation in space, adaptation to the configuration of the terrain and the possibility of combining it with planting, decorative elements, etc.

The model makes it possible to configure a SZB from the pool of available modules which, for specific conditions, will optimally satisfy acoustic and non-acoustic requirements and which also fits into the existing environment in order to be accepted by the local community.

The model is based on multi-criteria optimization methods that define decision-making criteria (goals), the procedure for generating alternatives, i.e. possible configurations of barriers, and proposed methods for evaluating and ranking alternatives.

The offered configuration allows the investor to choose the best quality variant for the specific conditions of each section of the road, which will also be the most economically profitable, and the proposed methodology provides clear rules to barrier manufacturers on the basis of which they can build their competitiveness on the SZB market.

Keywords: modular traffic sound barriers, multi-criteria decision-making, decision-making model, product configuration, fuzzy AHP method, PROMETHEE methods, MODIPROM method.

Садржај

1. УВОД	1
1.1. Општа разматрања	2
1.2. Предмет докторске дисертације	4
1.3. Циљеви истраживања	4
1.4. Основне хипотезе	5
1.5. Методе истраживања	5
1.6. Приказ по поглављима	6
2. БУКА ДРУМСКОГ САОБРАЋАЈА - ПРЕГЛЕД СТАЊА	8
2.1. Комунална бука	9
2.1.1 Извори комуналне буке	10
2.1.2 Типови извора буке	11
2.1.2.1 Тачкасти извор буке	12
2.1.2.2 Линијски извор буке	14
2.1.3 Контрола буке	16
2.2. Смањење нивоа буке применом баријера	18
2.2.1 Теорија баријера	19
2.2.2 Положај баријера	20
2.2.3 Дужина баријера	21
2.2.4 Рефлексија од баријере	22
2.2.5 Параметри који утичу на ефикасност баријере	23
2.2.6 Прорачун слабљења од баријере	25
2.3. Модели за прогнозу буке друмског саобраћаја	27
2.3.1 Модели за прогнозу буке	27
2.3.2 Алгоритми	29
2.3.3 Стандарди за прогнозу друмског саобраћаја	31
2.3.4 Слабљење нивоа буке при простирању	33
2.3.4.1 Корекција за утицај дивергенције таласа и апсорпције ваздуха	33
2.3.4.2 Корекција за утицај апсорпције терена и метеоролошких утицаја	33
2.3.4.3 Корекција за утицај зелених густих засада	34
2.3.4.4 Корекција за утицај рефлексије	34
2.4. Оцена нивоа буке	35
2.4.1 Оцена на основу спектралног садржаја нивоа буке	35

2.4.2	Оцена на основу укупног нивоа буке.....	36
3.	АНАЛИЗА САВРЕМЕНИХ РЕШЕЊА САОБРАЋАЈНИХ ЗВУЧНИХ БАРИЈЕРА.....	39
3.1.	Типови баријера према начину дејства	40
3.1.1	Апсорпционе баријере	40
3.1.2	Рефлексионе баријере.....	41
3.1.3	Баријере са акустичким резонаторима	42
3.1.4	Комбиноване баријере	43
3.2.	Типови баријера према облику	44
3.2.1	Земљани насипи и бедеми.....	44
3.2.2	Звучни зидови (акустички екрани).....	45
3.2.2.1	Звучни зидови постављени на земљу.....	45
3.2.2.1.1	Звучни зидови од стубова и панела.....	47
3.2.2.1.2	Звучни зидови зидани од цигле/блокова	47
3.2.2.1.3	Самостални (слободностојећи) зидови	48
3.2.2.1.4	Директно укопани панели	49
3.2.2.1.5	Зид који се користи за парцијално задржавање земље	50
3.2.2.1.6	Зидови изливени од бетона на локацији пројекта.....	50
3.2.2.2	Звучни зидови постављени на носећу структуру.....	51
3.2.2.2.1	Звучни зидови на мостовима	51
3.2.2.2.2	Звучни зидови на потпорним зидовима	53
3.2.3	Комбиноване баријере	54
3.2.3.1	Комбинација земљаних насипа и звучних зидова	55
3.2.3.2	Комбинација звучних зидова са вегетацијом.....	55
3.2.3.3	Комбинација апсорпционог и транспарентног зида.....	56
3.2.3.4	Баријере са соларним панелима	56
3.2.4	Тунели.....	57
3.2.5	Звучне баријере интегрисане у постојеће објекте	58
3.2.5.1	Провидни зидови (фасаде)	59
3.2.5.2	Конзоле	59
3.2.5.3	Објекти као баријере	60
3.2.6	Специјални облици.....	60
3.2.6.1	Степенасти (цик-цак) панели.....	61
3.2.6.2	Конзолни облици	61
3.2.6.3	Специјални облици од комплексних профила	62
3.2.6.4	Специјални цевни апсорбери.....	62

3.2.6.5 Специјални облици са додатним елементима	63
3.2.7 Привремене звучне баријере	63
3.2.7.1 Самостојеће баријере са стопама или ослонцима	64
3.2.7.2 Модуларни панели монтирани на бетонски профил	65
3.2.7.3 Лаки мобилни панели.....	65
3.2.7.4 Лаки мобилни панели са точковима	66
3.3. Додатни објекти саобраћајних звучних баријера.....	66
3.3.1 Покривне капе (врхови баријере)	67
3.3.1.1 Звучни резонатори.....	68
3.3.1.2 Цевасти апсорбери	68
3.3.1.3 Дифракционе капе.....	69
3.3.1.4 Комерцијални облици на тржишту.....	70
3.3.1.5 Уређаји за пасивну фазну сметњу	70
3.3.1.6 Уређаји за активну контролу буке.....	70
3.3.2 Отвори за хитне случајеве	71
3.3.3 Дренажни отвори	72
3.3.4 Додатни елементи причвршћени на звучне зидове	74
3.3.5 Заштита баријере од оштећења услед саобраћаја.....	75
3.3.6 Вертикални ослонци за биљке пењачице.....	76
3.3.7 Акустички апсорбери звука.....	76
3.3.8 Заштитне капе за стубове	77
3.4. Материјали за звучне баријере	78
3.4.1 Бетон	78
3.4.2 Цигле и блокови за зидање.....	79
3.4.3 Метали.....	80
3.4.4 Дрво.....	81
3.4.5 Трска, слама, плетено пруже	81
3.4.6 Транспарентни материјали	82
3.4.7 Пластика.....	83
3.4.8 Структуре обликоване на 3D принтерима	84
3.4.9 Рециклирани материјали.....	84
3.4.9.1 Рециклирана гума.....	85
3.4.9.2 Рециклирана пластика.....	86
3.4.10 Композитни материјали.....	86
3.5. Површински третмани	87

3.5.1	Текстура.....	87
3.5.2	Боја	94
3.5.3	Графити	94
3.5.4	Заштитни премази.....	96
4.	КОНФИГУРИСАЊЕ МОДУЛАРНИХ САОБРАЋАЈНИХ ЗВУЧНИХ БАРИЈЕРА	98
4.1.	Пројектовање заштите од буке на путевима.....	98
4.1.1	Процес пројектовања заштите од буке на путевима	99
4.1.2	Методe заштите од буке на путевима.....	100
4.1.3	Реализација техничких мера за заштиту од буке на путевима.....	101
4.2.	Морфологија саобраћајне звучне баријере.....	104
4.2.1	Темељ/ослонци баријере	104
4.2.2	Зид баријере	105
4.2.3	Крајеви баријере	106
4.2.4	Носећа структура.....	107
4.2.5	Монтажни елементи.....	107
4.2.6	Остали елементи баријере	107
4.3.	Конфигурисање модуларне саобраћајне звучне баријере	108
4.3.1	Платформа производа и фамилија производа	108
4.3.2	Модуларно структурирање производа.....	109
4.3.3	Конфигурисање модуларних саобраћајних звучних баријера	116
5.	КЛАСИФИКАЦИЈА КРИТЕРИЈУМА ЗА КОНФИГУРИСАЊЕ МЗБ	121
5.1.	Критеријуми за пројектовање баријера.....	122
5.2.	Инжењерски захтеви	122
5.2.1	Функционални захтеви.....	122
5.2.1.1	Акустичка ефикасност (акустички захтеви).....	123
5.2.1.2	Трајност саобраћајне звучне баријере.....	123
5.2.2	Животни век баријере	124
5.2.3	Конструкциони фактори	124
5.2.3.1	Оптерећења баријере.....	125
5.2.3.2	Дилатације услед промене температуре.....	126
5.2.3.3	Дужина и висина баријере	127
5.2.3.4	Темељи баријере.....	127
5.2.3.5	Дренажа баријере.....	127
5.2.3.6	Отпорност баријере на влагу и циклусе смрзавања и одмрзавања.....	127
5.2.3.7	Стандардизација делова, димензија и модула	128

5.2.4	Технологичност израде и монтаже	128
5.2.5	Одржавање	129
5.3.	Захтеви безбедности	134
5.3.1	Безбедност саобраћаја	134
5.3.2	Безбедност окружења	136
5.3.3	Пожарна сигурност	136
5.4.	Захтеви окружења и еколошки фактори	138
5.4.1	Уклапање у окружење	139
5.4.2	Утицај на животну средину	140
5.4.3	Одрживост	141
5.5.	Остали фактори	143
5.5.1	Естетски захтеви	143
5.5.2	Могућност рециклаже	144
5.5.3	Трошкови	145
5.5.4	Правна регулатива	146
5.5.4.1	Директиве Европске Уније	146
5.5.4.2	Стратегије	147
5.5.4.3	Закони, Уредбе, Правилници	147
5.6.	Стандарди	149
5.6.1	Стандард EN 14388 : (2005) – Спецификације	150
5.6.2	Стандард EN 1793: Акустичне перформансе	152
5.6.3	Стандард EN 1794: Неакустичне перформансе	160
5.6.4	Стандард EN 14389: Трајност (Дугорочне перформансе)	170
5.6.4	Одрживост	171
6.	РАЗВОЈ МОДЕЛА ЗА ПОДРШКУ ОДЛУЧИВАЊУ	172
6.1.	Приступ развоју модела	173
6.2.	Интеграција FUZZY ANP и MODIPROM метода	173
6.2.1	Дефинисање проблема и циља одлучивања	174
6.2.2	Дефинисање критеријума одлучивања	174
6.2.3	Структурирање проблема одлучивања	178
6.2.4	Конструисање fuzzy матрице парног поређења критеријума	179
6.2.5	Прорачун тежинских коефицијената и нормализација података fuzzy матрице парног поређења критеријума	185
6.2.6	Анализа конзистентности	185
6.2.7	Прорачун локалних тежинских коефицијената за поткритеријумске функције	187

6.2.8	Прорачун глобалних тежинских коефицијената за поткритеријумске функције	187
6.2.9	Избор могућих алтернатива	187
6.2.10	Конструисање матрице одлучивања	187
6.2.11	Рангирање алтернатива	193
6.2.12	Анализа осетљивости	195
6.2.13	Избор најбоље алтернативе	195
7.	ВЕРИФИКАЦИЈА РАЗВИЈЕНОГ МОДЕЛА	196
7.1.	Верификација модела	197
7.2.	Дефинисање проблема и циља одлучивања	202
7.3.	Дефинисање критеријума одлучивања	202
7.4.	Структурирање проблема одлучивања	203
7.5.	Прорачун тежинских коефицијената критеријума	205
7.6.	Прорачун локалних тежинских коефицијената за поткритеријумске функције	207
7.7.	Прорачун глобалних тежинских коефицијената за поткритеријумске функције	212
7.8.	Избор могућих алтернатива	213
7.9.	Конструисање матрице одлучивања	214
7.10.	Оцена и рангирање алтернатива	215
7.11.	Анализа осетљивости	217
7.12.	Избор најбоље алтернативе	220
8.	ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА	221
8.1.	Анализа остварених резултата	222
8.2.	Закључци	224
8.3.	Правци даљег истраживања	224
	ЛИТЕРАТУРА	226

1.1 Општа разматрања

Бука у животној средини која се у литератури дефинише као „комунална бука“ [1] представља важан проблем са којим се човек суочава и којим покушава да управља и да га контролише. Многе ствари које људима обезбеђују лакши и удобнији живот, као што је примена разних уређаја и машина, повећање обима индустријске производње, све већи број саобраћајница, аутомобила и осталих превозних средстава, поред својих позитивних аспеката, доводе и до негативних последица у виду буке, која изазива поремећај сна и угрожавање здравља човека. Овај проблем се посебно јавља у индустријски развијеним земљама.

Раније се сматрало да су негативни ефекти буке везани само за слух човека, данас је доказано да је тај утицај много комплекснији и да утиче на целокупно здравље човека. Стварањем великих градова, густо насељених, бука постаје све већи проблем. „Загађење буком“ је важан проблем и са еколошког и са здравственог становишта и захтева предузимање одређених мера које треба да доведу до смањења нивоа буке у животној и радној средини.

Према неким проценама у Европи је преко 25% становништва изложено 24-часовном еквивалентном нивоу буке који је већи од 65dB(A). Највећи удео ове прекомерне буке чини саобраћај (81%) од чега 50% се односи на друмски, а 31% на железнички и авионски саобраћај [2]. Важан документ у коме је Европска комисија још 1996. године идентификовала буку као један од главних еколошких проблема је „Зелена књига о будућој политици буке у ЕУ“ (*Green Paper on Future EU Noise Policy*). Директива 2002/49/EC (P26) Европског парламента о процени и управљању буком у животној средини [3] се бави искључиво саобраћајном буком и индустријском буком. Основне смернице ове Директиве су прихваћене и у Републици Србији након чега је усаглашен читав низ законских аката из ове области са ЕУ.

Од стране произвођача друмских саобраћајних средстава стално се чине напори да се смањи бука коју ствара погонска јединица и пнеуматици у контакту са подлогом. Међутим, број возила на саобраћајницама стално расте тако да то није довољно и зато је у друмском саобраћају неопходно применити и мере контроле буке на путевима којима се преноси звук од извора буке до пријемника тј. објекта на које та бука утиче. Смањење нивоа буке на путевима простирања се врши применом:

- баријера (препрека)
- тунела
- природних препрека (земљани насипи) и
- комбинацијом наведених начина.

Звучне препреке (акустички екрани, баријере за заштиту од буке) редукују ниво буке на задовољавајући ниво спречавањем простирања звучних таласа. Практично слабљење нивоа буке применом рефлектујућих баријера се креће у опсегу 10-15 dB(A), а применом апсорпционих баријера ова ефикасност се може побољшати за додатних 5 dB(A).

У оквиру Европске комисије за стандардизацију (CEN) постоји технички комитет који се бави стандардизацијом путне опреме (CEN/TC 226 – *Road Equipment*) и

посебна радна група која је посвећена стандардизацији уређаја за смањење буке на путевима (CEN/TC 226/WG 6). Овим стандардима су дефинисане методе испитивања за одређивање акустичких и неакустичких перформанси, као и процедуре за процену трајности (*durability*) акустичких и неакустичких перформанси уређаја за смањење саобраћајне буке.

Приликом пројектовања заштите од буке на саобраћајницама техничко решење баријере се дефинише на основу:

- општих услова природног окружења,
- специфичних услова терена,
- задовољења потребних стандарда и техничких прописа,
- задовољења естетски прихватљивих решења.

Техничка документација пројектованог техничког решења садржи:

- број објеката (баријера) за заштиту од буке, локацију сваке баријере, дужину, висину и распоред панела на свакој баријери,
- прорачун темеља и носеће конструкције,
- техничке спецификације које морају испуњавати панели за заштиту од буке и др.

У тендерској документацији се најчешће дефинишу само основне техничке спецификације које требају задовољити транспарентни или нетранспарентни панели:

- апсорпција звука према DIN EN 1793-1,
- изолација звука према DIN EN 1793-2,
- отпорност на ветар и стално оптерећење према DIN EN 1794-1,
- отпорност на динамичко оптерећење од чишћења снега према DIN EN 1794-1,
- оптерећење на удар камења према DIN EN 1794-1 и
- отпорност на пожар према DIN EN 1794-2,

уз напомену да се испуњење техничких услова доказује достављањем документације у складу са хармонизованим европским стандардом EN 14388:2005.

У зависности од деонице за коју се пројектује звучна баријера, различити су и услови које баријера треба да задовољи:

- јаки удари ветрова,
- велике снежне падавине и снежни наноси,
- велика влажност,
- УВ зрачења,
- опасност од пожара и експлозија,
- сеизмичка оптерећења,

- компатибилност са локалним окружењем (урбана или рурална средина).

Кључни проблеми које треба решити су:

- велики број критеријума структурираних на више нивоа,
- велика субјективност доносиоца одлуке,
- степен значајности одређених критеријума на основу којих се бирају модули (панели) за формирање звучних зидова нису исти за све деонице пута и зависе од услова (просторни, временски, сеизмички и др.) у којима се налази та деоница, и
- како дефинисати јасне критеријуме за избор најповољнијег понуђача који најбоље задовољава све постављене услове за сваку деоницу посебно као и за све деонице збирно.

1.2 Предмет докторске дисертације

Главни задатак ове дисертације је развој модела за подршку одлучивању у процесу избора оптималне конфигурације саобраћајних звучних баријера. Конфигурација баријере треба да је заснована на принципима модларне градње како би комбинацијом модула и њихових геометријских и функционалних параметара било могуће обезбедити варијабилност по питању величине и облика баријере, могућности промене оријентације у простору, прилагођавање конфигурацији терена и могућности комбиновања са засадом, декоративним елементима и сл.

Модел треба да омогући да се из фонда расположивих модула конфигурише СЗБ која ће, за конкретне услове, на оптималан начин задовољити акустичке и неакустичке захтеве и која се уклапа у постојеће окружење како би била прихваћена од стране локалне заједнице.

Задатак модела је да:

- Класификује све релевантне критеријуме за избор модула СЗБ,
- Структурира проблем одлучивања,
- Класификује индикаторе за сваки критеријум и изврши њихову квантификацију,
- Сведе на минимум субјективност у процесу додељивања тежинских коефицијената појединачним критеријумима,
- Дефинише јасан математички модел за решење проблема.

1.3 Циљеви истраживања

Главни циљ дисертације је развој модела заснованог на методама вишекритеријумске оптимизације који ће дефинисати критеријуме (циљеве) одлучивања, поступак генерисања алтернатива тј. могућих конфигурација баријера и предлог метода за оцену и рангирање алтернатива. Критеријуме одлучивања треба разрадити за избор оптималне конфигурације из скупа могућих

решења за решење конкретног проблема. Предложени модел треба тестирати и верификовати на примеру већ реализоване модуларне звучне баријере.

Понуђена конфигурација треба да омогући инвеститору да за конкретне услове сваке деонице пута одабере најквалитетнију варијанту која ће уједно бити и економски најисплативија, а предложена методологија ће произвођачима баријера обезбедити јасна правила на основу којих могу градити своју конкурентност на тржишту СЗБ.

1.4 Основне хипотезе

Основна хипотеза:

H₀: *Могуће је развити Модел за подршку одлучивању, заснован на примени метода вишекритеријумске анализе, помоћу кога је могуће, за конкретне услове сваке деонице пута, изабрати оптималну конфигурацију модуларне баријере за заштиту од буке друмског саобраћаја, која на оптималан начин задовољава акустичке и неакустичке захтеве и која се уклапа у постојеће окружење.*

Допунске хипотезе:

H₁: *Модел одлучивања је могуће аутоматизовати помоћу апликативних софтвера које треба развити.*

H₂: *Предложена методологија ће произвођачима баријера обезбедити јасна правила на основу којих могу градити своју конкурентност на тржишту СЗБ.*

1.5 Методе истраживања

За решавање постављеног проблема је примењена одговарајућа методологија која је заснована на следећим методама:

Опште научне методе које су коришћене у истраживању:

- методе анализе и синтезе,
- методе апстракције и конкретизације,
- методе генерализације и специјализације,
- методе системске анализе и др.

Методе за подршку одлучивању:

- метода FUZZY ANP (фази аналитичких хијерархијских процеса),
- група метода PROMETHEE.

Методе за развој модела:

- методе математичког моделирања,
- методе системско-структурног моделирања објеката и процеса,
- дескриптивна метода и др.

1.6 Приказ по поглављима

У *првом*, уводном поглављу приказан је кратак опис проблема истраживања. Представљен је предмет истраживања, дефинисани основни циљеви истраживања и полазне хипотезе и приказане методе истраживања које су примењене за решавање постављеног проблема. На крају је дат и кратак приказ свих поглавља.

Друго поглавље обухвата преглед стања у области истраживања. Анализом доступне литературе дат је опис комуналне буке, њених извора и типова, и контрола исте. Описана је примена звучних баријера као једног од начина за смањење нивоа буке, теорија баријера, дужина, положај и параметри који утичу на ефикасност баријере. Наведени су и модели за прогнозу буке друмског саобраћаја и модели за оцену нивоа буке.

У *трећем* поглављу приказана је анализа савремених решења саобраћајних звучних баријера. Направљена је свеобухватна класификација звучних баријера, уз разматрање различитих подела у постојећој литератури. Коришћена је основна подела према начину дејства и облику, а затим детаљно приказана и објашњена усвојена класификација. Такође, наведени су и додатни објекти саобраћајних звучних баријера, дата класификација материјала за израду звучних баријера и наведени површински третмани који се користе код баријера за заштиту од буке.

Процес пројектовања, методе заштите и реализација техничких мера за заштиту од буке на путевима у складу са важећим законским прописима у Републици Србији су приказани у *четвртном* поглављу. На основу анализе савремених решења СЗБ урађена је морфолошка структура баријере са описом основних целина, а затим дефинисана платформа производа, модулarno структурирање производа, приказ основних модула и процеса конфигурисања производа са могућим варијацијама у процесу конфигурисања у зависности од акустичких и неакустичних захтева и конфигурације терена.

Пето поглавље садржи класификацију критеријума за конфигурисање МЗБ. Критеријуми су класификовани у четири основне групе: 1) инжењерски захтеви, 2) захтеви безбедности, 3) захтеви окружења и еколошки захтеви и 4) остали фактори. Значајан део је посвећен правној регулативи и важећим стандардима у овој области.

Модел за подршку одлучивању за избор оптималне конфигурације модуларне баријере за заштиту од саобраћајне буке, заснован на интеграцији FUZZY ANP и MODIPROM метода, је приказан у *шестом* поглављу. Дат је алгоритам предложеног модела са детаљним описом појединих фаза и поступком прорачуна.

Верификација развијеног модела је приказана у *седмом* поглављу. За верификацију је одабран сегмент из пројекта заштите од буке аутопута Медаково-Озимица LOT 2 од km 0-300,00 до km 20+812,26. За потребе прорачуна тежинских коефицијената развијена је апликација *Fuzzy Analytic Hierarchy Process Excel Spreadsheet* заснована на фазификацији Saaty-јеве скале применом fuzzy бројева са променљивим интервалом поверења, а за потребе рангирања алтернатива и избор оптималне варијанте развијена је апликација *Method MODIPROM v. 1.2.* која се ослања на методе PROMETHEE I, PROMETHEE II и PROMETHEE III. Пре избора најбоље алтернативе

урађена је *анализа осетљивости* која је уграђена као један од модула у апликацији *Method MODIPROM*.

Закључна разматрања су представљена у последњем, *осмом* поглављу.

На крају дисертације дат је преглед литературе која је коришћена у истраживању.

ПОГЛАВЉЕ 2

БУКА ДРУМСКОГ САОБРАЋАЈА – ПРЕГЛЕД СТАЊА

2.1 Комунална бука

“Бука је сваки нежељени звук” [4]. Уз ову дефиницију треба додати и то, да се ово односи и на штетно деловање звука на човека и његов организам, односно, на здравље човека. У Закону о заштити од буке у животној средини дефиниција је мало другачије дефинисана и наводи се да је бука у животној средини нежељени или штетан звук [5]. У директиви ЕУ бука представља штетан звук искључиво као звук у спољашњој средини, који изазивају разне људске активности [3].

„Комунална бука или загађење буком представља тотални (укупни) ниво буке, који представља укупни ниво нежељеног звука у датој ситуацији и у датом тренутку, и који се по правилу састоји од звука из више блиских и далеких извора” [6].

Стратегија одрживог урбаног развоја Републике Србије до 2030. године [7] која је донета у складу са *Агендом 2030* за одрживи развој Генералне скупштине Уједињених нација истиче потребу уређења градског простора и решавања проблема урбаног развоја. Део 4.1.6.5 ове Стратегије је посвећен заштити од буке и односи се на дефинисане граничне вредности индикатора буке за одређене акустичке зоне и законску обавезу за Јединице локалне самоуправе да изврши акустичко зонирање како би се оформио обједињен/централизован систем станица за мониторинг буке.

Осим тога, Влада Републике Србије донела је 2021. године *Закон о заштити од буке у животној средини* [5] који се односи на:

- субјекте задужене за заштиту животне средине од буке,
- средства и услове за заштиту животне средине од буке,
- мерење буке у животној средини,
- приступ информацијама о буци,
- надзор и друге теме од значаја за заштиту животне средине и здравља.

Даљи правци су дефинисани одговарајућим прописима [8], смерницама [9]–[12] и стандардом [13], који су релевантни за заштиту животне средине од буке а који су у складу са Директивом 2002/49/ЕС [3], Европског парламента и Савета Европске уније.

Комунална бука представља важан проблем у животној средини. Развојем саобраћаја овај проблем постаје све израженији. Велики број возила која се крећу по градовима и аутопутевима, авиони и возови чине да саобраћајна бука буде доминантни извор буке у комуналној средини. Када се анализира саобраћајна бука процењено је да преко 50% људи живи у подручјима који нису заштићени од буке и да се поред саобраћајница са густим саобраћајем ниво буке креће у опсегу 75+80dB(A) [1].

Комунална бука је веома променљива величина. У градским срединама главни извор комуналне буке је саобраћај, али изазивају је и други локални извори који могу да се означе као специфични извори. То су већи индустријски погони, занатске радње, разне услужне делатности, ресторани и други угоститељски објекти, кућни системи и уређаји. Бука специфичног извора представља саставни

део комуналне буке и треба да буде обухваћена мерењем. Постоји и друга група специфичних извора које треба искључити при одређивању нивоа комуналне буке. Они се током извођења поступка мерења буке сматрају сметњом [14][15].

Комунална бука може да се мери и изражава преко разних индикатора. Најчешће су у употреби еквивалентни ниво L_{eq} или неки од процентних нивоа L_n . Када се разматра локација где је претежно саобраћајна бука, као референтно време користи се $T = 15 \text{ min}$. По правилу треба у сваком сату направити најмање један запис од 15 минута [16]. Квалитетно мерење садржи по четири записа у сваком сату и пратеће процентне нивое, према стандарду [16] и Правилнику [17].

2.1.1 Извори комуналне буке

Главни извори комуналне буке [1]:

- извори буке на отвореном простору,
- извори буке у затвореном простору.

Извори буке на отвореном простору:

- саобраћај (друмски, железнички и авионски),
- грађевинске машине за извођење јавних радова,
- индустрија,
- машине за кућну употребу (косачице, моторне тестере и сл.),
- машине и возила за комунално одржавање,
- спортске активности, концерти, забаве, забавни паркови, аларми.

Извори комуналне буке у затвореном простору:

- кућни апарати (усисивачи, фен за косу, веш машина и сл.),
- вентилациони системи, клима уређаји, пумпне станице, трафо станице,
- уређаји за музичку репродукцију,
- забаве.

Према дефиницији ЕУ комунална бука је нежељени или штетни звук у спољној средини створен људском активношћу и подразумева [3]:

- саобраћајну буку,
- буку коју ствара индустрија у градовима и насељима,
- уличну буку различитог порекла (грађевинске машине, озвучења у баштама ресторана, спортске и друге приредбе на отвореном простору, утовар и истовар разних металних предмета и слично),
- буку у домаћинствима (од електричних и других уређаја и инсталација, из суседних станова и др.).

Доминантни извор комуналне буке је саобраћај (друмски, железнички и авионски). Ниво буке који превозна средства стварају у окружењу се креће од 70÷110dB(A). Најраспрострањенији извор буке у свим земљама је бука друмског саобраћаја. Она зависи од [17]:

- брзине возила,
- структуре саобраћајног тока,
- природе површине,
- топографије терена,
- метеоролошких услова и
- позадинске буке.

Истраживања су показала да саобраћајна бука изазива пад цена некретнина за 5% у просеку и да у периоду економског развоја та вредност може да порасте и до 12% [18]. Бука којој су изложени становници модерних градова, повећала се у последњих неколико десетина година за више од 50%, посебно у урбаним и индустријским срединама [19].

Према неким проценама у земљама Европске уније око 120 милиона људи је изложено нивоу саобраћајне буке од 55dB(A), док је 50 милиона од њих изложено буци већој од 65dB(A). Ниво буке изнад 55dB(A) изазива непријатност, агресивно понашање и поремећаје спавања. Стална изложеност нивоу буке преко 65 dB(A) може да изазове хипертензију, а стална изложеност нивоу буке преко 75dB(A) утиче на повећање нивоа стреса и повећање броја људи са срчаним обољењима, а може да доведе и до оштећења слуха [18].

У Србији не постоји довољно поузданих података о броју становника у градовима који су угрожени комуналном буком. Користе се подаци из земаља са сличним обимом саобраћаја, као нпр. Грчка, где је око 20% становништва изложено 24-часовном нивоу комуналне буке изнад 65 dB(A) [20].

Средње вредности нивоа буке у урбаним срединама крећу се у границама за [1]:

- велике градове - 65÷75dB(A)
- средње градове - 63÷73dB(A)
- мале градове - 62÷71dB(A)
- сеоска насеља - 45÷62dB(A).

Поред саобраћајница са веома густим саобраћајем ниво буке се креће у опсегу 75÷80dB(A) [1].

2.1.2 Типови извора буке

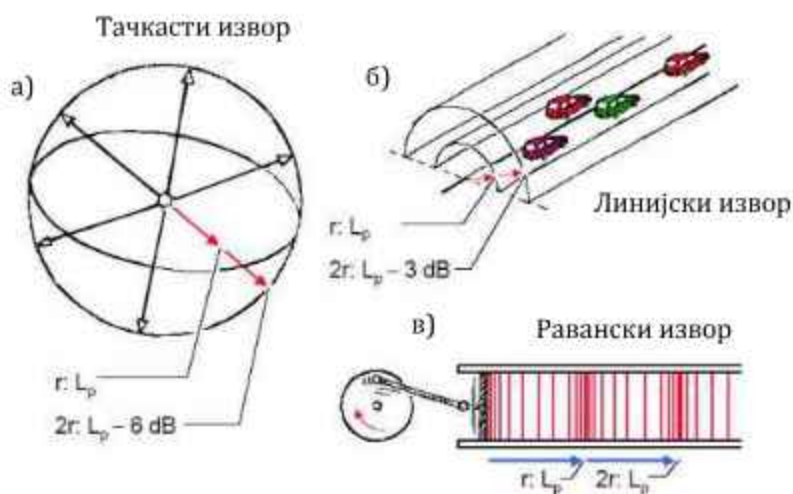
Простирање буке на отвореном простору подразумева ширење звучних таласа од места где се налази извор буке ка месту где је пријемник буке, кроз атмосферу. При том бука слаби због тога што се звучни таласи расипају, односно повећава се површина фронта таласа на коме се распоређује иста количина енергије звука.

Стварање звучних таласа, њихово распрострањање, а такође и смањење нивоа буке зависи од типа извора звука [1].

Постоје три типа извора звука:

- сферни (тачкасти) извор,
- линијски извор и
- равански извор (извор раванских таласа).

Сви извори буке који постоје у животној средини се могу описати помоћу прва два извора буке: тачкастог и линијског.



Слика 2.1. Типови извора буке: а) тачкасти извор, б) линијски извор, в) равански извор [21]

2.1.2.1 Тачкасти извор буке

Тачкасти извор буке је посебан случај извора сферних звучних таласа, где се звучни таласи простиру у облику сфере у свим правцима. Када су димензије извора мале у поређењу са таласном дужином емитованих таласа и растојањем до пријемника, тада се ради о тачкастом извору. При прорачунима буке коју изазивају ови извори, добијају се следеће релације [1]:

$$I = \gamma \frac{P_a}{4\pi r^2} \quad (2.1)$$

$$\frac{I}{I_0} = \gamma \frac{P_a}{I_0} \frac{1}{4\pi r^2} \quad (2.2)$$

$$\frac{I}{I_0} = \gamma \frac{P_a}{P_0} \frac{1}{4\pi r^2} \quad (2.3)$$

$$10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \gamma + 10 \log \frac{P_a}{I_0} + 10 \log \frac{1}{4\pi} + 10 \log \frac{1}{r^2} \quad (2.4)$$

где је:

I – интензитет звука

γ – фактор усмерености

P_a – звучна снага извора

r – растојање од извора таласа

Математичким трансформацијама се добија израз којим се може израчунавати ниво буке ($L_p = L_I$), на растојању r од извора буке [1].

$$L_p = L_W + G - 20 \log r - 11 \quad (2.5)$$

где је:

L_I – нормална компонента нивоа интензитета звука усредњена на изабраној мерној површини

L_W – ниво звучне снаге [dB]

G – индекс усмерености [dB]

Тачкасти извор звука је неусмерен. То значи да је $G = 0$. У том случају је [1]:

$$L_p = L_W - 20 \log r - 11 \quad (2.6)$$

За тачкасте изворе буке је карактеристично да се звучна енергија распоређује по сферној површини. То значи да је ниво буке исти у свим тачкама које су на истом растојању од извора. Ниво буке се смањује за 6dB са дуплирањем растојања од извора буке [1].

У комуналној средини овај извор буке је углавном одмах изнад неке подлоге, па се просторни угао смањује са 4π на 2π . Тада је индекс усмерености [1]:

$$G = 10 \log \left(\frac{4\pi}{2\pi} \right) = 3dB \quad (2.7)$$

Једначина за израчунавање нивоа буке у овом случају је [1]:

$$L_p = L_W - 20 \log r - 8 \quad (2.8)$$

Ако је познат ниво буке на неком растојању од извора, може се израчунати на било којем другом растојању [1]:

$$L_2 = L_1 - 20 \log \frac{r_2}{r_1} \quad (2.9)$$

где је:

L_1 – ниво буке на растојању r_1 од извора

L_2 – ниво буке на растојању r_2 од извора

r_1 – прво растојање извора буке од пријемника

r_2 – друго растојање извора буке од пријемника

2.1.2.2 Линијски извор буке

Линијски извор буке је извор код кога су попречне димензије извора буке мале, а уздужне велике када се упореде са растојањем од извора до пријемника.

У овом случају се звучна енергија распоређује по површини цилиндра. То значи да је ниво буке исти у свим тачкама које се налазе на истом растојању од извора буке. Ниво буке се смањује за 3dB са дуплирањем растојања од извора буке. Такође, ако се зна ниво буке на неком растојању од извора, може се израчунати ниво буке на било ком другом растојању, помоћу израза [1]:

$$L_2 = L_1 - 10 \log \frac{r_2}{r_1} \quad (2.10)$$

Ако постоје два независна извора буке и притисак звука у одређеној тачки од извора 1 је p_1 , а притисак звука у тој истој тачки од извора 2 је p_2 , тада је ниво буке [22]:

$$L_p = 10 \log \frac{p_1^2 + p_2^2}{p_0^2} \quad (2.11)$$

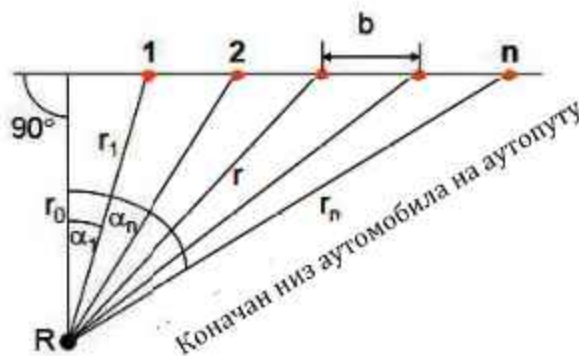
У случају када постоји коначан број дискретних тачкастих извора буке, као коначан низ аутомобила на аутопуту, формира се линијски извор буке (сл. 2.2.). Ако је звучна снага L_w , извори буке на међусобном растојању b , у прорачунској тачки R на растојању r_0 од линије извора буке, добија се [1]:

$$L_p = L_w + 10 \log \left(\frac{\alpha_n - \alpha_1}{r_0 b} \right) - 8 + \Delta L \quad (2.12)$$

где је:

α_1 – угао под којим се види први извор буке у низу посматрано од прорачунске тачке

α_n – угао под којим се види последњи извор буке у низу



Слика 2.2. Линијски извор буке – коначан низ тачкастих извора [1]

Корекциони члан ΔL се може израчунати или занемарити када му је вредност мања од 1dB [1].

$$\Delta L = 10 \log \left\{ \frac{b \cos^2 \alpha_1}{r_0 \alpha_n - \alpha_1} \sum_{m=1}^n \frac{1}{1 + (m-1) \frac{b}{r_0} \cos \alpha_1 \left[(m-1) \frac{b}{r_0} \cos \alpha_1 + \sin \alpha_1 \right]} \right\} \quad (2.13)$$

Ако постоји бесконачан број дискретних тачкастих извора буке ($n \rightarrow \infty$), на међусобном растојању b , а разлика углова тежи углу π ($\alpha_n - \alpha_1 \rightarrow \pi$), израз за израчунавање нивоа буке добија следећи облик [1]:

$$L_p = L_W - 10 \log(r_0 b) - 3 \quad (2.14)$$

Када се коначан број тачкастих извора налазе на веома малом међусобном растојању, тада се формира континуални линијски извор дужине d (сл. 2.3.). У том случају ниво буке се рачуна [1]:

$$L_p = L_{WL} + 10 \log \left(\frac{\alpha_2 - \alpha_1}{r_0 d} \right) - 8 \quad (2.15)$$

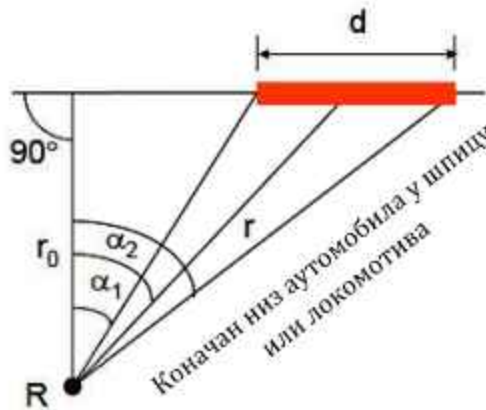
где је:

$(\alpha_2 - \alpha_1)$ – угао под којим се види извор буке посматрано од позиције пријемника

d – дужина извора буке

L_{WL} – звучна снага извора буке по јединици дужине

r_0 – најкраће растојање пријемника до линије извора



Слика 2.3. Континуални линијски извор буке [1]

Када су прорачунске тачке веома близу линијском извору, тада разлика углова тежи углу π ($\alpha_n - \alpha_1 \rightarrow \pi$), па претходни израз добија облик [1]:

$$L_p = L_{WL} - 10 \log(r_0 d) - 3 \quad (2.16)$$

На веома великим растојањима од линијског извора ниво буке се рачуна на следећи начин [1]:

$$L_p = L_{WL} - 10 \log r_0 - 5 \quad (2.17)$$

2.1.3 Контрола буке

Путања којом се бука простира од извора ка пријемнику није увек иста. Бука представља проблем ако је њен ниво на месту пријема висок и ремети основне људске активности.

Ниво буке на месту пријема зависи од:

- звучне снаге извора буке,
- растојања од извора до пријемника буке (дужина путање) и
- окружења у коме се пријемник буке налази.

На основу ових елемената одређени су и основни принципи контроле буке:

- контрола на самом извору буке,
- контрола на путевима простирања буке и
- контрола на месту пријема буке.

Контрола на самом извору буке је основна мера која се може предузети за контролу буке. Када се ова мера спроведе, нема потребе примењивати друге мере. Када, из неких разлога, није могуће спровести контролу буке на самом извору, тада се приступа контроли буке на путевима преноса. Ова мера се најчешће примењује у животној средини и она подразумева изоловање извора буке или постављање препреке између извора буке и пријемника. Ако је немогуће спровести прве две мере контроле буке, приступа се трећој, а то је контрола буке на месту пријемника.

Доминантни извор буке на отвореном простору је бука саобраћаја. Код путничких и теретних возила главни извор буке су погонска јединица и контакт пнеуматика са површином пута. Од стране произвођача друмских саобраћајних средстава се стално чине напори да се смањи бука коју стварају ова два извора буке. Међутим, то није довољно и зато је често у друмском саобраћају неопходно применити и мере контроле буке на путу којим се преноси звук од извора до пријемника, тј. објеката на који та бука утиче. Смањење нивоа буке на путевима простирања се врши применом:

- баријера (препрека),
- тунела,
- природних препрека (земљани насипи) и
- комбинацијом наведених начина.

Звучне препреке (акустички екрани) смањују ниво буке на задовољавајући ниво тако што заустављају простирање звучних таласа. Практично слабљење нивоа буке применом рефлектујућих баријера се креће у опсегу 10-15 dB(A), а применом

апсорпционих баријера ова ефикасност се може побољшати за додатних 5 dB(A) [23].

Задатак ове дисертације је да се дефинише процес конфигурисања саобраћајних звучних баријера заснованих на модуларном приступу и да се развије платформа на којој се она заснива. Посебно су потенциране варијације у решењима модуларних звучних баријера (МЗБ) као што су: варијације величине и облика баријера, варијације услед промене правца пружања, варијације услед конфигурације терена, као и комбинација баријера са засадима, украсним елементима и сл. [24].

Пројектовање звучних баријера је процес који се састоји из одређеног броја логичких фаза и има задатак да задовољи постављене циљеве. Примарни циљ је свакако смањење прекомерне буке поред саобраћајница. Овај акустички захтев се односи на:

- смањење нивоа буке на месту пријемника (ван саобраћајнице) и
- ублажавање нивоа буке на страни извора буке (на самој саобраћајници).

Међутим, да би се остварио успешан дизајн звучних баријера, потребно је размотрити мноштво других неакустичких аспеката као што су [25]:

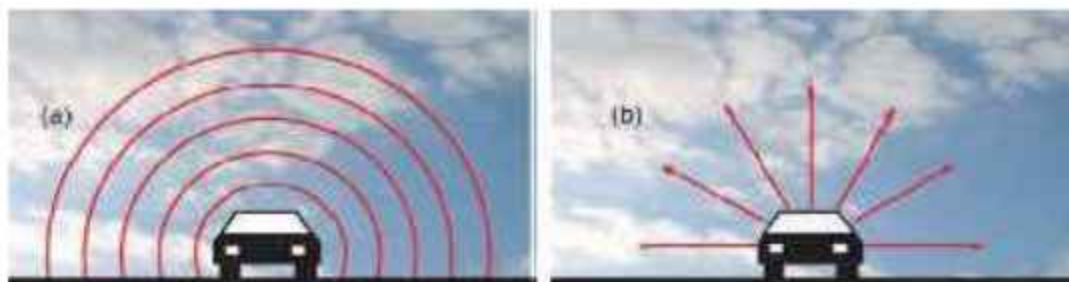
- визуелна привлачност (естетски изглед),
- компатибилност са локалним окружењем,
- безбедност возача у смислу: смањења прегледности, рефлексije светлости, безбедности возила у судару са баријером и др.,
- безбедност животиња које живе у станишту где се постављају баријере (видљивост за птице, отвори за пролаз ситних животиња и др.),
- еколошки (очување станишта животиња, локалне хидрологије, токсичност материјала од којих је направљена баријера и сл.),
- оптерећења баријере (сопствена тежина, удари ветра, снег, вибрације настале од саобраћаја итд.),
- конфигурација и структура терена,
- технологичност израде и монтаже,
- једноставно одржавање (брза и лака замена модула, могућност чишћења, приступ до баријере и др.),
- трошкови израде, монтаже и одржавања,
- животни век производа (заштита од удара возила, отпорност на хемијске утицаје, отпорност на мраз, пожар, УВ зраке, влагу и др.),
- могућност рециклаже након истека периода коришћења итд.

Успешан систем за смањење буке се може остварити само применом мултидисциплинарног приступа у процесу пројектовања. Резултат треба да буду модуларне звучне баријере које се уклапају у постојећи амбијент како би биле прихваћене од локалне заједнице.

2.2 Смањење нивоа буке применом баријера

Постоји више начина помоћу којих се може смањити ниво буке на путевима простирања. Примена баријера (препрека) је један од њих. Примарна функција баријере је да смањи ниво буке који се директним путем преноси од места извора до места пријема.

Звук се шири из извора као серија брзо осцилујућих таласа притиска који се шире сферно док се удаљавају од извора (сл. 2.4. а). Ови таласи притиска стварају осећај буке када стигну до уха слушаоца. Иако звук путује у виду таласа често је погодније за њихово ширење усвојити модел ширења у виду правих или зрака (сл. 2.4. б). Метод зрака се користи да би се лакше описале појаве које се обично јављају код постављања баријере [24].



Слика 2.4. Модел ширења звучних таласа: а) сферни модел, б) модел зрака [24]

Баријере смањују ниво буке на тај начин што спречавају простирање звучних таласа. Задатак баријере је да онемогући директну видљивост између извора и пријемника буке, односно да спречи простирање буке директним путем. То се може постићи правилном конструкцијом и избором материјала. На тај начин звучни таласи могу да промене правце у ком се простиру и да се усмере ка горњем и ка бочним крајевима баријере.

Баријере се могу градити у облику вертикалних (сл. 2.5.) и конзолних баријера (сл. 2.6.). Начин градње у облику конзолних баријера даје већу ефикасност због повећања зоне сенке [1].



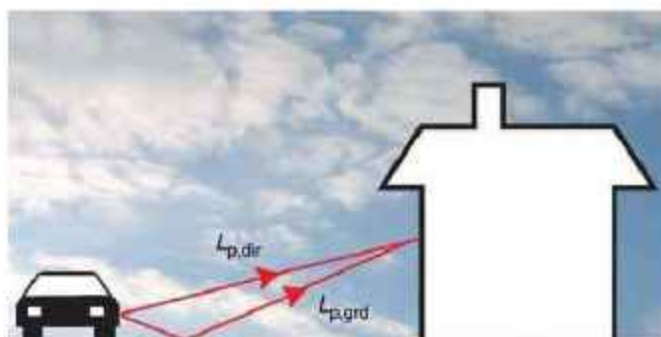
Слика 2.5. Приказ ефекта вертикалне баријере и изглед баријере [1]



Слика 2.6. Приказ ефекта конзолне баријере и изглед баријере [1]

2.2.1 Теорија баријера

Код незаклоњених путева најважнији звук који се преноси је директан звук $L_{p,dir}$. То је звук где зрак путује директно између извора и пријемника. До пријемника стиже и зрак који удара у подлогу и одбија се на пријемник $L_{p,gdr}$ (сл. 2.7.) [24].



Слика 2.7. Пут неометаног преноса звука [24]

Највеће слабљење је када се звук простире преко акустички „меких“ терена (травњак), и где је $L_{p,dir}$ близу земље.

Увођење баријера може значајно смањити снагу директних зрака. За већину зрака баријера представља потенцијални пут преношења $L_{p,prev}$. Зрак скреће од горње ивице баријере $L_{p,dif}$. Присуство баријере елиминише $L_{p,gdr}$ као потенцијално значајан пут преноса звука.



Слика 2.8. Пут преноса звука када се постави баријера [24]

Да би се утврдиле акустичне перформансе баријера, користе се методе зрака, односно разлика између $L_{p,dir}$ и $L_{p,dif}$. Основу највећем броју практичних метода за израчунавање перформанси баријера дао је *Maekawa* [26] а други истраживачи су развили основе теорије баријера на основу ових резултата. Развијена теорија израчунава акустичне перформансе вертикалних екрана у односу на *Fresnel*-ов број N , који је дефинисан на следећи начин [24]:

$$N = 2 \frac{\delta}{\lambda} \quad (2.18)$$

где је:

δ - разлика дужине пута (дужина дифрактованог пута минус дужина директног пута)

λ - таласна дужина звука у ваздуху

Између извора звука и пријемника постоји област која се назива *зона сенке*. То је област у којој баријера прекида линију видљивости. У тој области δ има позитивну вредност. Друга област је *осветљена зона*. То је област у којој се зраци преносе изнад дифракционе ивице баријере. У тој области δ има негативну вредност. За смањење буке услед убацивања баријере (IL) постоји следећа једначина, коју су дефинисали *Kurze* и *Anderson* [27]:

$$IL = 5dB + 20 \log \frac{\sqrt{2\pi N}}{\tanh \sqrt{2\pi N}}, \quad \text{за } -0,2 < N < 12,5$$

$$IL = 24dB, \quad \text{за } N < 12,5 \quad (2.19)$$

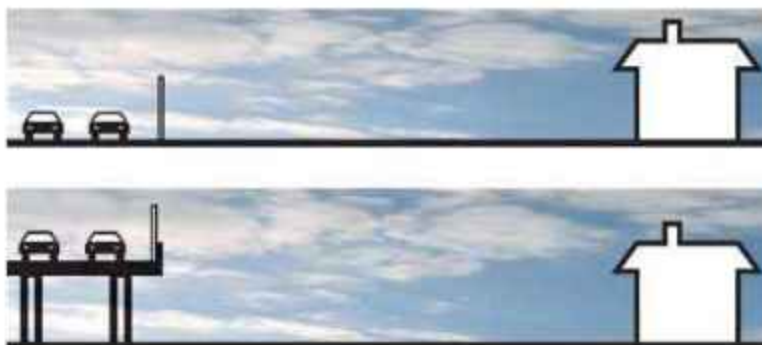
У свом раду *Kurze* и *Anderson* су представили теорију дифракције коју је обрадио *Keller* [28] и користили експерименталне податке које су користили *Maekawa* [26] и *Redfearn* [29] да добију једноставну формулу за слабљење баријере.

Tatge [30] је дао још једну једноставну формулу, која се налази и у стандарду ISO 9613-2 (случај за појединачну дифракцију, без рефлексије на земљи) [31]. Значај ове једначине је у томе што су софтвери за мапирање звука усклађени са захтевима стандарда.

У новије време *Menounou* [32] је оптимизовао формулу и представио нову, на основу поређења резултата ранијих истраживања, за конфигурације где су извор и пријемник близу баријере и где је пријемник на граници зоне сенке. До истог закључка су дошли и *Hu* и *Wong* [33].

2.2.2 Положај баријера

Када су пут и пријемник у истом нивоу, најбољи положај за постављање баријере је што ближе путу. Исто важи и у случају када је пут изнад насипа или вијадукта (сл. 2.9.). У случају када је пут усечен или када су извор и пријемник буке раздвојени издигнутом околином, баријеру треба поставити на врху усека или падине (сл. 2.10.). На тај начин се постижу оптималне перформансе баријера.



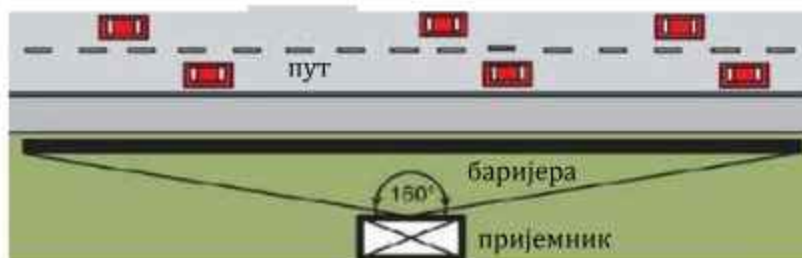
Слика 2.9. Пример постављања баријере близу пута или на вијадукту [24]



Слика 2.10. Пример постављања баријере код усечених путева [24]

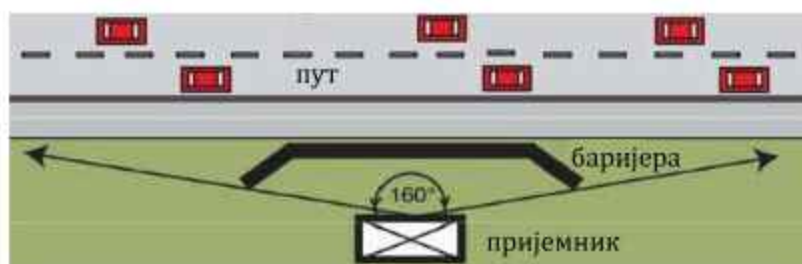
2.2.3 Дужина баријера

Дифракција звука се дешава на свим крајевима баријере, не само на горњој. То значи да укупно смањење буке које баријера може да обезбеди не зависи само од положаја и растојања између извора и пријемника буке, већ зависи и од висине и дужине баријере. Ако баријера заклања угао видљивости од 160° између извора и пријемника, зраци који скрећу на крајевима нису од значаја. Дужина баријере се може смањити закошењем крајева (сл. 2.12.). Дифракција звука на горњем крају баријере је у вези са висином баријере. Пошто се дифракција звука дешава на свим крајевима баријере, то значи да смањење буке зависи и од дужине баријере. Потребно је да баријера обезбеди заклањање угла видљивости од 160° између извора и пријемника буке, зато што у том случају зраци који скрећу на крајевима баријере нису значајни (сл. 2.11.).



Слика 2.11. Минимални угао да не дође до дифракције на крајевима баријера [24]

Исти угао се може постићи и са мањом дужином баријере, тако што се могу закосити њени крајеви, као што је приказано на слици 2.12.



Слика 2.12. Пример закошења крајева баријера [24]

2.2.4 Рефлексија од баријере

Велики део звука који долази до баријере се рефлектује од ње или га баријера апсорбује, само мали део се преноси кроз баријеру. Акустично рефлектујуће су баријере направљене од чврстих хомогених материјала (дрво, бетон). Упијајуће баријере су направљене или испуњене порозним материјалом (минерална влакна, пена и др.).

Ако посматрамо замишљени извор (сл. 2.13.) који је на истом растојању као извор од баријере, само са друге стране, може доћи до рефлексије баријере, односно јавља се проблем рефлектоване буке.



Слика 2.13. Пример деловања дифрактованих зрака од замишљеног извора [24]

За решење овог проблема може се повећати висина баријере. Ако то превише повећава трошкове баријере и није визуелно прихватљиво, може се направити нагнута баријера. У овом случају рефлектовани звук би се одбијао изнад пријемника (сл. 2.14.).



Слика 2.14. Пример нагнутих баријера [24]

Још једно решење проблема рефлексије баријера је употреба баријера са звучно апсорбујућим површинама. Ова површина треба да се постави са оне стране где је саобраћај.



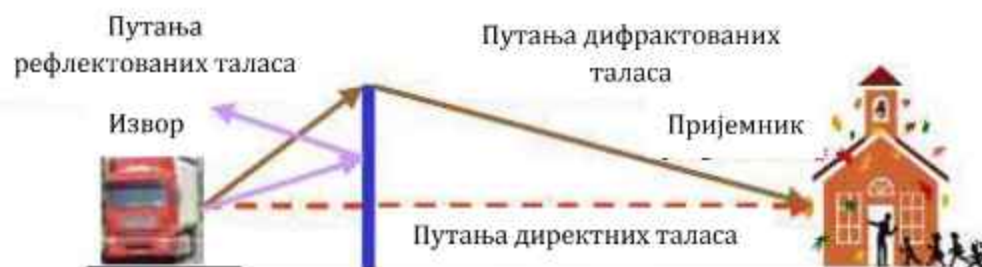
Слика 2.15. Пример баријере са звучно апсорбујућим површинама [24]

2.2.5 Параметри који утичу на ефикасност баријере

Степен смањења нивоа буке одређен је [1]:

- материјалом баријере,
- димензијама баријере,
- локацијом баријере и
- обликом баријере.

Када не постоји баријера звучни таласи се од извора до пријемника буке распростиру директном путањом. Кад се изгради баријера, један део енергије баријера апсорбује, други део се рефлектује, а трећи део енергије се простира до пријемника буке. Због ефекта дифракције један део се савија око горње и бочних крајева баријере и наставља свој пут до пријемника буке (сл. 2.16.).

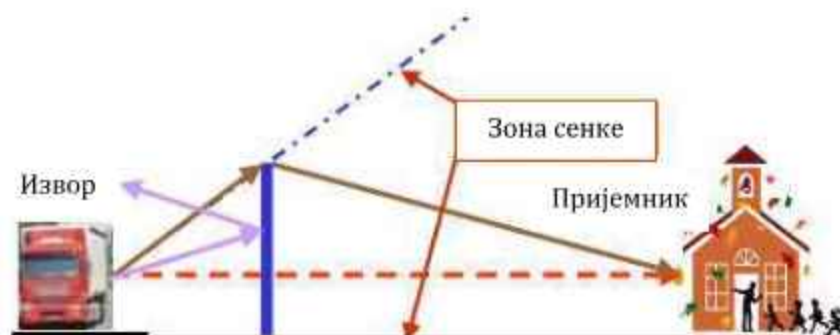


Слика 2.16. Путеви преношења звучних таласа након постављања баријере [1]

Иза баријере се налази зона сенке (сл. 2.17.). У тој зони ниво буке зависи од енергије која се пренесе кроз преграду и енергије звучних таласа који скрећу са праве путање, односно савијају се око крајева баријере и настављају даље ка пријемнику. Први део енергије је ослабљен због изолационих карактеристика баријере. Такође, и други део енергије је ослабљен при простирању звучних таласа.

Постављање баријере изазива и неке негативне ефекте, као што је повећање нивоа буке на страни извора. Такође, ако се баријере налазе с обе стране извора, вишеструке рефлексије звучних таласа од баријера могу да допринесу повећању нивоа буке на месту пријемника. Ови негативни ефекти могу се умањити

облагањем баријера апсорпционим материјалом са стране извора буке, чиме се смањује рефлектована енергија. На овај начин се може повећати и ефикасност баријере, односно, може се повећати смањење буке које се добија постављањем звучно-апсорпционе баријере између извора и пријемника [1].



Слика 2.17. Зона сенке [1]

Један део енергије се увек пренесе кроз звучну баријеру. Тај део зависи од врсте материјала од кога је направљена баријера, односно, од његових изолационих карактеристика. Када се упореди вредност тог дела енергије са енергијом дифрактованих таласа, та вредност треба да буде занемарљива да би се остварио добар ефекат звучне баријере. Та занемарљива вредност подразумева да ниво буке коју изазивају директни таласи има вредност 10dB мању од нивоа буке коју изазивају дифрактовани таласи. У том случају се сматра да се њен утицај на месту пријемника буке не узима у обзир. То значи да изолациона моћ преграде треба да има вредност најмање за 10dB већу од нивоа смањења буке које је потребно остварити изградњом звучне баријере. Тако нпр., ако се жели постићи слабљење нивоа буке од 10dB, може се применити било који материјал наведен у табели 2.1, при чему није потребно бирати материјале који обезбеђују већу изолациону моћ од 20dB, јер је ефекат исти као и при коришћењу материјала са изолационом моћи од 20dB.

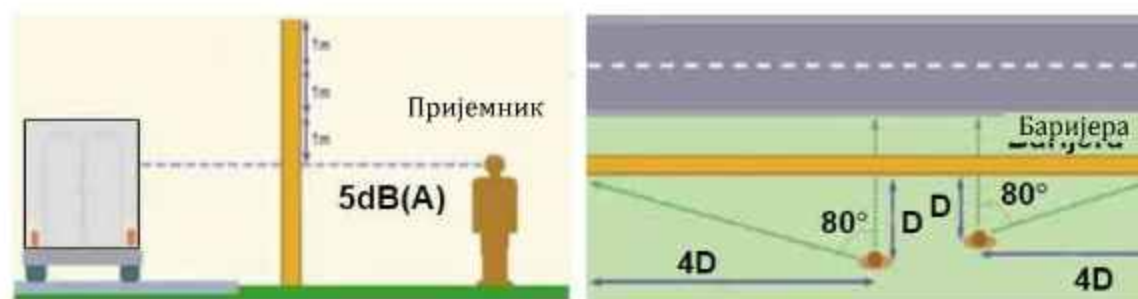
Колико се енергије преноси кроз баријеру, зависи од материјала од ког је она саграђена, односно од изолационих карактеристика тог материјала.

Табела 1. Изолациона моћ материјала од којих може бити саграђена баријера [1]

Материјал	d [mm]	M [kg/m ²]	R [dB]
Иверица	13	8,3	20
Дрво	25	18	21
Челик	0,95	7,3	22
Алуминијум	1,59	4,4	23
Лаки бетонски зид	100	161	36
Зид од опеке	150	288	40

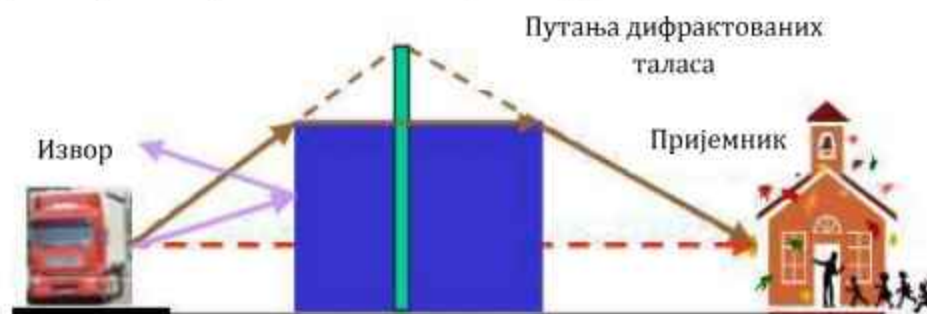
Део енергије која се пренесе дифрактованим таласима зависи од локације, димензија и облика баријере. Смањење нивоа буке износи 5dB(A) ако је висина баријере довољна да спречи директну видљивост извора и пријемника (сл. 2.18. – лево). Висина баријере треба да буде једнака већој висини – извора буке или пријемника. Додатно смањење нивоа буке од 1,5dB(A) добија се за свако повећање висине баријере од 1m. Да би се спречио утицај дифрактованих таласа око бочних

ивица баријере, ширина баријере мора да буде најмање 8 пута већа од растојања пријемника до баријере (сл. 2.18, – десно) [1].



Слика 2.18. Ефекат висине и ширине баријере на њену ефикасност [1]

На додатно смањење нивоа буке утицај има и дебљина препреке. На тај начин се повећава дужина путање којом се простиру дифрактовани таласи (пуна линија на сл. 2.19.). Исти ефекат смањења има и тања преграда чија се ефективна висина одређује поступком приказаним на слици 2.19. [1].



Слика 2.19. Ефекат дебљине баријере [1]

2.2.6 Прорачун слабљења од баријере

Слабљење нивоа буке помоћу баријере дефинисано је разликом дужине пута који пређе дифрактовани талас и дужине пута који прелази директан талас [1].

Једначина која дефинише слабљење од баријере, а примењује се у стандардима за прогнозу буке (RSL 90 – друмски саобраћај, SCHALL 03 – железнички саобраћај, ISO 9613 – индустријска бука), има облик [1]:

$$C_B = -7 \cdot \log \left[5 + \left(\frac{70 + 0,25 \cdot s_{\perp}}{1 + 0,2 \cdot z_{\perp}} \right) \right] \cdot z_{\perp} K_{w\perp}^2 \quad (2.20)$$

где је:

C_B – слабљење укупног нивоа буке баријером

$z_{\perp}$ – разлика дужине путање дифрактованих и директних таласа

$K_{w\perp}^2$ – корекција због метеоролошких услова

Разлика дужине дифракционе и директне путање рачуна се као [1]:

$$z_{\perp} = A_{\perp} + B_{\perp} + C_{\perp} - s_{\perp} \quad (2.21)$$

где је:

$A_{\perp}$ - растојање извора буке до горње ивице баријере

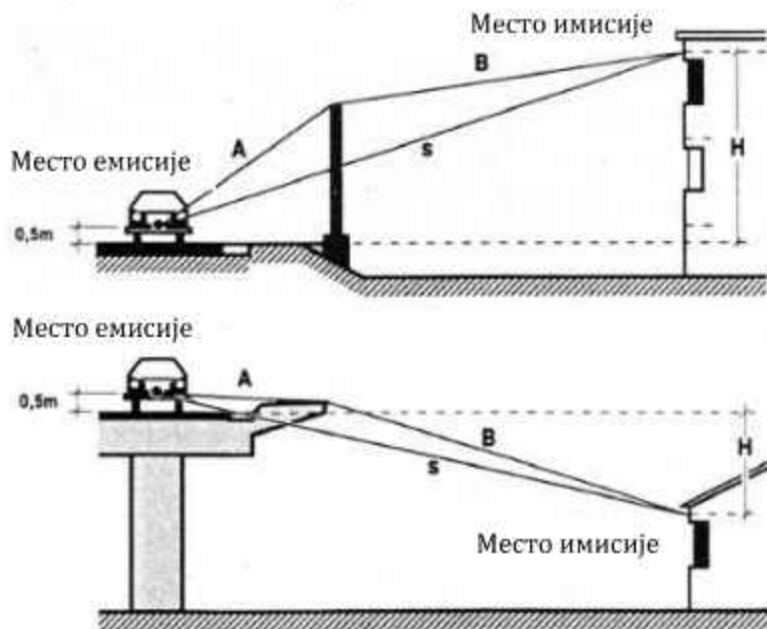
$B_{\perp}$ - растојање пријемника буке до горње ивице баријере

$C_{\perp}$ - сума растојања преломних ивица код баријера са више таквих ивица

$s_{\perp}$ - најкраће растојање пријемне до емисионе тачке.

Метеоролошка корекција одређује се изразом [14]:

$$K_{w\perp} = \exp\left(-\frac{1}{2000} \cdot \sqrt{\frac{A_{\perp} \cdot B_{\perp} \cdot s_{\perp}}{2 \cdot z_{\perp}}}\right) \quad (2.22)$$

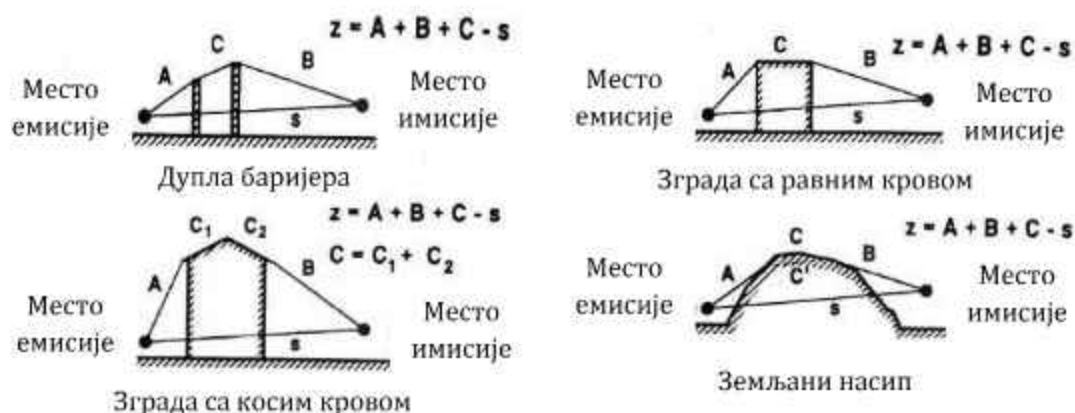


Слика 2.20. Примери израчунавања разлике дужине дифракционе и директне путање за баријере са једном преломном ивицом

Примери израчунавања разлике дужине дифракционе и директне путање приказани су на сл. 2.20., за случај само једне преломне ивице. У тим случајевима за израчунавање разлике користи се модификована једначина [1]:

$$z_{\perp} = A_{\perp} + B_{\perp} - s_{\perp}$$

На слици 2.21. приказани су случајеви када постоји више преломних ивица звучних таласа.



Слика 2.21. Примери израчунавања разлике дужине дифракционе и директне путање за баријере са више преломних ивица

2.3 Модели за прогнозу буке друмског саобраћаја

2.3.1 Модели за прогнозу буке

Ниво буке на месту пријемника се може утврдити мерењем. Поред тога, могу се користити и модели за прогнозу буке, помоћу којих се може израчунати ниво буке. Могуће је одредити и простирање буке од једне до друге тачке. Ови модели се примењују у случајевима када је ограничен приступ неким мерним тачкама, када се мерење изводи уз велику позадинску буку, када је потребно израдити мапе буке и прогнозу нивоа буке и када се испитују алтернативе у примени мера за смањење буке.

Формуле које се користе за прорачун у већини модела су сличне. Референтни ниво буке се добија експериментално и уводе се корекциони фактори који зависе од: типа возила, протока саобраћаја, врсте коловоза, удаљености, просечне брзине и других фактора, који се разликују у различитим моделима.

Постоје извесни недостаци при примени ових модела за прогнозу буке. Потребно је много информација о изгледу терена, објектима који се ту налазе и извору буке, да би модел дао веродостојне резултате. Такође, на тачност резултата директно утиче особа која прави модел.

Примена ових модела има и својих предности. Добијају се детаљне информације о критичним изворима буке и за велики број локација, не постоји утицај метеоролошких услова на резултате мерења, мањи је утицај позадинске буке и постоји могућност процене хипотетичких ситуација.

Постоји много методологија за прогнозу буке друмског саобраћаја. У периоду од 1978. до 1994. године развијени су модели који су описани у литератури [34]–[37]. У [38] је описан *FHWA Traffic Noise Model, Version 1.0*. За израду овог модела треба узети у обзир: карактеристике путева (координате, ивицу коловоза, саобраћај, брзину возила, саобраћајну сигнализацију), зграде (висину, координате), линије и карактеристике терена и слично.

Према [39] модели се могу поделити у две основне категорије: емпиријски и теоријски. Емпиријски модели се ослањају на податке који се налазе у експерименталним базама података. Ови модели добро раде све док се посматрана ситуација налази у оквиру граница базе података. Теоријски модели зависе од способности да математички опишемо ситуације из стварног живота.

У [40] су коришћене методе предвиђања саобраћајне буке три различите земље: Турске, Немачке и Канаде. На основу наведених једначина се предвиђају нивои саобраћајне буке у односу на усвојену променљиву и резултати упоређују са резултатима студије локације.

У турско/француском методу предвиђања се користи формула [41]:

$$L_{eq} = 20 + 10 \cdot \log(Q_{VL} + E \cdot Q_{VP}) + 20 \cdot \log\left(d + \frac{l_c}{3}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{\theta}{180}\right) \quad (2.23)$$

Ова математичка формула је предложена у француском 'Guide du bruit' (GB), а пошто је Турска чланица OECD, прихваћена је иста једначина.

Параметри који се користе у једначини су [41]:

L_{eq} – ниво буке на d удаљености од пута

Q_{VL} – број лаких возила

Q_{VP} – број тешких возила

E – фактор акустичне еквиваленције између лаких и тешких возила

d – растојање до ивице пута

l_c – ширина коловоза

θ – угао под којим се види пут

У немачком методу се користи једначина из документа *Директива за заштиту од буке дуж путева (Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen-RLS-90)*, коју је објавио Одсек за изградњу путева Савезног министарства саобраћаја.

$$L_{m,A} = L_m^{(25)} + \Delta L_{st} + \Delta L_v + \Delta L_k + \Delta L_{stg} + \Delta A \quad (dBA) \quad (2.24)$$

Параметри који се користе у једначини су [39]:

$L_{m,A}$ – просечан ниво буке у друмском саобраћају

$L_m^{(25)}$ – референтна вредност нивоа буке на удаљености 25m од извора

ΔL_{st} – корекциони фактор за различите типове површине коловоза (за глатке коловозе вредност је нула)

ΔL_v – корекциони фактор за различите брзине кретања возила на путу, у зависности од учешћа тешких возила

ΔL_{stg} – корекциони фактор због подужног нагиба посматране деонице пута

ΔA – фактор корекције који зависи од растојања до осе пута.

Канадски метод предвиђања има две методе (STAMINA и ORNAMENT) које су одобрене од стране Министарства животне средине Онтарија и Министарства саобраћаја Онтарија. Следећа математичка формула је преузета из метода ORNAMENT и важи за рефлектујуће површине:

$$\begin{aligned}
 L_{eq} = & 10 \cdot \log(V_{ref}) + 10 \cdot \log(D_{ref}) \\
 & - 10 \cdot \log(S) - 25 \\
 & + 10 \cdot \log\left(P_A 10^{(L_o)_A/10} + P_{MT} \cdot 10^{\frac{(L_o)_{MT}}{10}} + P_{HT} 10^{\frac{(L_o)_{HT}}{10}}\right) \\
 & + 10 \cdot \log\left(\frac{D_{ref}}{D}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{V}{V_{ref}}\right) + 10 \cdot \log\left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{180}\right)
 \end{aligned} \quad (2.25)$$

Параметри који се користе у једначини су [42]:

V_{ref} – референтно саобраћајно оптерећење (број возила/сат)

D_{ref} – референтна удаљеност

S – брзина саобраћајног тока

$(L_o)_A, (L_o)_{MT}, (L_o)_{HT}$ – референтна енергија средње емисије звука аутомобила, средњих и тешких камиона

P_A, P_{MT}, P_{HT} – проценти аутомобила, средњих и тешких камиона

D – растојање између извора звука и пријемника

V – саобраћајно оптерећење (број возила/сат)

θ – нагиб дела пута на локацији пријемника

2.3.2 Алгоритми

Алгоритми за израчунавање нивоа буке се дефинишу помоћу стандарда, националних или међународних. У већини случајева ови алгоритми се користе само за одређене изворе буке. Изузетак представља ISO 9613 који се може применити на било који извор буке, ако су познати подаци о нивоу звучне снаге, зато што он одређује ниво буке на основу звучне снаге извора буке [1].

Алгоритми се углавном састоје од два модела. Први део садржи моделирање извора буке, а други простирање буке. Помоћу оваквог дводелног модела добија се ниво буке у посматраној тачки. Ови алгоритми су једноставни за прорачун, а могу се користити и рачунари, посебно у случајевима када се ниво буке рачуна за више извора или у више тачака.

За добијање довољно прецизних и тачних резултата при примени алгоритама за израчунавање нивоа буке треба дефинисати модел где су приказани извори буке,

изглед терена и димензије свих објеката који могу имати утицај на простирање буке. Затим се дефинишу тачке за израчунавање и добија укупни ниво буке у dB(A).

Први модел алгоритма даје вредност нивоа буке у референтној тачки која се налази на датом растојању од извора буке, помоћу једначине [1]:

$$L = L_W + G + C_T \quad (2.26)$$

где је:

L – ниво буке [dB]

L_W – ниво звучне снаге [dB]

G – индекс усмерености [dB]

C_T – корекција нивоа буке због временског ангажовања извора буке (ако извор није стално активан) [dB].

Други модел алгоритма израчунава слабљење при простирању, помоћу једначине [1]:

$$C = C_D + C_A + C_B + C_G + C_Z + C_R \quad (2.27)$$

где је:

C_D – корекција због дивергенције звучних таласа

C_A – корекција због апсорпције таласа, $C_A < 0$

C_B – корекција због баријере, $C_B < 0$

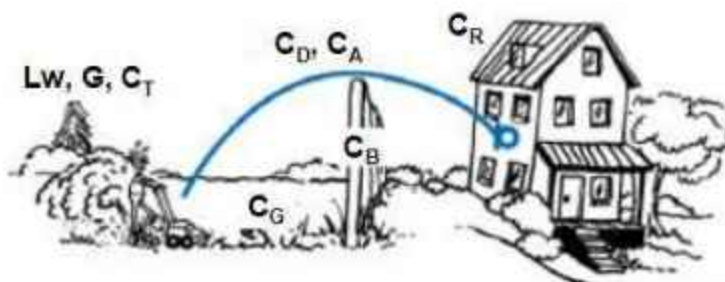
C_G – корекција због апсорпције терена, $C_G < 0$

C_R – корекција због рефлексија, $C_R > 0$

C_Z – корекција због зеленила, $C_Z < 0$

Када се примењује први модел, углавном све ове корекције имају негативне вредности, што значи да смањују ниво буке. Једино је корекција због рефлексије позитивна, што значи да се на месту пријема повећава ниво буке због рефлексије. Корекција због дивергенције звучних таласа може да има и негативну и позитивну вредност, у зависности од растојања тачке прорачуна до извора буке.

Тачност резултата при примени алгоритама зависи од националних база података о структурама извора буке, топографских података, структуре саобраћајног протока и слично. Исправна примена алгоритма даје прецизност која се креће у границама од 3 dB [1].



Слика 2.22. Корекције нивоа буке при њеном простирању [1]

2.3.3 Стандарди за прогнозу друмског саобраћаја

Када се говори о прогнози буке друмског саобраћаја, користе се различити национални стандарди, зато што не постоји један јединствени међународни стандард.

Користе се следећи стандарди:

- немачки RLS 90,
- аустријски RVS 3.02,
- француски NMPB,
- енглески CRTN и
- амерички FHWA.

Сви ови стандарди дају ниво буке у dB(A). Европска комисија препоручује у земљама Европске уније примену француског стандарда NMPB, али највише је у употреби немачки стандард [1].

RLS-90

RLS-90 (*Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen*) је немачки стандард за прогнозу друмског саобраћаја из 1990. године, који је у употреби у многим земљама. Овај стандард при дефинисању референтног нивоа буке, возила посматра као тачкасте покретне изворе. За ово израчунавање потребни су подаци о броју возила у току једног сата, брзини возила, нагибу пута, ако је већи од 5% и карактеристикама површине пута [1].

Референтни ниво буке се одређује на растојању 25m од осе саобраћајнице и на висини 4m у односу на терен, а акустички центар извора буке је на растојању 0,5m изнад површине коловоза [1].

Укупни референтни ниво буке који ствара друмски саобраћај на растојању 25m од линије извора и висини 4m у односу на подлогу прорачунске тачке добија се помоћу израза [1]:

$$L_0 = L_{0,E} + C_V + C_{Ng} + C_{PP} \quad (2.28)$$

где је:

$L_{0,E}$ – основни ниво буке друмског саобраћаја,

C_V – корекција због брзине возила,

C_{Ng} – корекција због нагиба пута,

C_{PP} – корекција због подлоге којом је обложен пут.

За брзину аутомобила од 100km/h и брзину камиона од 80km/h, основни ниво буке друмског саобраћаја се рачуна помоћу израза:

$$L_{0,E} = 37,3 + 10 \log[N \cdot (1 + 0,082 \cdot p)] \text{ [dB(A)]} \quad (2.29)$$

где је:

N – укупан број возила у току једног сата,

p – проценат камиона у укупном броју возила

Ако је нагиб пута већи од 5%, мора се извршити корекција, зато што се у тим условима повећава бука. Ова корекција се рачуна уз помоћ израза:

$$C_{Ng} = 0,6 \cdot |g| - 3 \text{ [dB(A)]}, \quad |g| > 5\% \quad (2.30)$$

где је:

g – нагиб пута, [%].

Подлога којом је обложен пут такође утиче на укупни ниво буке и вредности ових корекција су приказане у следећој табели.

Табела 2. Корекција због подлоге пута C_{PP} [1]:

Подлога пута	Максимално дозвољене брзине		
	30 km/h	40 km/h	≥50 km/h
Асфалт	0	0	0
Бетон	1.0	1.5	2.0
Калдрма са глатком текстуром	2.0	2.5	3.0
Калдрма са грубом текстуром	3.0	4.5	6.0

Ниво буке се може дефинисати посебно за путничка и теретна возила, односно, за аутомобиле и камионе.

Укупни референтни ниво на растојању 25m од линије извора и висини 4m изнад терена добија се сабирањем основних нивоа буке аутомобила и камиона и корекцијом због нагиба пута и карактеристика подлоге пута [1]:

$$L_0 = 10 \log(10^{0,1 \cdot L_{0,A}} + 10^{0,1 \cdot L_{0,K}}) + C_{Ng} + C_{PP} \text{ [dB(A)]} \quad (2.31)$$

Ниво буке на месту пријема се посебно одређује за дневни и ноћни период. Дневни период је од 6.00 до 22.00, а ноћни од 22.00 до 6.00 часова.

2.3.4 Слабљење нивоа буке при простирању

Звучни таласи се простиру од извора до пријемника буке и током тог кретања долази до промене нивоа буке. До појачања буке може доћи једино у случају рефлексије звучних таласа од површина на месту пријемника буке. У већини случајева долази до слабљења нивоа буке. Укупно слабљење нивоа буке се рачуна помоћу једначине која је објашњена у делу 2.3.2. Алгоритми.

$$C = C_D + C_A + C_B + C_G + C_Z + C_R \quad (2.32)$$

2.3.4.1 Корекција за утицај дивергенције таласа и апсорпције у ваздуху

Дивергенција, односно ширење таласног фронта се јавља током простирања звучних таласа и то доводи до слабљења нивоа буке. Једначине којима се може одредити корекција за утицај дивергенције звучних таласа и апсорпције звучних таласа у ваздуху су различите за различите изворе буке.

За друмски саобраћај ова једначина гласи [1]:

$$C_D = 15.8 - 10 \cdot \log s_{\perp} - 0.0142 \cdot s_{\perp}^{0.9} [dB] \quad (2.33)$$

где је $s_{\perp}$ - најкраће растојање од пријемне до емисионе тачке

2.3.4.2 Корекција за утицај апсорпције терена и метеоролошких утицаја

На слабљење нивоа буке утичу и апсорпционе карактеристике терена и метеоролошки услови. Корекција за утицај ових услова, такође, зависи од врсте извора буке.

За друмски саобраћај ова једначина гласи [1]:

$$C_G = -4.8 \cdot 10^{-\frac{1}{2.3} \left[\frac{h_m}{s_{\perp}} \left(8.5 + \frac{100}{s_{\perp}} \right) \right]^{1.3}} [dB] \quad (2.34)$$

где је:

h_m – средња висина линије која повезује тачке на месту извора и пријемника буке изнад конфигурације терена

$s_{\perp}$ - најкраће растојање пријемне до емисионе тачке.

Средња висина се одређује као однос површине изнад терена до линије видљивости извора и пријемника и најкраћег растојања извора и пријемника буке [1]:

$$h_m = \frac{F}{d} \quad (2.35)$$

Између извора и пријемника буке терен може бити раван и нераван. У зависности од врсте терена, постоје различити начини одређивања средње висине терена.

Када је терен раван, средња висина се одређује помоћу израза [1]:

$$h_m = 0,5(H_s + H_p) \quad (2.36)$$

Када терен није раван, било да су неравнине удубљења или испупчења, средња висина се одређује помоћу израза [1]:

$$h_m = 0,25(H_s + 2H_u + H_p) \quad (2.37)$$

Где је:

H_s – висина извора буке у односу на терен

H_p – висина пријемне тачке у односу на терен

H_u – висина најниже или највише тачке, у зависности од неравнина које постоје на терену, до линије видљивости извора и пријемника буке.

2.3.4.3 Корекција за утицај зелених густих засада

Зелени засади, такође могу имати утицај на смањење нивоа буке. Када звучни таласи пролазе кроз зелене засаде, долази до апсорпције истих и може се постићи смањење нивоа буке до максимално 5dB.

Ово смањење се може одредити помоћу израза [1]:

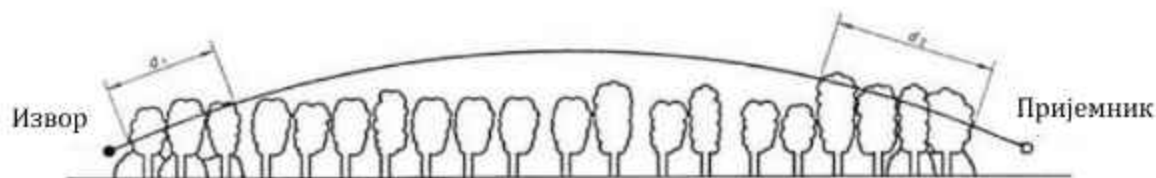
$$C_z = -0.06 \cdot d \text{ [dB]} \quad (2.38)$$

Где је:

d – дужина зеленог засада

Због закривљене путање простирања таласа, када се рачуна дужина зеленог засада, узима се да полупречник путање износи 5km. Пример одређивања ове дужине је приказан на следећој слици, а рачуна се према обрасцу [1]:

$$d = d_1 + d_2 \quad (2.39)$$



Слика 2.23. Пример одређивања дужине зеленог засада [1].

2.3.4.4 Корекција за утицај рефлексије

Рефлексија звучних таласа се јавља у случајевима када се саобраћајница налази између две рефлектујуће површине, као што су стамбени објекти или неке баријере, и она доводи до повећања буке на месту пријемника. Рефлектујуће површине могу

бити потпуно рефлектујуће или обложене апсорпционим материјалом и то утиче на повећање/смањење нивоа буке и рачуна се помоћу различитих израза.

Када су површине потпуно рефлектујуће, максимално повећање нивоа буке је 3,2dB и рачуна се по обрасцу [1]:

$$C_R = 4 \frac{h}{w} [dB] \quad (2.40)$$

Када су површине обложене апсорпционим материјалом, максимално повећање нивоа буке је 1,6dB и рачуна се по обрасцу [1]:

$$C_R = 2 \frac{h}{w} [dB] \quad (2.41)$$

Где је:

w – максимално растојање рефлектујућих површина

h - средња висина рефлектујућих површина

2.4 Оцена нивоа буке

Уопштено говорећи, ниво буке треба свести на прихватљиви ниво за различите људске активности. Међутим, прихватљиви ниво буке је субјективна категорија. Због тога су дефинисани неки објективни критеријуми како би се спровела оцена нивоа буке и њених утицаја у различитим ситуацијама. Дефинисане су и дозвољене вредности нивоа буке у зависности од намене простора, односно просторије.

Оцена нивоа буке се може одредити помоћу спектра буке (по октавама), помоћу укупног нивоа буке у dB(A) или на основу оба параметра.

2.4.1 Оцена на основу спектралног садржаја нивоа буке

Када се оцена нивоа буке одређује на основу спектра буке, критеријуми за оцену буке се дефинишу на основу њеног фреквенцијског спектра.

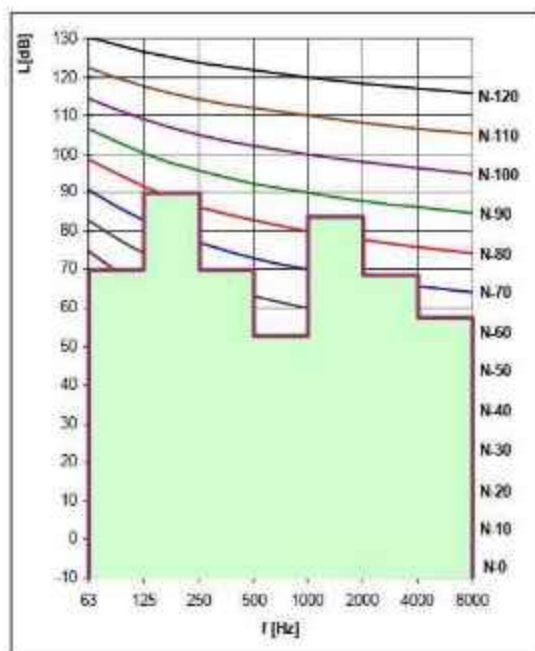
Фреквенцијски спектар буке се упоређује са нормативним кривама буке, односно N-кривама, које су приказане на слици 2.24. Ове N-криве приказују дозвољене нивое буке и њихове ознаке одговарају дозвољеној вредности на 1000Hz. Када су фреквенције различите од ове вредности, дозвољене вредности нивоа буке се одређују на основу номиналне ознаке нормативне криве, фреквенцијски зависних коефицијената (табела 2.3) и једначине [1]:

$$L(f) = a(f) + b(f)N \quad (2.42)$$

Где је:

N – номинална ознака нормативне криве

a, b – фреквенцијски зависни коефицијенти



Слика 2.24. Нормативне криве (N-криве) [1].

За посматрану буку се доноси оцена да је у дозвољеним границама ако ниво буке ни у једној октави не прелази дозвољене вредности које су одређене нормативним кривама. Нормативна крива се бира на основу намене простора у ком се бука јавља. Нормативна крива се може изабрати и на основу укупног нивоа буке, који се изражава у dB(A) , а такође и за одређену врсту делатности која се обавља.

Табела 3. Вредности коефицијената a и b за израчунавање дозвољених нивоа буке у функцији фреквенције [1]:

$f[\text{Hz}]$	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
$a[\text{dB}]$	35.5	22.0	12.0	4.8	0	-3.5	-6.1	-8.0
$b[\text{dB}]$	0.790	0.870	0.930	0.974	1.000	1.015	1.025	1.030

2.4.2 Оцена на основу укупног нивоа буке

Оцена нивоа буке се може одредити и помоћу укупног нивоа буке који је изражен у dB(A) . Овај поступак се углавном обавља применом А-тежинске криве. У већини земаља Европске уније користе се исти индикатори буке: меродавни ниво буке L_r за индустријску буку и L_{Aeq} за буку друмског и железничког саобраћаја [1].

Меродавни ниво буке представља меру изложености буци која се добија корекцијом измереног еквивалентног нивоа буке за факторе који појачавају негативне ефекте буке и који зависе од карактера посматране буке. Користи се за поређење измерених вредности са дозвољеним граничним вредностима и одређује помоћу обрасца [1]:

$$L_T = L_{Aeq} + K_I + K_T + K_t + K_R + K_S \quad (2.43)$$

Где је:

- L_T – меродавни ниво буке
- L_{Aeq} – измерени А-еквивалентни ниво буке
- K_I – корекција за импулсни карактер буке
- K_T – корекција за тонални карактер буке
- K_t – корекција за трајање буке
- K_R – корекција за период дана
- K_S – корекција за одређене изворе и ситуације.

За одређивање вредности корекције за импулсни карактер буке постоје различите методе и вредности. Користе се и субјективне и објективне методе, а вредности се крећу од 3dB до 10 dB, у зависности од државе у којој се примењују [1].

Вредности корекције за тоналне компоненте се налазе у опсегу од 2dB до 6dB [1]. Различите државе користе различите вредности. Такође, вредности се могу одредити субјективном оценом или мерењем нивоа буке.

Корекција за период дана је уведена као додатна корекција због зависности нивоа и утицаја буке од периода дана. Измерени ниво буке се коригује за $K_R = 5dB(A)$ за вечерњи период, односно $K_R = 10dB(A)$ за ноћни период [1].

Корекција за трајање буке се уводи када је трајање посматране буке краће од референтног временског интервала, односно периода током којег се врши оцењивање буке и одређује се изразом [1]:

$$K_t = 10 \log \frac{t}{T} \quad (2.44)$$

Где је:

- t – трајање буке
- T – референтни временски интервал или период у ком се оцењује бука

У земљама Европске уније се, поред меродавног нивоа буке, препоручује и употреба кумулативног индикатора за оцену нивоа буке у току свих 24 сата током дана и одређује се изразом [1]:

$$L_{den} = 10 \log \frac{1}{24} \left(12 \cdot 10^{0.1 \cdot L_{day}} + 4 \cdot 10^{0.1 \cdot (L_{evening} + 5)} + 8 \cdot 10^{0.1 \cdot (L_{night} + 10)} \right) \quad (2.45)$$

Где је:

- $L_{day} [dB(A)]$ – ниво буке у дневном периоду (07h-19h)

$L_{evening} [dB(A)]$ – ниво буке у вечерњем периоду (19h -23h)

$L_{night} [dB(A)]$ – ниво буке у ноћном периоду (23h – 07h).

Границе дозвољених нивоа буке нису дате у међународним стандардима и европским директивама, већ то одређују национални стандарди, тако да се ове вредности разликују у различитим државама.

У нашој држави су посебним прописима дефинисане дозвољене вредности за све врсте извора буке. Мередавни ниво буке се одређује помоћу модификоване једначине:

$$L_T = L_{Aeq} + K_I + K_T + K_t \quad (2.46)$$

Дозвољени ниво буке је дефинисан стандардом СРПС У. Ј6. 205 [16], а највиши дозвољени ниво буке је дефинисан Правилником о дозвољеном нивоу буке у животној средини [17].

ПОГЛАВЉЕ
3

**АНАЛИЗА САВРЕМЕНИХ РЕШЕЊА
САОБРАЋАЈНИХ ЗВУЧНИХ БАРИЈЕРА**

Постоји много различитих захтева које је потребно испунити за решавање проблема буке коју изазива саобраћај. Због тога је током времена развијен велики број различитих баријера. Звучна енергија која долази до баријере може се апсорбовати, рефлектовати или пренети кроз баријеру. Зато треба одабрати одговарајућу врсту баријере и материјал од кога се прави баријера у зависности од локације и услова изградње. На основу свих тих карактеристика у доступној литератури наведене су различите класификације баријера. Основна подела је на следеће две групе:

- према начину дејства и
- према облику.

3.1 Типови баријера према начину дејства

У ову групу баријера спадају акустичне баријере и оне се могу поделити у следеће подгрупе: а) апсорпционе, б) рефлексионе, в) реактивне (баријере са акустичким резонаторима) и г) комбиноване (сл. 3.1).



Слика 3.1. Типови баријера према начину дејства

3.1.1 Апсорпционе баријере

Апсорпционе баријере се заснивају на принципу апсорпције звука, где се звук који удара у панеле баријере апсорбује помоћу порозног звучно апсорпционог материјала. Када се звук апсорбује, он се претвара у топлоту у материјалу баријере, чиме се смањује ниво буке у околини. Материјали који се користе су обично порозни и отворене структуре попут минералне вуне, стаклене вуне, полиуретанске пене или других акустичких пенастих материјала. Ове баријере могу бити једностране и двостране. Код једностраних баријера, апсорпциони слој је најчешће на површини, која је углавном профилисана, чиме се повећава површина и максимално апсорбује звук. Апсорпциони материјал код двостраних баријера је најчешће у облику „сендвич“ панела. Носачи панела су стубови од челика или бетона и страна која је окренута извору буке је перфорирана. Ове баријере се најчешће постављају са обе стране пута.

Могу се правити од дрвених влакана и грануларног бетона, дрвета, метала, пластике, цигле и слично, па је у литератури честа подела на [43]:

- металне (сендвич) апсорпционе баријере,
- дрвене сендвич апсорпционе баријере,
- бетонске апсорпционе баријере и
- PVC апсорпционе баријере.

На слици 3.2 су приказани примери апсорпционих баријера.



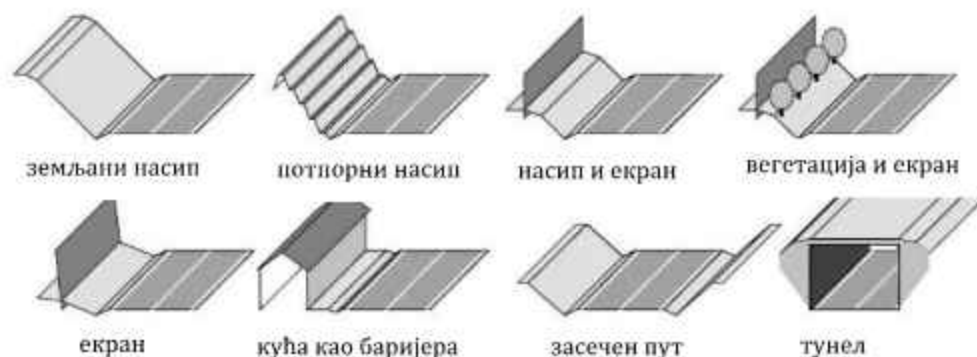
Слика 3.2. Примери апсорпционих баријера: а) алуминијумска, б) дрвена, в) бетонска [24], [43]

Предности апсорпционих баријера су у њиховој ефикасности у смањењу нивоа буке, лакој монтажи у односу на друге типове баријера, способности да се прилагоде различитим окружењима и условима и др. С друге стране, ове баријере могу бити знатно скупље и захтевају редовно одржавање и чишћење како би задржале своју апсорпциону способност.

3.1.2 Рефлексионе баријере

Рефлексионе баријере су баријере од којих се звучни талас рефлектује назад ка извору. Оне се састоје од равне површине која се поставља између извора буке и места које се жели заштитити. Обично се израђују од чврстих материјала као што су: бетон, челик или алуминијум. Звук удара у ову равну површину и велики део се рефлектује назад ка извору, чиме се смањује ниво буке у окружењу, али зато може доћи до повећања буке на саобраћајници. Овај проблем се може решити закошењем баријере тако да рефлектовани талас пролази изнад пријемника.

У овој групи баријера налазе се и баријере код којих се модификује горњи крај тако да се направе широки равни врхови или више вертикалних ивица. Баријере које имају побољшане карактеристике у односу на обичне рефлексионе баријере, могу се груписати на начин како је приказано на следећој слици.



Слика 3.3. Различити типови рефлексионих баријера [44]

Рефлексионе баријере могу бити непровидне и провидне (транспарентне). Транспарентне баријере дају потпун или делимичан поглед кроз баријеру. На слици 3.4. а) је приказ полутранспарентне баријере која поред визуелног ефекта обезбеђује природну светлост дуж пешачке стазе.

Транспарентне баријере за заштиту од буке се граде од ламинираног, каљеног или ојачаног стакла или од акрилних или поликарбонатних плоча. Дебљине плоча су обично 8-19 mm за стакло и 15-20 mm за акрил и поликарбонат. Димензије плоча се разликују у зависности од тога који произвођач их производи. Акрилне плоче се могу обрађивати на лицу места, док стакло углавном не може [24].



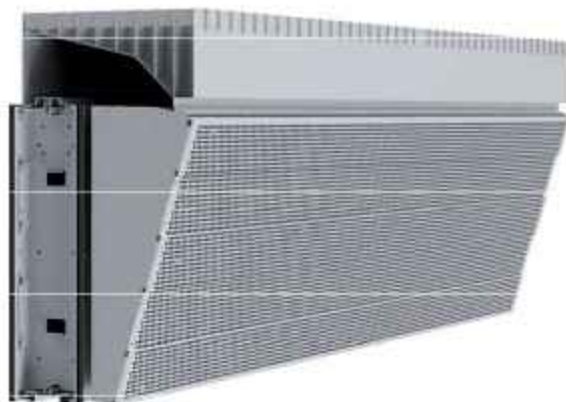
Слика 3.4. Примери транспарентних баријера [24], [44]

Акрилне плоче могу бити закривљене. Такође, и стаклене преграде могу да се савијају да би се постигао жељени профил баријере. Акрилне плоче се могу обојити, а стакло може бити тонирано и угравирано. Ово су материјали који имају визуелну неутралност тако да имају веома мали утицај на пејзаж и изглед околине. Зато оба ова материјала имају велику примену широм Европе.

3.1.3 Баријере са акустичким резонаторима

Ове баријере имају уграђене акустичке резонаторе или шупљине које служе за ублажавање фреквенције буке. Акустички резонатор се састоји од затворене цеви или посуде са отворима која је испуњена стакленим влакнима или перфорираним

лимовима. Када звук погоди баријеру, он ствара таласе који се крећу кроз акустичке резонаторе. Ови таласи се међусобно ометају и стварају таласни облик који одбија звук уназад према извору, чиме се смањује ниво буке који допире до околине. У литератури се ове баријере често сврставају у групу апсорпционих јер апсорбују део акустичке енергије [43].



Слика 3.5. Пример акустичког резонатора [45]

Баријере са резонаторима су ефикасне у смањењу нивоа буке, естетски су привлачне и отпорне на временске услове. Међутим, знатно су скупље од апсорпционих и рефлексионих баријера, знатно су теже и захтевају више простора за постављање.

3.1.4 Комбиноване баријере

У зависности од захтева, честа је комбинација баријера са различитим начинима дејства. Комбинација рефлексионих и апсорпционих звучних зидова може бити веома ефикасна у смањењу буке у окружењу. Најчешћа је комбинација звучног зида од апсорпционих и транспарентних рефлексионих панела. Осим тога, срећу се комбинације са резонаторима, са биљним засадама, са соларним панелима и сл.



Слика 3.6. Пример комбинације резонатора и соларних панела [46]

3.2 Типови баријера према облику

Подела баријера према облику је приказана на слици 3.7.



Слика 3.7. Типови баријера према облику

3.2.1 Земљани насипи и бедеми

Земљани насипи и бедеми се граде од природног материјала као што је: песак, камен, шљунак и земља, са или без вегетације која расте на њој. Ове баријере су међу најефикаснијим баријерама за заштиту од саобраћајне буке, посебно у руралним или шумским подручјима где је доступно адекватно земљиште.

На основу висине, ове баријере су подељене у четири категорије и то су: земљани насипи или бедеми мале висине ($0+2\text{m}$), средње висине ($2,5+3\text{m}$), високе ($3,5+4,5\text{m}$) и веома високе ($>4,5\text{m}$). Доказано је да је висина земљаног насипа од $0,3\text{ m}$ еквивалентна висини од $0,35\text{ m}$ висине структуралног зида по основу способности смањења буке [43]. Такође, различите врсте вегетације се могу посадити на овим баријерама.

Ове баријере се могу класификовати на земљане насипе и бедеме без засада и са засадима (слика 3.8).



Слика 3.8. Пример земљаног насипа, без засада [38] и са засадом [47]

Земљани насипи имају знатне предности у односу на друге баријере и то: могу имати 'природан' изглед, стварају осећај отворености за разлику од вертикалног или конзолног зида, обично не захтевају додатне сигурносне ограде, углавном коштају мање, могу бити јефтиније за одржавање и имају неограничен животни век [24].

Најчешће се граде од вишка материјала који се налази на самој локацији баријере што позитивно утиче на цену баријере. Што се тиче простора, ове баријере заузимају више места него зидне баријере. То је због косих страна које имају постепен нагиб ради стабилности конструкције. Код већине земљаних бедема нагиб је 2:1 (2 m хоризонтално – 1 m вертикално) [38].

3.2.2 Звучни зидови (акустички екрани)

Звучни зидови се још називају и акустички екрани и могу бити вертикални и конзолни. Већина њих се производи ван локације на којој се постављају. Овај тип баријере има задатак да спречи видљивост између извора и пријемника буке. Зато, ове баријере морају бити одређене висине, а морају имати и одређену дужину.

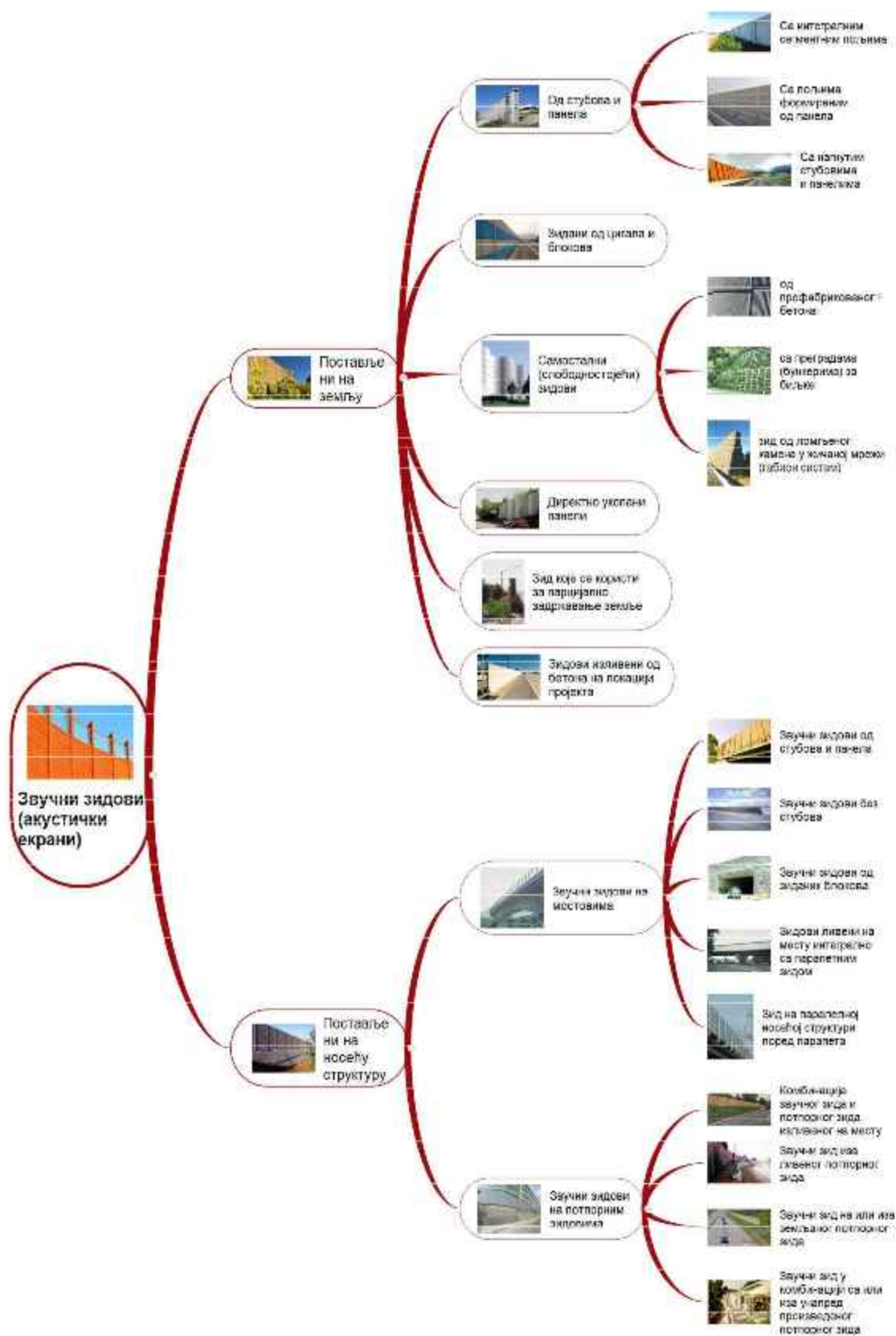
У зависности од места монтаже, звучни зидови се могу поделити у две групе:

- постављени на земљу и
- постављени на носећу структуру.

3.2.2.1 Звучни зидови постављени на земљу

Баријере за заштиту од буке које спадају у ову групу су баријере које су постављене на тло, односно на земљу. Могу се класификовати у следеће категорије [25]:

- звучни зидови од стубова и панела,
- звучни зидови зидани од цигала и блокова,
- самостални (слободностојећи) зидови,
- директно укопани панели,
- зидови који се користе за парцијално задржавање земље и
- зидови изливени од бетона на локацији пројекта.



Слика 3.9. Класификација звучних зидова

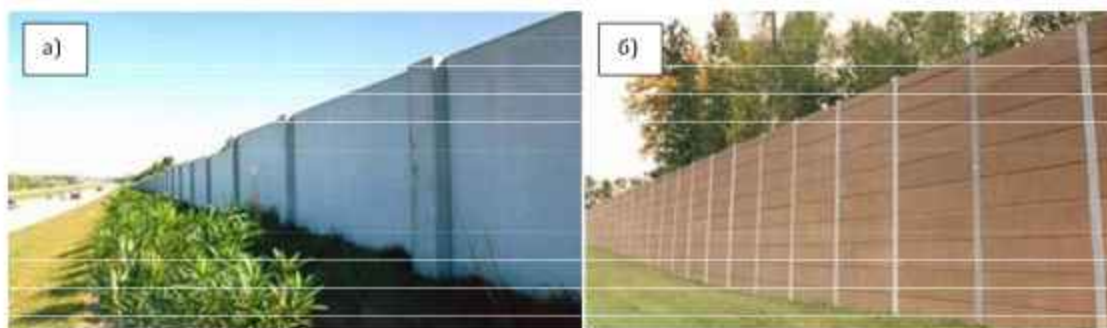
3.2.2.1.1 Звучни зидови од стубова и панела

Ови звучни зидови су направљени од панела који се налазе између стубова који су постављени на темељима. Елементи који се користе за изградњу ових баријера су: панели, стубови, темељи и везивни елементи.

Звучни зидови од стубова и панела се могу поделити на:

- звучне зидове са пољима од интегралних сегмената,
- звучне зидове са пољима формираним од панела који се слажу један на други, и
- звучне зидове са нагнутим стубовима и панелима.

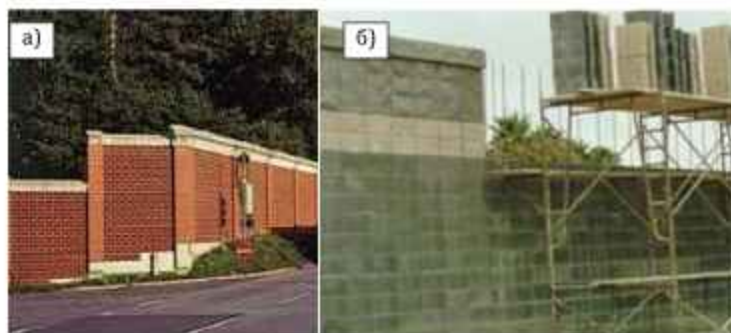
Панели се углавном производе у фабрикама, а затим транспортују на место постављања баријере за заштиту од буке. Величина зидова и панела зависи од дужине предвиђене баријере. Панели се могу правити од различитих материјала (челик, бетон, дрво и сл.) који не мора бити исти као материјал који се користи за стубове. Сегментно поље може бити интегрално које се састоји од једног панела пуне висине (слика 3.10. а) или састављено од више панела који се слажу на месту изградње баријере (слика 3.10. б).



Слика 3.10. Панели: а) пуне висине, б) слагани од сегмената [25]

3.2.2.1.2 Звучни зидови зидани од цигле/блокова

Ове баријере се граде на класичан начин слагањем цигли или грађевинских блокова на постоље (темељ) које служи као основа. Изглед ових баријера је приказан на слици 3.11.



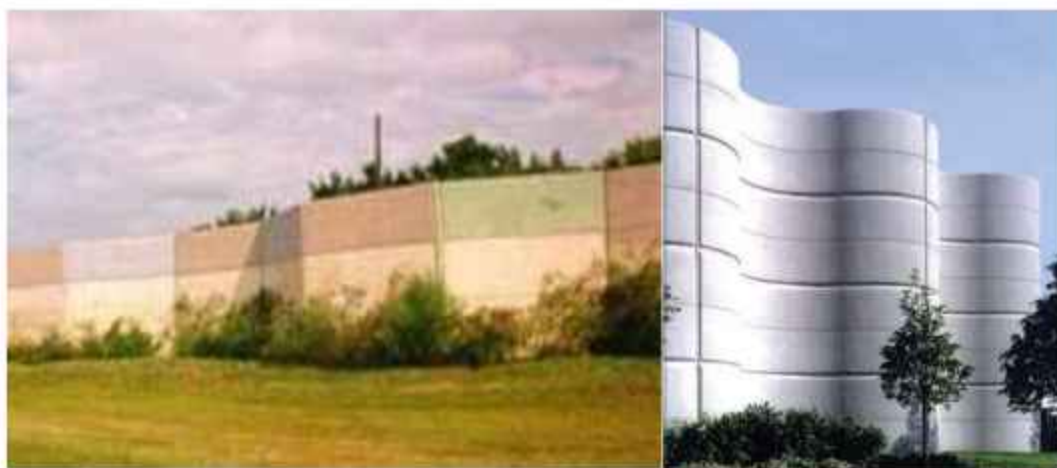
Слика 3.11. Примери баријера зиданих од цигле и блокова [24], [25]

3.2.2.1.3 Самостални (слободностојећи) зидови

Самостални (слободностојећи) зидови су баријере код којих се не морају користити стубови, јер они имају сопствену стабилност. Могу се поделити на следеће групе:

- зидови од префабрикованог бетона,
- зидови са преградама (бункерима) за биљке и
- зидови од ломљеног камена у жичаној мрежи (габион систем).

Зидовима од префабрикованог бетона стабилност даје њихова маса и начин постављања. Постављање подразумева одговарајућу конфигурацију: цик-цак, трапезоидну, валовиту и сл. Као подршка може се користити сабијена земља, камена, бетонска или армирано бетонска подлога.



Слика 3.12. Префабриковани самостојећи бетонски зидови за заштиту од буке [24], [25]

Зидови са преградама (бункерима) за биљке су баријере које се праве од бетонске, дрвене или пластичне решеткасте конструкције у облику шкољке (љуске) која се напуни земљом и у њу посади вегетација. Могу се поставити директно на земљу или на бетонску подлогу, као потпору. Треба пажљиво изабрати биљке за засад, а такође и обезбедити адекватно одржавање током свих годишњих доба, обезбедити адекватно заливање, уклањање корова и слично.



Слика 3.13. Самостојећи бетонски зидови са биљним засадима [25]

Зидови од ломљеног камена у жичаној мрежи (габион систем) су, такође, самостојећи зидови које чине кавези направљени од жичане мреже испуњени ломљеним каменом (слика 3.14). Ови кавези се постављају на добро збијено тло и затим слажу један на други. Баријера обично треба да буде прилично широка и висока да би била ефикасна. Потврђено је да габионска баријера ширине 1 m са довољном висином може изоловати звук до 60dB. Габионски зидови се могу дизајнирати у различитим облицима како би се естетски уклопили са природом места где се постављају [43].



Слика 3.14. Примери габионских баријера [25], [43]

Постоје и комбинације ових баријера, као што је приказано на следећој слици. Велика земљана баријера са габионском баријером на врху побољшава смањење буке због тврде дифракционе ивице на врху баријере.



Слика 3.15. Земљана баријера са габионском баријером на врху [24]

3.2.2.1.4 Директно укопани панели

Код овог типа баријера, панели су углавном пуне висине и имају бочна оклебљења због међусобног повезивања. Један крај панела се закопава у земљу и нема никаквих средстава за подршку, нема темеља, ни стубова. Код ових баријера не може се добити раван профил на врху зида, због неједнаког слегања по дужини сваког панела, нагињања и раздвајања. Због тога, приликом пројектовања овог

система, треба узети у обзир назубљени профил. У неким случајевима ово диференцијално слегање није равномерно по целој дужини сваког панела што узрокује нагињање панела и доводи до раздвајања и размака на вертикалним спојевима жлебова.



Слика 3.16. Директно укопани панели [25]

3.2.2.1.5 Зид који се користи за парцијално задржавање земље

На местима где постоји нагиб или где су путеви усечени, ове баријере могу бити врло корисне, јер својим доњим делом могу задржавати земљу. Ово задржавање земље је могуће и са стамбене и са коловозне стране. Потребно је водити рачуна о дренажи, кроз рупе у зидовима или на неки други начин, јер вода може ослабити баријеру. Такође, доњи делови панела треба да буду довољно чврсти да могу држати земљу. Дубина темеља за зид баријере, која је обично довољна, је до 500 mm [25]. Потребна је пажљива структурна анализа система како би се осигурало да доњи део код панела пуне висине или доњи панели у систему наслаганих панела буду довољно чврсти да задрже тло (слика 3.17.).



Слика 3.17. Примери зида за парцијално задржавање земље [25]

3.2.2.1.6 Зидови изливени од бетона на локацији пројекта

Ове баријере се праве на локацији пројекта, односно, на месту где треба и да стоје. Сви поступци, од изградње до инспекције и контроле квалитета, се обављају на

терену током и након изградње. Процес изградње обухвата активности од копања темеља па до завршне обраде површине и очвршћавања. Овај систем се знатно разликује од начина изградње осталих баријера. Површинске текстуре које се добијају посебним техникама, овде није могуће спровести јер, због постављања облога и уметака у вертикалном положају, долази до повећања несавршености површине зида. Такође, и примена хемикалија на вертикалним радним површинама је тежа и све то утиче неповољно на површинску текстуру.



Слика 3.18. Пример зида од бетона изливеног на месту пројекта [25]

3.2.2.2 Звучни зидови постављени на носећу структуру

Постоје два основна типа звучних зидова постављених на носећу структуру:

- звучни зидови на мостовима и
- звучни зидови на потпорним зидовима.

3.2.2.2.1 Звучни зидови на мостовима

Технике за постављање баријера на мостовима који већ постоје и на новим мостовима, који су у изградњи, су различите али та разлика није толико велика, тако да се може описати један заједнички начин постављања, који подразумева следеће подврсте ове групе баријера:

- звучни зидови од стубова и панела,
- звучни зидови без стубова,
- звучни зидови од зиданих блокова,
- зидови ливени на месту интегрално са парапетним зидом и
- зидови на паралелној носећој структури поред парапета.

Код звучних зидова од стубова и панела, постављање панела између стубова се може обавити на врху парапета, уметнуто у парапет и са спољне стране парапета.

Прикључци на врху парапета обично укључују завртње велике чврстоће уграђене у парапет. Код новоградње, такви завртњи се често постављају у парапетне оплате пре изливања бетона. У већ постојећим парапетима, вијци се могу анкерисати механичким причвршћивањем или хемијским спајањем (епоксидна маса). У зависности од врсте материјала за звучне зидове, ови анкерисани вијци и навртке

високе чврстоће се користе за причвршћивање хоризонталне греде или вертикалних стубова за парапет. Зидни панели се затим причвршћују за греду или стубове [25].

Метода постављања панела уметнуто у парапет се користи само за нове мостове. Иако није уобичајена техника причвршћивања, стубови су уметнути у сам парапет (било пре ливења парапета или после ливења парапета) уметањем у префабриковане рупе унутар самог парапетног зида. Постављање панела са спољне стране парапета је погодно и за постојеће и за нове мостове, а посебно је погодно за накнадну уградњу у постојеће мостове. Ово је прилично уобичајена метода. На баријерама које су изграђене као део нове конструкције моста, плоча моста се може продужити изван спољне ивице парапета, пружајући додатну потпору без оптерећења за баријеру [25].



Слика 3.19. Примери звучних зидова на мостовима [25]

Код звучних зидова без стубова, директно постављање панела, без помоћи стубова се може извести на врху или на спољној страни парапета. Постављање на врху парапета је слично онима код зидова од стубова и панела. Панели, који су обично направљени од релативно лаганих материјала, причвршћени су вијцима на два паралелна угаона комада гвожђа монтирана на парапет. Код постављања на спољној страни парапета, сами панели су причвршћени за или кроз парапет.

Звучни зидови од зиданих блокова се постављају слично као звучни зидови зидани од блокова постављени на земљи, с тим, што се причвршћују за заштитни бетонски парапетни зид моста. Причвршћивање се врши преко арматурних шипки које се протежу од врха парапетног зида. Звучни зид може се додатно ојачати уметањем арматурних шипки и бетона у шупљине зиданих блокова.

Зидови ливени на месту интегрално са парапетним зидом су погоднији тамо где ниске баријере могу да обезбеде жељено пригушење буке или у ситуацијама када то може бити једина могућа опција због ограничења у постављању било које друге врсте система баријера.

Зид на паралелној носећој структури поред парапета није тако уобичајен као претходно наведени звучни зидови. Овај систем је посебно погодан за старије или ослабљене мостове, где конструкција није у стању да издржи оптерећења. Носећа греда или слична конструкција може се изградити непосредно уз постојећу конструкцију.

3.2.2.2.2 Звучни зидови на потпорним зидовима

У случајевима када је суседно земљиште ниже од аутопута или је аутопут усечен у односу на суседно земљиште потребно је изградити потпорне зидове чији је задатак да задржи део аутопута или земљиште. Овде постоји опција изградње земљаног насипа или бедема, али када то није могуће, приступа се изградњи потпорног зида.

Постоји неколико начина постављања звучних зидова на ове носеће конструкције [25]: постављање звучних зидова на потпорни зид и постављање звучних зидова близу потпорних зидова.



Слика 3.20. Пример звучног зида на потпорном зиду [25]

Постоје следеће варијанте ових звучних зидова:

- комбинација звучног зида и потпорног зида изливеног на месту,
- звучни зид иза ливеног потпорног зида,
- звучни зид на или иза земљаног потпорног зида,
- звучни зид у комбинацији са или иза унапред произведеног потпорног зида.

Код *потпорног зида изливеног на месту* неопходна висина баријере за заштиту од буке може се постићи на следеће начине: продужавањем висине потпорног зида као наставка конструкције ливене на месту, постављањем стубова и панела, зидањем зида од цигле (дограђивање зида на врху потпорног зида) или причвршћивањем на бочне стране потпорног зида коришћењем сличних метода као код звучних зидова на мостовима. Без обзира на то да ли је потпорни зид нов или постојећи, конструкција мора бити способна да издржи додатна оптерећења.

Постављање зида за заштиту од буке иза *потпорног зида изливеног на месту* (слика 3.21.) захтева пажљиво разматрање преноса оптерећења и на земљу иза потпорног зида и на сам потпорни зид.



Слика 3.21. Примери постављања звучног зида: а) на потпорни зид и б) иза потпорног зида [25]

Постоје различити системи *потпорних зидова* који се састоје од *унапред произведених материјала* као што су префабриковани бетон, металне и пластичне компоненте које се склапају на лицу места (слика 3.22.). Неки од ових система могу такође укључити земљу у своју структурну облогу. Уопштено говорећи, звучни зидови за заштиту од буке не могу се поставити директно на врх ових система.



Слика 3.22. Примери звучног зида у комбинацији са или иза унапред произведеног потпорног зида [25]

3.2.3 Комбиноване баријере

Звучне баријере се могу направити као комбинација различитих врста звучних зидова, земљаних насипа, вегетације и слично, тако да се ове баријере могу поделити на следеће подврсте: а) комбинација земљаних насипа и звучних зидова, б) комбинација звучних зидова са вегетацијом, в) комбинација апсорпционог и транспарентног зида и г) баријере са соларним панелима (слика 3.23).



Слика 3.23. Типови комбинованих баријера

3.2.3.1 Комбинација земљаних насипа и звучних зидова

Код звучних баријера које су комбинација звучних зидова и земљаних насипа, потребна висина баријере се добија тако што се направи земљани насип до одређене висине, а затим се поставља звучни зид на тај насип. При изградњи ових баријера треба водити рачуна о утицају звучног зида на земљани насип са аспекта статике и простору који је потребан за изградњу ових баријера. Такође, треба направити плато на врху насипа на ком се поставља звучни зид.



Слика 3.24. Примери комбинације звучних зидова и земљаних насипа [48]

3.2.3.2 Комбинација звучних зидова са вегетацијом

Комбинација звучних зидова са вегетацијом су баријере чији саставни део чине засади биљака. Велики део развоја ових баријера је био у Европи током 1990-тих година, посебно у Холандији [24]. Код ових баријера постоји потреба за периодичним одржавањем и наводњавањем. Развијен је низ баријера природног изгледа које нуде алтернативу земљаним насипима. Ове баријере, такође стварају станишта за мале сисаре и инсекте.



Слика 3.25. Пример комбинације звучног зида са вегетацијом [24]

3.2.3.3 Комбинација апсорпционог и транспарентног зида

Код баријера које су комбинација апсорпционог и транспарентног зида, транспарентни делови се најчешће комбинују изнад других панела како би се визуелно променио изглед баријере. Ове баријере обезбеђују више светла, прегледније су за учеснике у саобраћају а и привидно се смањује висина баријере.



Слика 3.26. Пример комбинације апсорпционог и транспарентног зида [24]

3.2.3.4 Баријере са соларним панелима

Баријере за заштиту од буке са соларним панелима представљају релативно новији начин за заштиту од саобраћајне буке. Тренутно постоји мали број оваквих баријера, због великих трошкова израде. Ово су веома практичне и вишеструко корисне баријере. Соларни панели се могу поставити на земљане насипе, на тунеле, као део звучног зида или као конзолни део баријере.



Слика 3.27. Пример баријере са соларним панелима [49]

3.2.4 Тунели

Овај тип баријере је најефикасније средство за заштиту од саобраћајне буке. У подручјима где је велики ниво буке, ове баријере су главно решење проблема. Проблем са њиховом применом је веома висока цена. Тунелске баријере се могу конструисати као лаке конструкције које обезбеђују слабљење буке, али и као масивне структуре које могу да обезбеде да се користи простор изнад њих у разне сврхе (интегрисани у објекте). У складу с тим, постоје три основна типа ових баријера: полуотворени, затворени и интегрисани у објекте.



Слика 3.28. Основни типови тунела



Слика 3.29. Пример тунелске баријере: а) прилаз и б) изглед изнутра [24]



Слика 3.30. Тунелска баријера комбинована са соларним панелима [50]

3.2.5 Звучне баријере интегрисане у постојеће објекте

Звучне баријере могу бити интегрисане у објекте који већ постоје на датој локацији као нека корисна карактеристика. То значи да баријера може бити неки магацин, гаража, део фабрике, и то је њен први задатак, а уједно је и баријера за заштиту од буке.

Најчешће су то: транспарентни зидови монтирани између зграда, конзоле које се уграђују на објекте и постојећи или посебни објекти који уједно служе и као баријере за заштиту од буке.



Слика 3.31. Врсте звучних баријера интегрисаних у постојеће објекте

3.2.5.1 Провидни зидови (фасаде)

Баријере за заштиту од буке у виду *транспарентних (провидних) зидова* се монтирају између стамбених објеката као стаклене фасаде како би спречили продор саобраћајне буке у простор између зграда. Интегрисане су у стамбену структуру тако да не нарушавају урбану естетику града.



Слика 3.32. Пример стаклене фасаде интегрисане са стамбеним објектима [51]

3.2.5.2 Конзоле

Конзоле су баријере које се праве у различитим облицима и величинама, од различитих материјала, у зависности од функције коју треба да задовоље. Код ових баријера потребни су чвршћи и сложенији темељи и потпоре него код других баријера, што утиче на повећање трошкова. Конзолне баријере имају предност у случају када их је могуће интегрисати у већ постојеће стамбене или јавне објекте (слика 3.33).



Слика 3.33. Примери конзолних баријера интегрисаних у постојеће објекте [24]

3.2.5.3 Објекти као баријере

Постојећи објекти се понекад могу користити и у функцији заштите од буке. У руралним подручјима то су обично неке просторије за складиштење на крају дворишта окренуте ка путу, а у урбаним простори за паркинг, комерцијални простори, који штите стамбене зграде од буке, као што је приказано на наредној слици.



Слика 3.34. Примери објеката као баријера [24]

3.2.6 Специјални облици

Архитекте и уметници али и научници са сасвим новим приступима заштити од буке су допринели великој шареноликости облика саобраћајних звучних баријера. Најчешће се срећу: степенести (цик-цак) панели, конзолни, специјални облици од комплексних профила, специјални цевни апсорбери и специјални облици са допунским елементима (слика 3.35).



Слика 3.35. Специјални облици саобраћајних звучних баријера

3.2.6.1 Степенасти (цик-цак) панели

Ова врста баријере се разликује од слободностојећих звучних зидова који се постављају у „цик-цак“. Код ових баријера попречни пресек панела има „цик-цак“ изглед, као што је приказано на сл. 3.36. Предност оваквог попречног пресека је у добром расипању звучних таласа.



Слика 3.36. Пример степенастог „цик-цак“ зида [24]

3.2.6.2 Конзолни облици

Конзоле су баријере које се савијају, спуштају ка извору буке и изнад извора буке. Оне имају више предности у односу на обичне вертикалне баријере, као што су:

- смањење укупне висине баријере лоцирањем врха баријере ближе извору буке,
- смањење утицаја на посматрача са стране,
- могућност за специфична конструктивна решења,
- могућност формирања делимичног тунела.

Ове баријере се праве од различитих материјала и могу се значајно разликовати у висини и величини. Могу бити и апсорпционе и рефлексионе.



Слика 3.37. Примери конзолних баријера [24]

3.2.6.3 Специјални облици од комплексних профила

Специјални облици од комплексних профила показују да баријера за заштиту од буке није само обична ограда, већ архитектонско обележје. Када баријера има вертикални профил, изгледа као да је зид или ограда. Када постоје нагиби, углови, кривине, стиче се утисак да је у питању нешто друго. Комплексност профила, поред естетског изгледа, отвара простор и побољшава видљивост, посебно ако је горњи део провидан.

Нови приступи дизајну баријере у стамбеном окружењу нуде звучне баријере високих перформанси које су естетски привлачне, еколошки одрживе и визуелно динамичне. Обично се користе модуларне форме као што су шестоугаони облици које се могу лако прилагодити сложености баријере и јединственим условима на локацији. Модуларни делови (ћелије) се испуњавају различитим акустичким материјалима, разним врстама биљака, колекторима соларних панела, панелима са расветним телима, графичким панелима са информацијама и сл.



Слика 3.38. Пример баријере специјалног облика на конкурс за саобраћајну звучну баријеру у Хонг Конгу [52]

3.2.6.4 Специјални цевни апсорбери

Већина металних апсорбујућих баријера је равна или једноставно профилисана. Постоје и апсорпционе баријере са округлим, цевним деловима, који су међусобно близу постављени. На слици 3.39. приказане су баријере са специјалним

апсорберима од перфорираних алуминијумских цеви од 3 до 6 метара висине. Овај принцип се користи у Холандији где је дуж аутопута А2 у близини Ајндховена постављена баријера са цевним апсорберима у дужини преко 4 km.



Слика 3.39. Пример специјалних цевних апсорбера [53]

3.2.6.5 Специјални облици са додатним елементима

Специјални облици баријера са додатним елементима су баријере савременог изгледа, високе технологије, и углавном су врло прикладне у урбаним срединама, на главним саобраћајницама. На равним линијама баријере додају се елементи који су у супротности са основном површином и дају осећај динамичности. Ти додаци могу бити: мрежасте оквири, цеви, криволинијски облици, различити неравномерно распоређени облици, итд.



Слика 3.40. Примери специјалних облика баријера са додатним елементима [24]

3.2.7 Привремене звучне баријере

Привремене звучне баријере се користе:

- за смањење нежељене буке са градилишта у урбаним срединама,
- за изоловање извора буке од компресора, агрегата и сл. који се привремено користе на одређеној локацији и
- за смањење буке у индустријским објектима.

Основна предност ових баријера се огледа у њиховој флексибилности, мобилности и уштеди трошкова. Велики је број разноврсних модела које се користе у наведеним случајевима. За потребе овог рада класификовани су у 4 групе (слика 3.41).

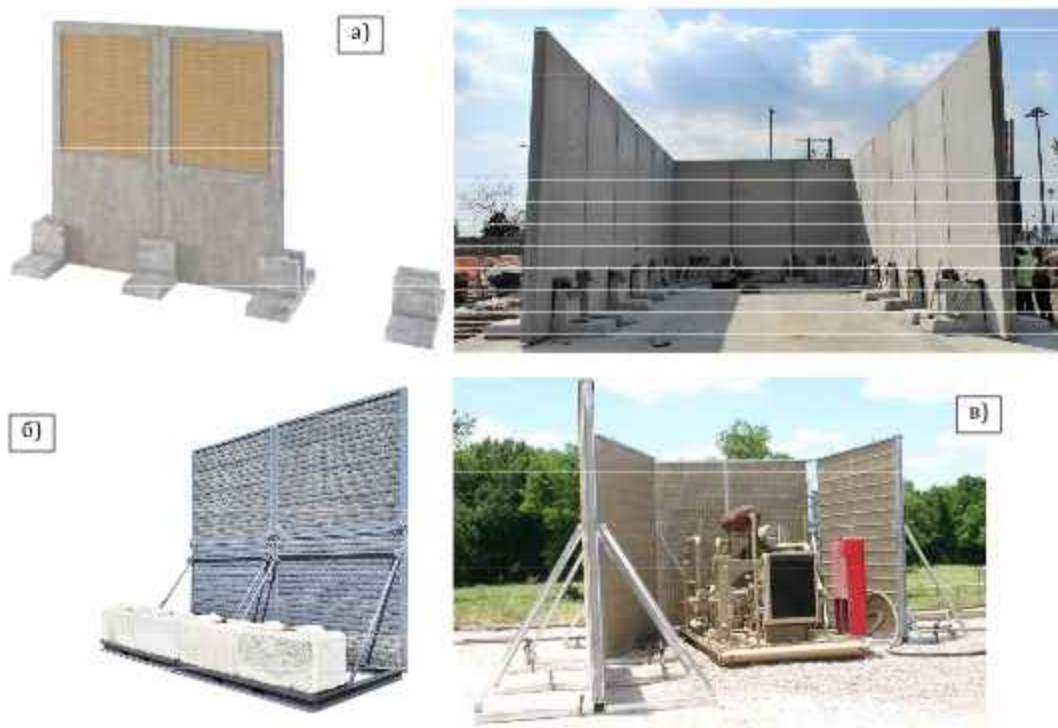


Слика 3.41. Класификација привремених звучних баријера

Ове баријере могу бити апсорпционе и рефлексионе. Апсорпционе елиминишу буку тако што апсорбују звучне таласе, а рефлексионе (попут бетона или метала) само рефлектују звучне таласе у другом смеру и често могу створити нове и неочекиване проблеме са буком.

3.2.7.1 Самостојеће баријере са стопама или ослонцима

Самостојеће мобилне баријере постављају се да изолују извор буке на одређеној локацији и демонтирају се када та потреба престане након чега се складиште или се премештају на другу локацију.



Слика 3.42. Примери самостојећих мобилних баријера са: а) стопама [54], б) ослонцима са контра тежовима [55] и в) косим подупирачима [56]

Лако се могу прилагодити потребним захтевима на месту изградње и нису им потребни темељи. Висине могу бити од 3 до 5 метара. Уместо темеља користе се масивне стопе, ослонци са контра теговима или подупирачи.

3.2.7.2 Модуларни панели монтирани на бетонски профил

Код ових баријера се уместо темеља користе масивни бетонски профили. Стабилност се обезбеђује тако што се панели позиционирају на бетонску основу помоћу седла и причвршћују помоћу навојних шипки кроз одговарајуће отворе на бетонским профилима. Бетонска основа уједно служи и као заштита од оштећења панела од стране грађевинских машина на градилишту.



Слика 3.43. Примери самостојећих мобилних баријера које се монтирају на бетонски профил [54],[57]

3.2.7.3 Лаки мобилни панели

Лаки мобилни панели су у предности у ситуацијама када су у питању привремени радови било на терену или унутар објекта. Лагани су и могу се брзо и без помоћи кранова и дизалица лако премештати са локације на локацију. Јефтине су и исплативи у случајевима привремених градилишта, радова на путу и других радова на отвореном, спречавања буке у индустријским објектима и сл.



Слика 3.44. Примери лаких мобилних баријера: а) [55], б) [58]

3.2.7.4 Лаки мобилни панели са точковима

Користе се обично у индустријским објектима како напољу тако и унутар објекта. Предност је у томе што за њих нису потребна средства за транспорт и могу се ручно преместити са једног места на друго.

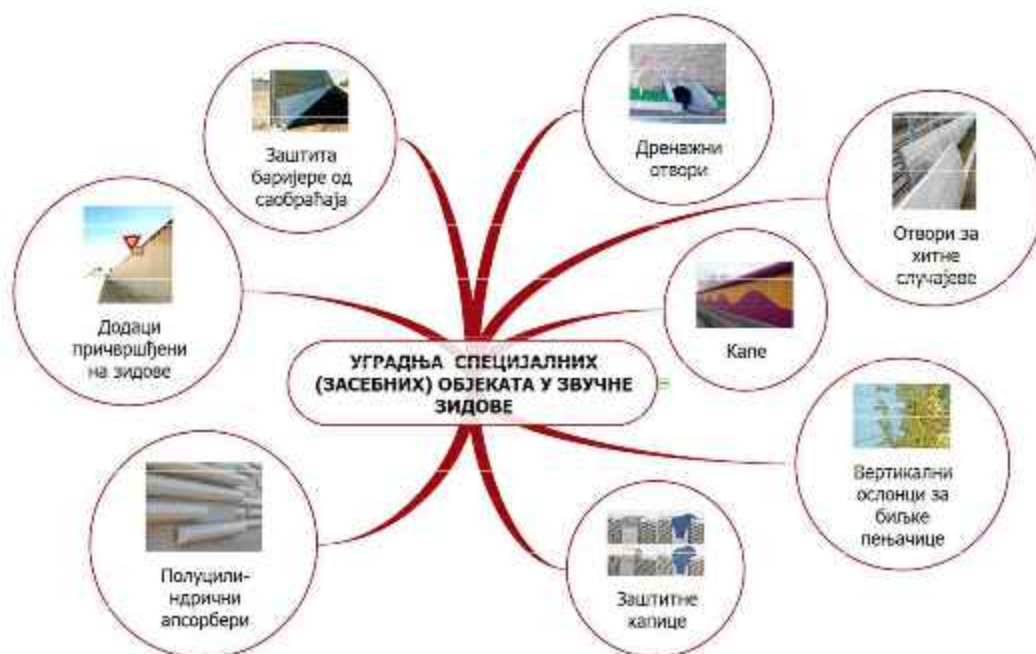


Слика 3.45. Примери лаких мобилних баријера на точковима: а) [59], б) [56]

Поред наведених типова користе се различите акустичке облоге, баријере у виду завеса, баријере на надувавање и др.

3.3 Додатни објекти саобраћајних звучних баријера

Класификација основних типова додатних објеката који се уграђују у звучне зидове или монтирају на њих су приказани на слици 3.46.



Слика 3.46. Типови додатних објеката који се уграђују у звучне зидове

3.3.1 Покривне капе (врхови баријере)

Капе представљају посебне елементе система баријера који се постављају на врх звучних баријера. Могу се монтирати на панеле или на стубове, а могу и на панеле и на стубове. Назив су добили по "изгледу капе" а постављају се из два разлога: акустичких и естетских.

Капе могу да профил баријере учине лепшим, тако што уклањају назубљене ивице и празнине, и дају гладак профил баријере. Покривне капе које се постављају на врх баријере пружају додатну заштиту баријере од кише, снега и других елемената. Потребно је уклопити величину капе са димензијама звучне баријере. Превелика капа нарушава естетски изглед баријере, а и негативно утиче на природно чишћење баријере током падавина. Такође, треба обратити пажњу на причвршћивање и заптивање на местима спајања панела и стубова.

Иако капе дају лепши изглед баријерама, често се може десити да буде проблема са њиховим одржавањем. Зато, начин пројектовања капе и стуба мора да буде усклађен са плановима одржавања баријере. Могу се предвидети трајне капе, али и капе које се могу уклањати повремено. У оба случаја, треба размотрити начине дренаже како не би долазило до заробљавања воде, корозије, савијања или других промена материјала.

У подручјима са високом влагом се уграђују и капе са отворима за вентилацију како би се спречила кондензација влаге унутар баријере.



Слика 3.47. Украсне капе на звучном зиду [25]

Капе које се постављају из акустичких разлога да побољшају дејство баријере могу бити:

- резонатори буке,
- цевасти апсорбери,
- дифракционе капе,
- уређаји за пасивну фазну сметњу,
- уређаји за активну контролу буке итд.

3.3.1.1 Звучни резонатори

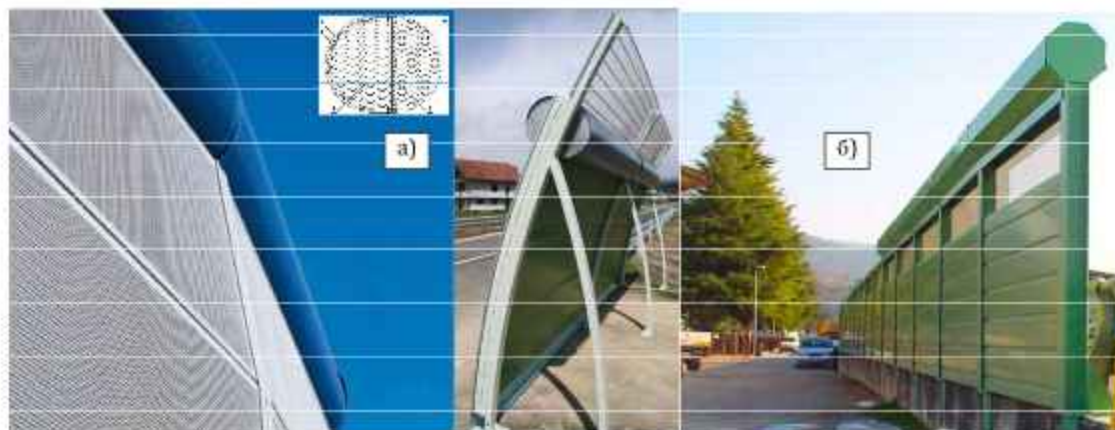
Резонатори буке који су обрађени у делу 3.1.3 се ретко уграђују у зидове баријере већ се обично изводе у виду акустички ефикасне капе која се монтира на врх баријере (слика 3.48). Монтирају се на врх баријере ради побољшања њених акустичких својстава. Често се користе на звучним баријерама које су постављене око фабрика или других индустријских објеката који стварају велику количину буке.



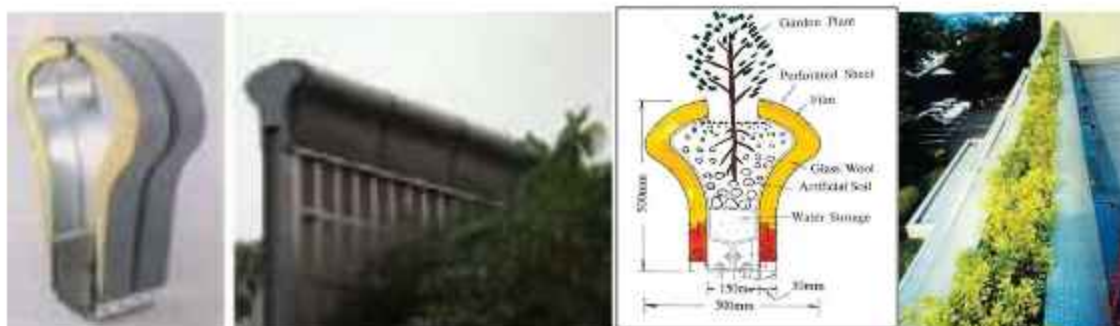
Слика 3.48. Пример акустичког резонатора уграђеног на врх баријере [45]

3.3.1.2 Цевасти апсорбери

Цевасти апсорбери у техничком смислу побољшавају дејство звучне баријере и најчешће су направљени од истих материјала као апсорбујући панели на које се постављају. Током 1990-тих година у Јапану је направљен цилиндричан тип капе, који је касније модификован у тип печурке. Експериментално је направљена верзија типа печурке са садницама унутар капе, као саксија или жардињера [60]. Међутим, испитивања су показала да капе типа печурке са биљним засадама имају исту способност смањења буке као и оне без садница [61].



Слика 3.49. Апсорбери буке: а) цилиндрични [62], б) полигонални [54]



Слика 3.50. Капе типа печурке, без и са засадима [60]

3.3.1.3 Дифракционе капе

Најчешћа решења за повећање укупне акустичке перформансе звучне баријере су рађена са дифракцијом звука на горњој ивици баријере. Дифракционе капе су дизајниране да преусмере звучне таласе који се савијају и ломе око баријере чиме смањују њихову способност да се преносе преко баријере и тиме доприносе смањењу нивоа буке иза баријере. Први експерименти су изведени са дифракционим капама у облику слова Т (Слика 3.51). Иако су се очекивали ефекти као код конзолних баријера показало се да су резултати били знатно већи и да је смањење буке било $1+3\text{dB}$ [25].



Слика 3.51 Дифракционе капе у облику слова Т (Прилагођено из [25])

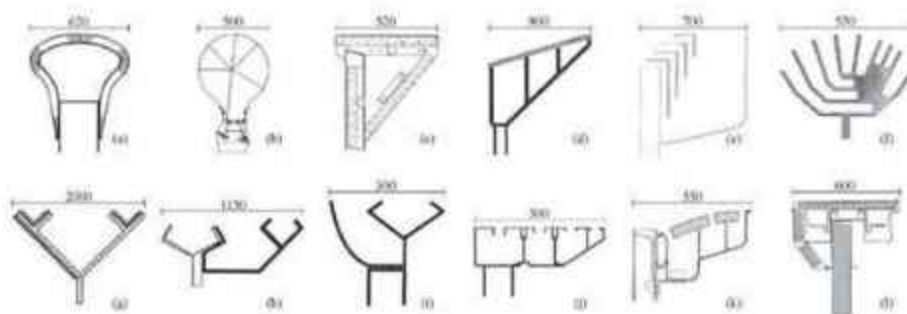
Истраживања су настављена са другачијим облицима (правоугаони, Y-облик, облик стрелице и сл.) као и са дифракционим облицима са вишеструким ивицама као што су: модификовани цилиндар, модификовани Т-облик и модификовани Y-облик (слика 3.52). Резултати тестирања модела су показали ефекте који су се кретали око $2,5+3\text{ dB}$ [21].



Слика 3.52 Различити облици дифракционих капа (Прилагођено из [60])

3.3.1.4 Комерцијални облици на тржишту

Комерцијални производи који су се појавили након 2000-те године у Јапану су резултирали новим моделима типа апсорбера, дифрактора са више ивица, асиметричних дифракционих капа, типа резонатора и др. (слика 3.53)



Слика 3.53 Комерцијални облици капа који су се појавили на тржишту након 2000-те године [60]

3.3.1.5 Уређаји за пасивну фазну сметњу

Уређаји за пасивну фазну сметњу се користе за смањење буке која се преноси из једног окружења у друго. Обично се састоје од плоча одређених димензија и облика које се постављају на одређеном растојању од извора буке. Плоче су дизајниране да преусмере звучне таласе и створе интерференцију која смањује укупну буку у циљном подручју.

3.3.1.6 Уређаји за активну контролу буке

Уређаји за активну контролу буке су електронски системи који се користе за смањење или елиминисање буке у одређеном простору. Користе се у ситуацијама када друге методе као што су звучне баријере нису довољно ефикасне. Ови уређаји

раде тако што региструју звук а затим користе обрнути сигнал (фазно померен) да би неутралисали оригинални звук.

Треба имати у виду да су уређаји за пасивну фазну сметњу и уређаји за активну контролу буке још увек у фази тестирања [25].

3.3.2 Отвори за хитне случајеве

Када дође до неких ванредних ситуација, као што су разне несреће, пожари, изливања воде, и слично, потребан је приступ ради санирања последица. Зато је потребно обезбедити отворе за хитне случајеве и те приступне тачке означити са обе стране баријере. Ознаке се могу поставити на самој баријери или дуж пута на ком се налази звучна баријера.

Отвори за хитне случајеве се могу направити на два начина:

- преклапањем баријера и
- обезбеђивањем приступних врата.

Када се обезбеђивање отвора за хитне случајеве изводи преклапањем баријера (слика 3.54.), растојање између зидова зависи од опреме која треба да прође кроз тај отвор када је потребна нека хитна интервенција. Дужина преклапања зидова зависи од акустике и мора бити толика да пропуштање буке буде на минимуму. Преклапање делова баријера захтевају правилно пројектовање и додатне мере безбедности као што је додатно осветљење или модификовани дизајн преклапања да би била боља видљивост.



Слика 3.54. Отвори за хитне случајеве: преклапање баријера [25]

Други начин за обезбеђивање отвора за хитне случајеве су приступна врата, која се направе у баријерама на одређеним растојањима. Када нису у употреби, ова врата су закључана како би се спречио неовлашћен приступ. Такође, када су затворена, нема пропуштања звука кроз баријеру. Материјал од кога се праве врата су метал или дрво и обично је исти као материјал од ког је направљена звучна баријера.

Понекад је потребно да се делови зида звучне баријере пројектују тако да се привремено могу уклонити. На тај начин омогућава се приступ и неопходан пролаз за сву потребну опрему.



Слика 3.55. Отвори за хитне случајеве: приступна врата [63]

3.3.3 Дренажни отвори

Звучне баријере често ометају нормално одвођење воде са путева. Ово је посебно важно у подручјима са високом влажношћу или обилним падавинама како би се спречило накопљање воде и оштећење саме баријере. Овај проблем се решава предвиђањем дренажних отвора. Дренажни отвори су отвори у баријерама који могу бити различитих величина и облика и служе да вода отиче кроз баријеру а не да се задржава на једној страни баријере. Потребно је само водити рачуна да величина и положај дренажних отвора не утичу негативно на акустичке перформансе звучне баријере. Такође, треба ставити решетке у ове отворе да би се спречио улазак малих животиња. Ефекат непрекидног размака дренажних отвора на растојању до 20 cm на дну звучне баријере је обично унутар 1 dB(A) [64].



Слика 3.56. Дренажни отвори у баријери [25]

Други начин је одвођење воде поред или испод баријере. У овим случајевима највише су у примени системи одводних канала који иду паралелно са баријером

(слика 3.57.) или системи за одвођење воде кроз цеви које пролазе испод баријере (слика 3.58.).



Слика 3.57 Одвођење воде поред баријере [25]

Када се вода одводи испод баријере постоји начин обезбеђивања порозног каменог рова испод основе баријере кроз који вода може да отиче. У овом случају поставља се порозни камен са обе стране баријере како би се затворио јаз, а истовремено вода може да прође. Ови системи од порозног камена захтевају одржавање како се током времена не би затворили.



Слика 3.58. Дренажни отвори за одвођење воде испод баријере [25]

У подручјима која су подложна поплавама где би вода заправо текла преко аутопута, а звучна баријера ограничавала проток воде и погоршала стање поплаве, баријере се праве на посебан начин. Доње плоче монтажних бетонских панела се праве тако да поплавна вода може да их помери напоље и омогући отицање поплавних вода. Када вода истекне, панели се враћају у вертикални положај.



Слика 3.59. Покретни сегменти баријере за одвођење воде [25]

3.3.4 Додатни елементи причвршћени на звучне зидове

У неким ситуацијама звучни зид је једино могуће место за монтажу неких елемената који се односе на саобраћај. То могу бити: носачи саобраћајних знакова, осветљење, стубови, телефонске кутије и друго. Ови елементи се постављају интегрално са звучном баријером, а не као додатни елемент.



Слика 3.60. Осветљење монтирано на баријеру [25]

У неким случајевима, зидови се могу померити или се могу направити умети да би се поставили комунални елементи као што су трансформатори и стубови. Носачи за знакове, телефонске кутије и сл. се монтирају директно на зидове звучне баријере (слика 3.61.). Приликом постављања ових елемената треба обратити пажњу да се обезбеди одговарајуће растојање, како хоризонтално, тако и вертикално.



Слика 3.61. Елементи причвршћени на баријеру: а) [25], б) [63]

3.3.5 Заштита баријере од оштећења услед саобраћаја

Звучне баријере би требало да су заштићене од оштећења услед саобраћаја (удар возила и сл.) када се изграде у чистој зони која је иначе предвиђена за возила. Таква заштита обухвата металне или дрвене заштитне шине (ограде) или заштитне преграде које се праве од бетона. Металне и дрвене заштитне ограде се постављају испред звучне баријере на одређеном растојању које мора бити једнако или веће од максималног угиба заштитне ограде (слика 3.62.).



Слика 3.62. Заштитна ограда од саобраћаја [25]

Бетонске преграде се могу поставити одмах испред звучне баријере или на одређеној удаљености, а подручје између преграде и звучне баријере понекад је испуњено каменом или земљом. На овај начин се добија боља заштита од саобраћаја. Такође, постоји и могућност постављања засада у том подручју. Бетонске преграде се могу направити у доњем делу звучне баријере и као интегрални део баријере. Ако са обе стране звучне баријере постоји могућност удара возила, потребно је заштитити баријеру са обе стране и поставити одговарајуће преграде.



Слика 3.63. Бетонске преграде за заштиту баријере од саобраћаја [25]

3.3.6 Вертикални ослонци за биљке пењачице

Вертикални мрежасти носачи се могу уградити на зид баријере како би се омогућило биљкама да расту уз њих. Тиме се маскира баријера и доноси природа на зидове тј. врши се уклапање у природни амбијент. Ово је посебно значајно у деловима града где се штите приватне површине или постојеће зеленило. Осим тога, биљке могу помоћи у апсорпцији загађења из ваздуха јер побољшавају квалитет ваздуха у близини пута.



Слика 3.64. Вертикални ослонци за биљке пењачице [63]

3.3.7 Акустички апсорбери звука

Акустички апсорбери се обично монтирају на унутрашњу страну зида рефлексионих баријера како би се смањио утицај рефлексије звука на саобраћајну страну пута. Густина постављања зависи од потребе за смањењем буке. Као и апсорбери буке у виду капе и код ових апсорбера се омотач израђује од перфорираног лима, а унутрашњост је испуњена апсорпционим материјалом.



Слика 3.65. Полуцилиндрични акустички апсорбери са металним перфорираним оклопом [65]

3.3.8 Заштитне капе за стубове

Ради заштите од временских утицаја и корозије, челични носећи стубови се обично прекривају капом. Разноврсни облици и боје ових капица служе и као украсни елементи баријере.



Слика 3.66. Заштитне капице за челичне стубове [63]

Поред наведеног, као додатни објекти, могу се срести:

- *панели са рекламним порукама.* Ови панели се могу поставити на саобраћајној страни пута и користе се за приказивање реклама и порука. Ово је честа пракса на аутопутевима која доноси додатну зараду од рекламирања и доприноси смањењу трошкова одржавања баријере,
- *панели са отворима за вентилацију.* Користе се да побољшају проток ваздуха кроз баријеру што може бити од великог значаја у подручјима са високом влагом јер спречавају кондензацију влаге на баријери,

- *панели са осветљењем*. Користе се за осветљење баријере у ноћним условима што доприноси видљивости и безбедности на путу као и естетском изгледу баријере,
- *системи заштите од птица* који користе звучне сигнале како би растерали птице у близини аеродрома,
- *звучници за емитовање упозорења и инструкција у случају евакуације или у хитним случајевима*,
- *противпожарни системи, рефлектујуће траке, сигнална светла, разни сензори, камере и сл.*

3.4 Материјали за звучне баријере

За израду баријера за заштиту од саобраћајне буке могу се користити различити материјали, као што су: бетон, цигле и зидани блокови, метали, дрво, трска и слама, транспарентни материјали, пластика, рециклирана гума и композитни материјали. Класификација материјала за израду звучних баријера је приказана на слици 3.67.



Слика 3.67. Класификација материјала за звучне баријере

3.4.1 Бетон

Бетон је један од најзаступљенијих грађевинских материјала на свету који има најразноврснију употребу. Овај материјал се добија мешавином цемента, грубих и финих агрегата и воде. Сматра се једним од најтрајнијих материјала зато што може да издржи високе температуре, сунчеву светлост, лед и влагу. Звучне баријере направљене од бетона могу бити рефлексионе и апсорпционе.

Рефлексионе бетонске баријере су ефикасне као и било које друге ако су конструкција и димензије добро осмишљене. Могу се користити и у комбинацији са

разним засадима како би вегетација правила контраст бетону. Ове баријере се могу правити и од бетонских блокова. Већина бетонских баријера као носећу структуру користи челичне I стубове постављене или причвршћене на бетонске темеље.

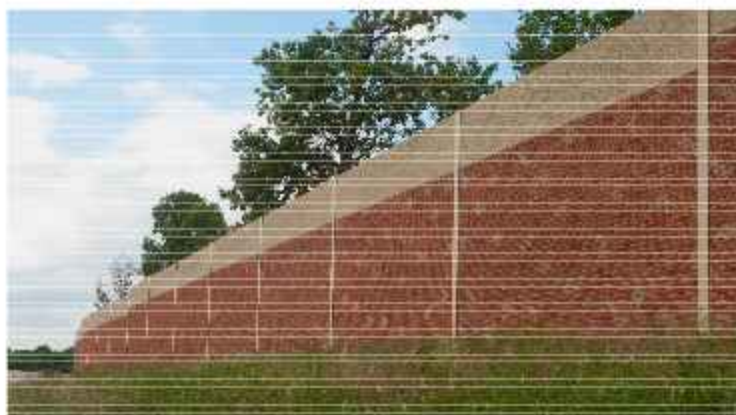
Што се тиче *апсорпционих бетонских баријера*, оне се најчешће израђују од лаког порозног бетона тзв. шупљикави бетон (гас бетон или пено-бетон). Обично се изводе у виду панела који се праве у одговарајућим величинама у фабрикама и затим уграђују између челичних носача. Панели су дугачки 4-5 m и најчешће дебљине 140-190 mm. Дебљина зависи од тога да ли су баријере апсорпционе са једне или са обе стране [24].



Слика 3.68 Примери бетонских баријера: а) рефлексионих, б) апсорбујућих. Произвођач Insametal [66]

3.4.2 Цигле и блокови за зидање

Цигла се прави од мешавине глине и песка, која се затим пече у пећи због повећања чврстоће. Овај материјал се користи за изградњу баријера за заштиту од буке зато што се уклапа у локалну, већ постојећу архитектуру. Ове баријере, такође, могу бити рефлексионе и апсорпционе. Рефлексионе баријере се праве од пуне цигле, а апсорпционе од шупљикаве цигле.



Слика 3.69. Пример звучне баријере од цигле [67]

Блокови за зидање се производе од мешавине сувог бетона и могу се производити у различитим величинама. И баријере од цигле и баријере од зиданих блокова се могу поставити ручно или машински и без обзира на начин постављања захтевају бетонску подлогу.



Слика 3.70. Пример звучне баријере од зиданих блокова [68]

3.4.3 Метали

За израду звучних баријера најчешће се користе три врсте метала:

- челик,
- алуминијум и
- нерђајући челик.

Када се говори о коришћењу метала за баријере за заштиту од буке *челик* има највећу употребу (слика 3.71. а). Да би се заштитили од корозије лимови се цинкују и пресвлаче разним облогама и бојама.

Поред челика, највише се користе лимови од легуре *алуминијума* који су најчешће пресвучени разним облогама, бојама или су елоксирани (слика 3.71. б). Треба имати у виду да алуминијум није компатибилан са поцинкованим премазима.



Слика 3.71. Примери металних баријера од: а) челика и б) алуминијума [54]

Нерђајући челик је веома издржљива метална легура отпорна на корозију. То је мешавина угљеничног челика, никла и хрома, које су заступљене у различитим процентима. Код овог материјала нису потребне никакве облоге и премази.

Поред ових метала, данас је све више у употреби и *Кортен (Cor-Ten) челик*. То је легура челика која у условима експлоатације развија стабилну оксидацију у виду црвене, браон и наранџасте боје која га штити од даље оксидације. Познат је као „зарђали челик“ и посебно је интересантан након изложености метеоролошким условима (киши и сунцу) јер се на површини стварају тамни и светли тонови ефекта рђе. Поред интересантног изгледа његова предност је у томе што не захтева заштитне премазе и фарбе.

Важно је истаћи да је предност металних панела у њиховој малој маси, могу се користити за проширења већ постојећих звучних баријера као и за монтажу на постојеће потпорне зидове или на конструкцију моста.

3.4.4 Дрво

Дрвене баријере су раније изгледале као баштенске оgrade. Савремене дрвене баријере су углавном више и многе од њих су апсорпционе, али је мало иновација у дизајну. У Европи се могу наћи различити типови ових баријера. Добро се уклапају у руралним подручјима, а у неким случајевима могу се наћи и у приградским, па и градским локацијама. Могу бити апсорпционе и рефлексионе.



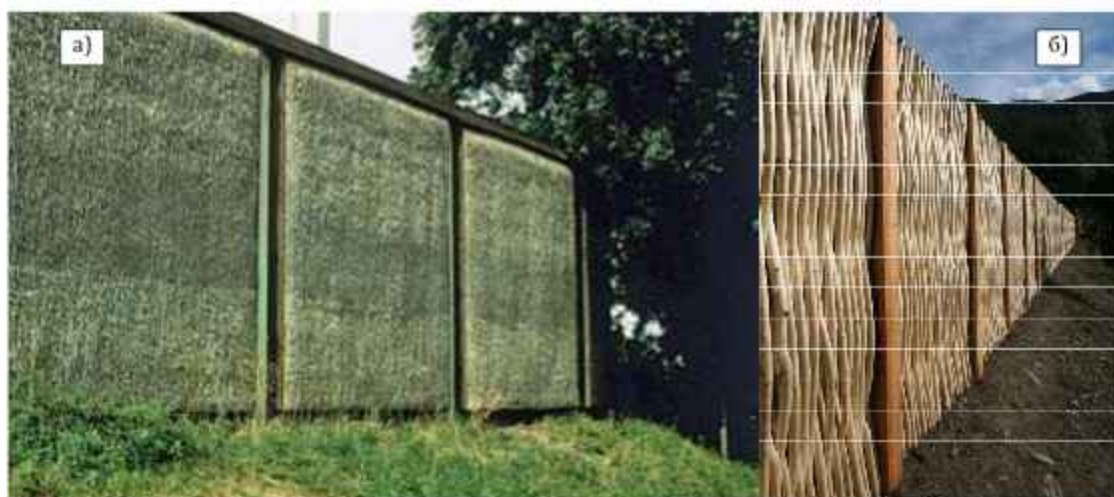
Слика 3.72. Примери дрвених баријера [69]

За израду звучних баријера могу се користити различите врсте дрвета, али немају сви исте карактеристике. Дрвени панели се могу постављати ручно, на лицу места или претходно делимично склопити у фабрици, па монтирати. Звучне баријере направљене од дрвета треба избегавати на мостовима, на бетону и челику и када баријере треба да буду нагнуте. Могу се интегрисати са другим врстама баријера и комбиновати са различитим засадама биљака.

3.4.5 Трска, слама, плетено пруге

Трска и слама не изгледају као материјали који би се могли користити за изградњу баријера за заштиту од буке, али плоче од ових материјала су већ коришћене у

Холандији [24]. Одлично се уклапају у руралним подручјима, нарочито ако постоји вегетација. Плоче од трске и сламе (слика 3.73. а) су отпорне на ватру и постављају се на дрвену плочу. За потпору се користе челични I стубови и на врху имају дрвену или керамичку греду. Уз ове баријере се могу посадити биљке пењачице, чиме се ствара природнији изглед. Трска и слама имају добра својства апсорпције звука, а истовремено су природни и обновљиви материјали. Међутим, ови материјали могу бити склони временском пропадању и захтевају адекватно одржавање. Користе се и панели од плетеног прућа (слика 3.73. б) као што су гране од врбе са којих је скинута кора.



Слика 3.73. Пример баријере од: а) трске [24] и б) плетеног прућа [70]

3.4.6 Транспарентни материјали

Провидне (транспарентне) баријере за заштиту од буке се граде од ламинираног, каљеног или ојачаног стакла или од акрилних или поликарбонатних панела. Дебљине панела су обично 8-19 mm за стакло и 15-20 mm за акрил и поликарбонат [24]. Димензије панела се разликују, у зависности од тога који произвођач их производи. Акрилни панели се могу обрађивати на лицу места, док стакло углавном не може.

Акрилни панели могу бити закривљени. Такође, и стаклене преграде могу да се савијају да би се постигао жељени профил баријере. Акрилни панели се могу обојити, а стакло може бити тонирано и угравирано. Ово су материјали који имају визуелну неутралност, тако да имају веома мали утицај на пејзаж и изглед околине. Зато оба ова материјала имају велику примену широм Европе.

Стаклени панели се лакше ломе, а акрилни се лакше огребу. Стакло даје бољу видљивост кроз баријеру а оба материјала добро пропуштају светлост. Обојени панели дају бољу видљивост за птице и мању рефлексију светлости при одређеним условима, тако да треба добро проценити при избору врсте материјала за баријеру. Још један важан утицај на избор ових материјала за баријере је и њихова цена. Трошкови израде ових баријера могу бити и до 20 пута већи од бетонских или металних [25].

Провидни панели се најчешће користе за мостове и вијадукте, а исто тако и у стамбеним насељима, ближе зградама, зато што омогућавају поглед на објекте, дозвољавају продор светлости и визуелно су мање упадљиви. Највећа примена ових панела је монтажа изнад других панела да би се привидно смањила висина баријере и променио изглед врха баријере.



Слика 3.74. Примери провидних баријера [71]

3.4.7 Пластика

Нема много примера баријера чији су делови углавном направљени од пластике. Када се узме у обзир да се рециклирање пластике све више повећава, може доћи до повећања примене ових материјала за изградњу баријера за заштиту од буке. И ове баријере могу бити рефлексивне или апсорпционе. Могу се направити да изгледају врло шаролико, да скрећу пажњу на себе, али и тако да имитирају друге материјале.



Слика 3.75. Примери апсорпционих пластичних баријера [72]

Постоји неколико врста пластичних материјала који се могу користити за изградњу баријера, а то су најчешће: полиетилен, PVC и фиберглас. Предност овог материјала је његова разноврсност и могућност обликовања, лакоћа руковања њиме због мале тежине и могућност рециклирања. Спољашња површина PVC панела се облаже титанијум диоксидом како би се заштитили од УВ зрака и спречило бледење на сунцу.

3.4.8 Структуре обликоване на 3D принтерима

Последњих година су развијене нове технологије које користе 3D принтере за израду звучних баријера и других акустичких уређаја. Ове технологије пружају велику флексибилност и прилагодљивост у дизајну и производњи звучних баријера и могу бити корисне за разне примене укључујући заштиту од буке у урбаним срединама, индустријским постројењима и сл.

На 3D принтерима се могу израдити различите структуре које могу служити као звучне баријере. Ове структуре се обично дизајнирају тако да имају поре и микроструктуре које спречавају пролаз звучних таласа кроз материјал смањујући на тај начин рефлексију и буку [73]. Овом технологијом је могуће прецизно обликовање и израда сложених структура које је тешко или немогуће израдити традиционалним методама обраде. Постоје различите структуре које је могуће добити на 3D принтерима, а које се могу користити за смањење рефлексије звука:

- структуре са рупицама и отворима,
- структуре са урезима,
- структуре са порама,
- структуре са пригушивачима звука и сл.

Постоје различити типови 3D принтера и материјала који се користе за израду ових структура. Најчешће се користе материјали као што су пластика, гипс, метал и керамика.

3.4.9 Рециклирани материјали

Рециклирани материјали који се користе за изградњу звучних баријера укључују:

- *рециклирани бетон* - који се добија рециклажом отпадних производа од бетона који су истрошени или одбачени,
- *рециклирану гуму* - која се најчешће добија рециклажом старих одбачених аутомобилских гума,
- *рециклирану пластику* - која се добија рециклажом пластичних боца, фолија и другог амбалажног отпада,
- *рециклирано стакло* - од одбачених стаклених боца и других производа од стакла,
- *рециклирани метал*, итд.

3.4.9.1 Рециклирана гума

Већ дужи низ година се свуда у свету истражује употреба рециклиране гуме и константно расте производња плоча од гуменог гранулата које се користе за облагање спортских терена, дечјих игралишта, атлетских површина, тениских игралишта, израду успоривача брзина (лежећих полицајаца), одбојника и сл. С обзиром на добре карактеристике смеше бетона и рециклиране гуме и одлична својства за апсорпцију звука све је већа примена рециклиране гуме за израду звучних баријера [74].

Гума има високу способност апсорпције звука што је чини идеалним материјалом за израду звучних баријера. Најчешће се користе рециклиране аутомобилске гуме у виду гранулата који се мешају са везивним материјалом као што су полиуретан или епоксидне смоле. Коришћење рециклиране гуме има и еколошку предност јер се тиме смањује количина гуменог отпада. Поред наведених предности, примена овог материјала, има и бројне недостатке [74]:

- гума је позната по запаљивости и густом диму,
- гумени материјал није токсичан, али су токсични адитиви који се додају у смешу ради побољшања карактеристика,
- гумени материјал нема довољну крутост,
- морају се додавати везивни агенси,
- може да оксидира током времена,
- премази могу да затворе површинске отворе и да смање коефицијент смањења буке.



Слика 3.76. Панел за звучну баријеру од рециклиране гуме [25]

3.4.9.2 Рециклирана пластика

Рециклирана пластика се све чешће користи за израду звучних баријера због својих бројних предности у односу на друге материјале:

- има мању тежину у односу на друге материјале што олакшава транспорт и монтажу,
- пружа одличну звучну заштиту јер има одлична својства звучне изолације и апсорпције,
- отпорна је на временске услове,
- јефтина је у односу на друге материјале,
- коришћење рециклиране пластике је еколошки и финансијски одрживо решење јер смањује количину отпада, трошкове производње и загађење околине.

Рециклирана пластика се користи за израду панела и блокова од којих се затим израђују баријере. Користи се и у комбинацији са другим материјалима као што су: стакло, минерална влакна и разни адитиви за побољшање карактеристика.

3.4.10 Композитни материјали

Композитни материјали за заштиту од буке се могу дефинисати као било који производ састављен од два или више основна материјала, као што је напр. шперплоча са омотачем од фибергласа, или дрвена влакна, експандирана глина, рециклирана гума и сл. помешана са бетоном и затим нанесена на бетонску подлогу. Могућности комбиновања материјала су веома велике, тако да за сваки појединачни случај се разматра процена њихове безбедности, издржљивости и карактеристика.



Слика 3.77. Примери звучних баријера од композитних материјала: а) дрвена влакна и бетон-произвођач CIR Ambiente [54], б) звучна баријера RUCONBAR од смеше бетона и рециклиране гуме [73],[75]

Предности коришћења композитних материјала за израду звучних баријера укључују лакоћу, издржљивост, отпорност на корозију, високу чврстоћу, флексибилност у обликовању, отпорност на УВ зраке, дуг век трајања и др.

3.5 Површински третмани

Избор одређене текстуре површинске обраде зависи од много чинилаца, као што су естетски изглед обе стране баријере, конструкционе карактеристике, начин одржавања, врста материјала који се користи за изградњу баријера и др. Због свега тога, морају се размотрити и површински третмани баријера. Површински третмани укључују: текстуре, боје, графите и премазе. Класификација површинских третмана звучних баријера је приказана на слици 3.78.



Слика 3.78. Класификација површинских третмана звучних баријера

3.5.1 Текстура

Постоји велики број површинских текстура које су доступне за употребу при изради звучних баријера (слика 3.79). Ове различите текстуре се могу применити како на панелима, тако и на стубовима, капама, итд. Употребом различитих комбинација површинских третмана добијају се различите површинске текстуре. У зависности од врсте материјала за израду звучних баријера, различите су и текстуре које се могу добити.



Слика 3.79. Текстури површинског третмана баријера [25]

Када је материјал за израду звучне баријере *бетон*, могу се добити текстуре глатке површине и површине каменог агрегата као и и текстуре које се добијају помоћу: извлачења линија, ручно примењених техника помоћу грабуља и метли, утискивања, примене уметака, фурнира и Stucco завршног слоја.

Глатка површина се добија применом класичних техника завршне обраде бетона. Код вертикално формираних панела са једне или обе стране, након очвршћавања бетона, потребна је завршна обрада која обухвата попуњавање празнина и "брушење" бетона танком цементном мешавином (слика 3.80.).



Слика 3.80. Бетонска баријера са глатком површином [25]

Текстура у виду површине каменог агрегата се добија коришћењем одабраног типа, боје и градације агрегата у самој бетонској мешавини баријере (слика 3.81.). Агрегат се бира на основу естетског изгледа, али мора и да испуњава све захтеве у вези са чврстоћом, величином, обликом, итд. Оваква изложена површина агрегата најлакше се добија на дну, тј. на доњој страни префабрикованог панела. На горњој страни панела је теже постићи овај поступак и потребно је искуство од стране радника и праћење контроле квалитета.



Слика 3.81. Бетонска баријера са површином у виду каменог агрегата [25]

За добијање различитих изгледа рељефне текстуре површине користе се *различите врсте калупа*. Калупи се израђују од танких материјала који могу бити направљени од: гуме, дрвета, метала или другог материјала и имају једну равну страну, а на другој се налази "калуп" са жељеним изгледом површине. Ови калупи се могу користити у више наврата и најчешће се примењују на доњој страни панела ливених у фабрици префабрикованих материјала. Новијим методама је омогућена завршна обрада текстуре са обе стране панела.



Слика 3.82. Текстура бетонске баријере добијена у калупу: а) [76], б) [67]

Ручно примењене *технике завршне обраде помоћу грабуља и метли* (грабуљање, метење) се примењују на горњој страни префабрикованих панела (слика 3.83.) и помоћу њих се могу добити различите шаре креиране ручно.



Слика 3.83. Завршна обрада бетонске баријере грабуљањем [25]

Завршна обрада утискивањем представља утискивање неког шаблона на горњу површину хоризонтално изливеног панела, помоћу специјализованих техника. Може се добити и изглед површине типа цигле (слика 3.84.). Такав третман је нешто тежи у раду од других третмана. Током процеса утискивања, агрегат у панелу мора да има довољну дебљину да може да се обави утискивање.



Слика 3.84. Текстура у виду цигле добијена утискивањем [25]

Применом панелних уметака може се добити јединствени естетски изглед површинске текстуре (слика 3.85.). Ови умети се производе одвојено па постављају у удубљење једнаке величине и облика унутар префабрикованог панела или се уграђују у панел током процеса изливања. Треба осигурати адекватан начин причвршћивања између уметка и панела за заштиту од буке. Најчешће се користи механичко причвршћивање или технике хемијског везивања.



Слика 3.85. Панелни умети причвршћени на бетонску баријеру [25]

Фурнири представљају посебно произведен материјал који се наноси на површину бетонске баријере. Неки фурнири могу имати допринос у апсорпцији звука, али углавном је њихова примена из естетских разлога. Примери фурнира су танка цигла, керамичке плочице и порозни композитни материјали. Као и у претходном случају, треба обезбедити адекватан начин причвршћивања.

Stucco завршни слој од цементног материјала се везује директно за бетонску баријеру без икаквих додатака и може дати различите типове текстуре бетонске површине. При том се мора постићи одговарајућа чистоћа и хrapавост површине бетонске баријере да би се обезбедила адекватна површина за лепљење овог завршног слоја.

Када је материјал за израду звучне баријере *зидани блок*, може се добити текстура површине каменог агрегата, текстуре које се добијају помоћу извлачења линија, фурнира, поломљених рубова и Stucco поступком. Што се тиче текстуре каменог блока за зидање, знатно је мањи број текстура које се могу добити у поређењу са разноврсним текстурама камених агрегата које се могу добити у панелу од бетона јер је мањи асортиман агрегата који се користи у производњи бетонских блокова.

Калупи за извлачење линија се могу применити и код бетонских блокова, али ретко и у знатно мањој мери, него код бетона. Фурнири се могу наносити на бетонске блокове на сличан начин као код бетонских панела. Поломљени камени рубови су често средство за постизање грубе текстурне површине у бетонском блоку (слика 3.86.).



Слика 3.86. Баријера од зиданих блокова са поломљеним каменим рубовима [25]

Stucco текстура се може нанети на зидане блокове на сличан начин као код бетонских панела (слика 3.87.).



Слика 3.87. Stucco текстура на баријери од зиданих блокова [25]

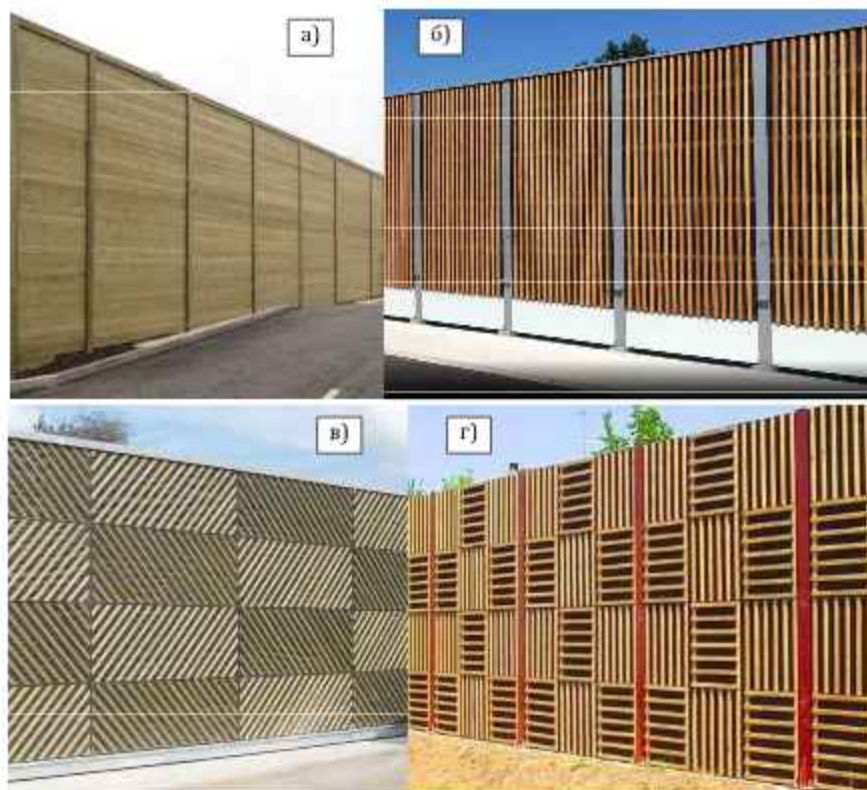
Када је материјал за израду звучне баријере *цигла*, разматра се тип цигле, тип малтера и тип везе. Тип цигле укључује све класичне типове стандардне цигле. Постоје стотине врста цигле које се могу користити у изградњи звучних баријера (слика 3.88.). Цигле се могу слагати у више слојева малтером или у комбинацији са зидовима од бетона или бетонских блокова. Када је у питању тип малтера, на располагању је велики број различитих боја и врста малтера за лепљење цигли. Различити типови везе су у употреби за изградњу баријера од цигле. Разноврсност

димензија, боја, стилова цигли, малтера и веза даје могућност за креирање јединствених и занимљивих узорака.



Слика 3.88. Површинска текстура – баријере од цигле [25]

Када је материјал за израду звучне баријере *метал*, може се добити текстура површине механички обликованим облицима и утиснутим површинама. Површински третмани су углавном слични на обе стране панела, али постоји могућност да се постигну различити облици на свакој страни баријере. Утиснуте површине подразумевају мање рељефне отиске на металним панелима.



Слика 3.89. Текстура дрвених баријера добијена различитом оријентацијом постављања дасака: а) хоризонтално [77], б) вертикално [78], в) дијагонално [77], г) комбиновано [79]

Када је материјал за израду звучне баријере *дрво*, текстуру површине обезбеђује: оријентација дасака, летви, зрнатост, ламинација и тип и оријентација стубова. Различити визуелни изгледи се могу добити уз различиту оријентацију дрвених

дасака које се користе у изградњи звучних баријера. Постоји могућност коришћења хоризонталне, вертикалне, дијагоналне и комбиноване конфигурације. Такође, даске различитих димензија могу створити занимљиви изглед.

Зрнатост подразумева одабир зрна и храпавости дрвета чиме се може направити одговарајућа текстура површине. *Ламинација* се односи на различите дизајне код ламинираних панела тако што се одради одговарајућа оријентација ламинираних компонентних елемената (слика 3.90.). На овај начин добија се слична површина са обе стране баријере.



Слика 3.90. Ламинација – дрвене баријере [25]

Када је материјал за израду звучне баријере *транспарентни панел*, текстура површине је ограничена на дизајне естетског типа (шаблоне, шаре) који се могу применити на такве баријере.



Слика 3.91. Површинска текстура – провидне баријере [80]

Површинске текстуре *пластичних панела* су ограничене на облике и текстуре које се могу постићи процесом обликовања компоненти панела, а код *композитних материјала* површинске текстуре зависе од доступности и ограничења одређених компоненти које се користе за формирање спољашње површине баријере.



Слика 3.92. Површинска текстура – баријере од композитних материјала [25]

3.5.2 Боја

У површински третман звучних баријера спада и њихова боја. Жељена боја баријере се може добити уз помоћ две опште технике или њиховом комбинацијом:

- природном бојом материјала који се користи за изградњу звучне баријере (уз могућност додатка прозирног премаза) и
- наношењем боје, мрља, пигментног премаза или интегралног пигмента који се додаје материјалу за изградњу баријере.

Код бетона и зиданих блокова, постоји веома разноврсна могућност за бојење. Боја природних састојака бетона се може мењати додавањем пигмената. Такође, и површински нанесене мрље утичу на боју. Могу се користити пигментисани панели са површинском бојом одговарајуће нијансе. Када је у питању *цигла*, боја је ограничена на саму боју материјала који се користи за изградњу баријере.

Металне баријере се углавном штите заштитним премазима од корозије, а потом боје. Код алуминијума и нерђајућег челика постоји могућност и задржавања природне боје метала. Елементи челичне баријере могу да задрже и поцинковану завршну обраду као боју. Када је материјал за израду звучне баријере *дрво*, постоји велики избор природних боја. Свака врста дрвета има одређену боју. Исто тако, већина дрвета се може обојити да би се добила жељена боја.

Боја баријере од *пластике* се најчешће добија пигментацијом емулгатора који се користе у процесу обликовања елемената баријере. Такође се може додати премаз за огреботине у заштитне сврхе. Жељена боја звучне баријере од *рециклиране гуме*, обично се добија применом полиуретанских премаза, јер се рециклирани гумени материјал не може пигментисати. Код *композитних материјала* боје зависе од могућности компоненти које се користе за формирање спољашње површине баријере.

3.5.3 Графити

Звучне баријере у животној средини често пружају неодољиво празно платно за цртање графита. Једини ефикасан начин одвраћања од цртања графита је коришћење биљних засада. Тамо где није могуће или није одговарајуће посадити

биљке уз баријере, морају се пронаћи алтернативна решења. Развијени су разни начини да би се смањила штета на баријерама и олакшало чишћење. Два основна типа, који се односе на врсту површине коју штите су:

- премази против графита и
- фолије против графита.

Премази против графита се могу наносити на већину површина у облику прсканог или обојеног слоја, тако да се боја лакше уклања, обично распршивањем топле воде под високим притиском. *Фолије против графита* се наносе на стаклене и акрилне транспарентне преграде. Фолија је провидна, штити површину од гребања и боје и лако се уклања и замењује новом.

Један од могућих начина за одвраћање цртања графита је анти-графитни дизајн на баријерама (слика 3.93.). Ту постоји и проблем неуклапања анти-графита у локални амбијент. Постоји и могућност реклама на баријерама, што доводи до потенцијалне употребе баријера за оглашавање.



Слика 3.93. Примери графита и анти-графита на звучним баријерама [24]

Још један начин за одвраћање од цртања графита су специјалне конструкције баријера, такве да постоји унутрашње језгро које садржи панеле, а низови челичне профилисане мреже штите то језгро и на тај начин онемогућавају цртање графита, односно, њихову видљивост.



Слика 3.94. Примери анти-графитних баријера [24]

3.5.4 Заштитни премази

Премази се углавном наносе на бетонске баријере или баријере од зиданих блокова из заштитних и/или естетских разлога. Заштитни разлози су најчешћи разлози за наношење оваквих премаза. Они дају заштиту од утицаја ветра, кише, ултраљубичастог светла и слично, и од потенцијалног вандализма, разних оштећења и цртања графита. Када су у питању естетски разлози, они се односе на побољшање изгледа баријере. У неким случајевима додавање прозирног заштитног премаза може побољшати боју и дати сјај површини.

Ови премази могу бити прозирни или пигментирани. *Прозирни премази* се обично наносе на површине где је боја баријере од природног материјала баријере, као што су камени агрегат или цигла. *Пигментирани премази* се обично наносе на природне бетонске површине. Наношење премаза се углавном врши прскањем, мада се може користити и наношење премаза ваљком или четком.

Премази против графита могу бити трајни, који омогућавају вишеструко уклањање графита испирањем водом под високим притиском, без замене премаза. Други тип премаза се делимично или потпуно уклања заједно са графитима и морају се поново наносити.

Премази у виду боја, поред тога што дају жељену боју баријери, могу да обезбеде и одређени степен заштите. Могу бити на бази воде или уља. Могу се наносити у фабрици префабрикованих материјала пре њихове монтаже, или на лицу места, на терену, током монтаже панела.

ПОГЛАВЉЕ
4

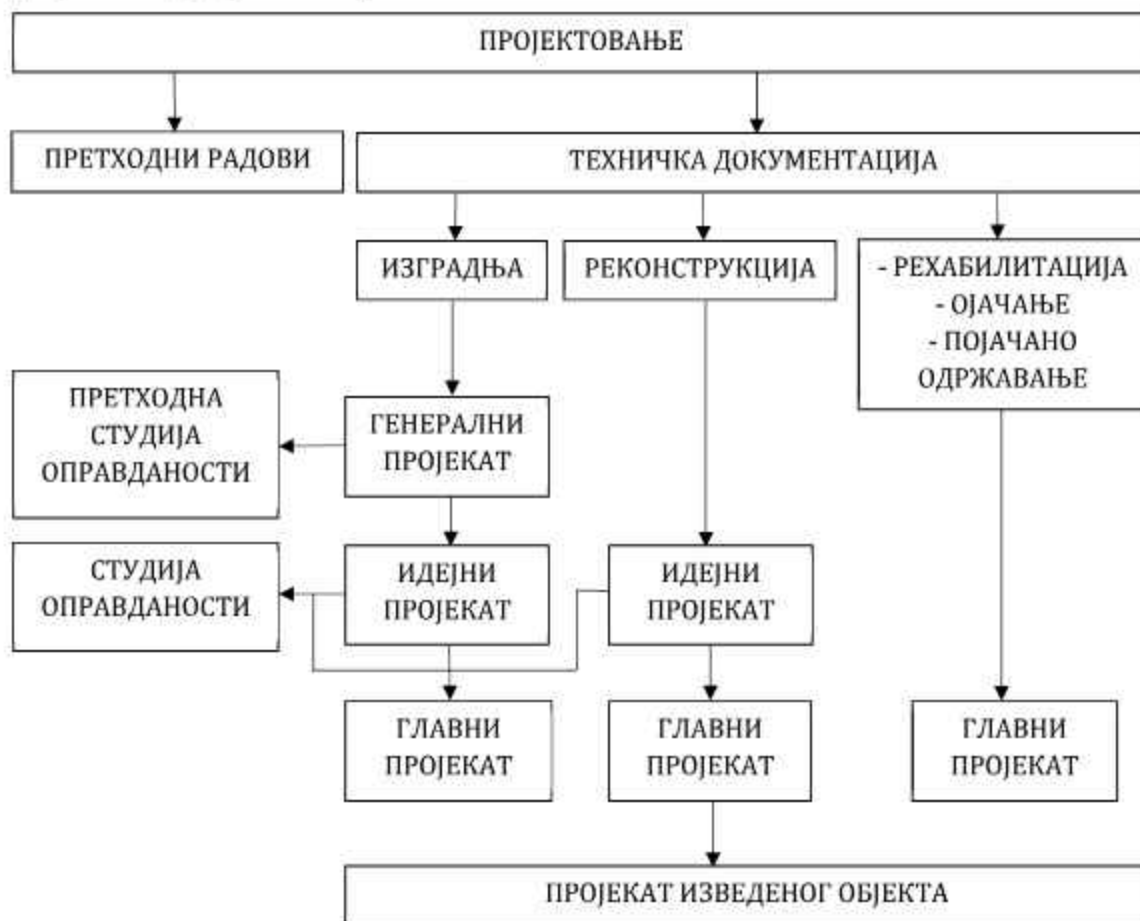
КОНФИГУРИСАЊЕ МОДУЛАРНИХ СЗБ

4.1 Пројектовање заштите од буке на путевима

Примарни циљ при пројектовању звучних баријера је смањење прекомерне буке поред саобраћајнице. Овај акустички захтев обухвата смањење нивоа буке на месту пријемника (ван саобраћајнице) и смањење нивоа буке на страни извора буке (на самој саобраћајници). Међутим, при пројектовању баријере треба узети у обзир и неакустичке захтеве: изглед, безбедност, одржавање, трошкове, животни век, могућност рециклаже и друго. Поред законске регулативе која јасно дефинише услове и техничку документацију за заштиту од буке, произвођачи опреме су развили своја типска решења као одговор на ове захтеве. Најдаље се отишло са применом модуларног пројектовања које пружа могућност формирања различитих конфигурација којима се успешно решавају скоро сви захтеви које треба да задовољи СЗБ.

4.1.1 Процес пројектовања заштите од буке на путевима

У зависности од врсте инвестиције (новоградња, реконструкција или рехабилитација), процес пројектовања путева као и других грађевинско-инжењерских објеката има строго уређену хијерархијску структуру техничке документације (слика 4.1).



Слика 4.1 Структура техничке документације у процесу пројектовања путева [81]

У складу са *Законом о планирању и изградњи*, техничка документација се дели на [82]:

- генерални пројекат,
- идејни пројекат,
- главни пројекат (пројекат за грађевинску дозволу),
- извођачки пројекат и
- пројекат изведеног објекта.

Главни пројекат представља пројекат помоћу кога се дефинише техничко решење објекта, а чини га скуп неколико пројеката који су међусобно усклађени. Њиме се утврђују „грађевинско-техничке, технолошке и експлоатационе карактеристике објекта са опремом и инсталацијама, техничко-технолошка и организациона решења за градњу објекта, инвестициона вредност објекта и услови одржавања објекта“ [81]. То је уједно и пројекат на основу којег се добија грађевинска дозвола за објекат.

Саставни део главног пројекта је и *Пројекат заштите животне средине* у оквиру кога се разрађују техничке мере заштите за следеће области: саобраћајна бука, заштита вода, земљишта, ваздуха, флоре, фауне и културних и природних добара. У оквиру овог пројекта се као посебан пројекат ради и *Пројекат заштите од буке* који у основи садржи следеће целине [83]:

- *Уводни део* у ком се дефинише законска регулатива и терминологија која се односи на заштиту од буке;
- *Вредновање буке* која садржи:
 - Изворе буке моторних возила;
 - Оцењивање буке која настаје услед одвијања саобраћаја на путу;
 - Оцењивање буке на основу прорачуна;
 - Оцењивање буке на основу мерења;
 - Оцењивање буке према прописаним критеријумима и
 - Мере за смањење буке;
- *Пројектовање заштите од буке* која садржи:
 - Техничку документацију за заштиту од буке која треба да има следеће целине:
 - Генерални пројекат,
 - Претходна студија оправданости,
 - Идејни пројекат,
 - Студију оправданости,
 - Студију о процени утицаја на животну средину,
 - Главни пројекат,
 - Извођачки пројекат (уколико је потребан)
 - Пројекат изведеног објекта.
 - Техничку документацију за заштиту од буке на постојећим деоницама;
 - Врсте мера за заштиту;
 - Оптерећење и безбедност конструкције;

- Конструкције за заштиту од буке која садржи:
 - Темљење конструкције;
 - Пројектовање конструкција;
 - Посебне мере за заштиту од буке.

4.1.2 Методе заштите од буке на путевима

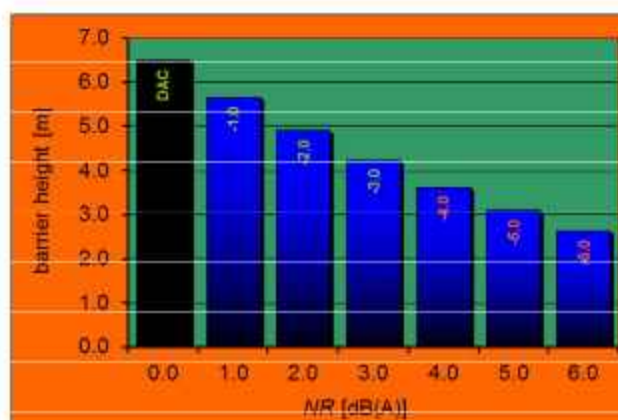
Заштита од буке друмског саобраћаја може бити примарна и секундарна. Примарне мере заштите су мере које је потребно предузети на самом извору буке, а секундарне мере су све мере које је потребно спровести на путањи којом се простиру звучни таласи, и то од извора буке све до пријемника, односно, човека кога треба заштитити од буке. Те мере се односе на слабљење буке на путу преноса, као што су фасада и фасадни елементи (прозори, балконска врата и сл.), затим звучне баријере и тип коловозног застора.

Заштита од буке друмског саобраћаја може да се реализује на више начина [84]:

- звучном изолацијом фасаде и фасадних елемената,
- звучном баријером,
- тунелом,
- избором коловозног застора,
- дубоким засадима дрвећа,
- одржавањем коловоза,
- дислокацијом пута,
- изменама саобраћајног режима,
- подизањем квалитета фонда транспортних средстава и
- активном заштитом.

Прве четири ставке су реална технички и економски оправдана средства. Тунел је акустички најефикаснији, али није увек урбанистички и саобраћајно-техничко одговарајуће решење, а са финансијско-економског аспекта је најнеповољнији. Једна од битних ставки за избор техничко-технолошких решења је ефикасност заштите (звучна изолациона моћ - R). Ефикасност заштите фасадом је $R = 20 - 40$ dB, баријером $5 - 15$ dB (ретко до 20 dB), коловозним зазором $2 - 4$ dB, дубоким засадима дрвећа $3 - 5$ dB. [84].

Иако је ефикасност заштите фасадом најбоља, њоме се решавају само проблеми буке унутар појединачних објеката али не и спољашњи простор. За разлику од овог начина, звучним баријерама штити се група објеката, али и спољашњи простор. Смањење буке посебним типовима коловозног застора (тихи коловоз) у пракси се комбинује са баријерама на делу где је потребно смањити висину баријере. Са слике 4.2 се може видети да се применом тихог коловоза може смањити бука до 4dB а да се при том висина баријере смањи за 3m [85].



Слика 4.2 Смањење висине баријере у зависности од смањења буке (noise reduction - NR) применом тихог коловоза [85], [86]

Конструкције за заштиту од буке се на основу врсте и ефикасности могу разврстати на категорије које су представљене у табели 4.1.:

Табела 4.1 Категорије конструкција за заштиту од буке [83]

Категорија	Врста конструкције	Смањење буке
A1	Рефлексиона	< 4 dB
A2	Апсорпциона	4 - 7 dB
A3	Високо апсорпциона	8 - 11 dB
A4	Супер апсорпциона	> 11 dB

4.1.3 Реализација техничких мера за заштиту од буке на путевима

Заштита од буке на нивоу главног пројекта се практично реализује у три фазе:

- анализа утицаја саобраћаја на загађење околине буком,
- архитектура баријере за заштиту од буке и
- конструкција баријере за заштиту од буке.

Анализа утицаја саобраћаја на загађење околине буком.

Анализира се појас ширине 400 m (200 m лево и 200 m десно од саобраћајнице) а прорачун нивоа буке се ради за два сценарија: анализа постојећег стања (референтна вредност нивоа буке) и анализа будућег стања са препорученим мерама заштите (коначне вредности нивоа буке). Прорачун нивоа буке се врши у складу са смерницама за заштиту од буке изазване друмским саобраћајем (немачки стандард RLS-90 и DIN 18005). За прорачун нивоа буке се најчешће користи неки од софтвера „SoundPLAN“ или „Lima“ а резултати се презентирају табеларно и графички (мапе буке). Подаци који се за потребе прорачуна уносе у софтвер су:

- подаци о изгледу терена и положају будуће саобраћајнице као извора буке,
- подаци о саобраћају (просечни годишњи дневни саобраћај-ПГДС, однос дневног и ноћног саобраћаја и процентуално учешће теретног саобраћаја у саобраћајном току),
- подаци о објектима (локација, намена, спратност итд.) који су потенцијално угрожени буком са саобраћајнице.

Архитектура баријере за заштиту од буке.

Израда карата буке решава основни концепт типа звучне баријере. У овој фази архитекте визуелно обликују баријере и дају техничко решење баријере. Параметри који се разматрају приликом избора типа баријере за заштиту од буке су:

- општи услови природног окружења (рељеф, клима, ветар и сл.),
- однос са изграђеним окружењем,
- специфични услови терена,
- задовољење потребних стандарда (ниво изолације и апсорпције) и техничких прописа и
- могућност задовољења естетски прихватљивих решења (уклапање у животну средину, стварање еколошког амбијента, обезбеђење визуелног континуитета и др.).

На основу усвојеног концепта на глобалном нивоу пројекта раде се детаљни прорачуни са фреквенцијском анализом. На основу процене нивоа буке, одређују се следећи параметри конструкције за заштиту од буке [84]:

- висина конструкције,
- удаљеност конструкције од суседне коловозне траке,
- положај конструкције,
- потребан степен апсорпције,
- потребна изолација (најмање 25 dB(A)),
- услови за планирање конструкција са транспарентним елементима за заштиту од буке.

Конструкција баријере за заштиту од буке.

Током израде пројекта конструкционог решења баријере треба узети у обзир следеће:

- калкулације звучних перформанси,
- статичку носивост баријере,
- интензитет оптерећења ветром,
- динамичко оптерећење настало чишћењем снега,
- квалитет материјала предложених за баријеру,
- конструктивне класе коришћених материјала морају бити у складу са оним наведеним у калкулацијама,
- набавка, превоз и складиштење материјала за баријере, радна снага, пред-инсталациони процеси и метод монтаже,
- акустичка својства морају бити очувана избегавањем празнина,
- лака замена делова услед оштећења,

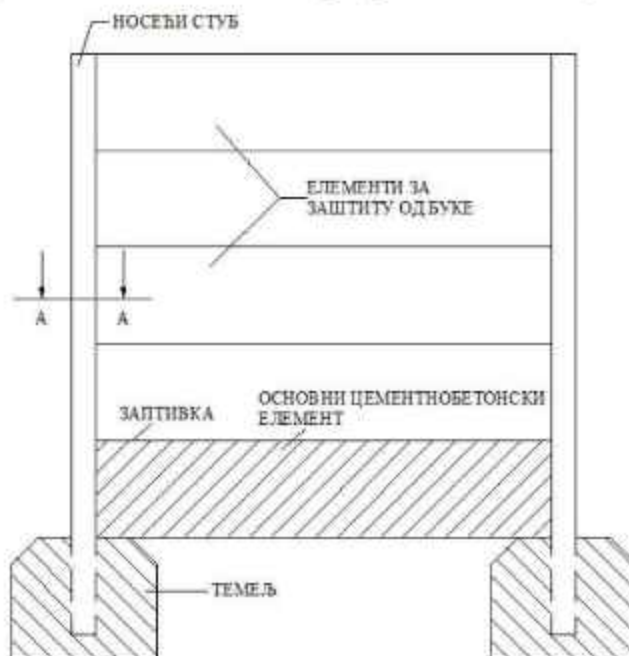
- безбедност компоненти и природа материјала који се користе за спречавање намерних оштећења,
- обезбеђен прилаз за одржавање на одговарајућој локацији.

Финални резултат главног пројекта заштите од буке је техничка документација која садржи:

- прорачун потребних мера заштите од буке (локација баријере, дужина и висина заштитних панела од буке и број објеката за пасивну заштиту),
- детаљне цртеже носеће конструкције и распореда панела на објектима као и начин монтаже панела за заштиту од буке,
- прорачун темеља и носеће конструкције баријере,
- техничке спецификације које морају испуњавати панели за заштиту од буке,
- основе за одржавање и надзор над стањем конструкције у циљу одржавања баријере,
- архитектонско-грађевински пројекат уклапања баријере за заштиту од буке у окружење.

Према [83], [84] конструкција звучних баријера има ове основне делове (слика 4.3):

- *носиву темељну конструкцију* (темељи од шипова, постоља, конструкција моста, ослонски зид)
- *стубове* (вертикална конструкција од армираног бетона или челика)
- *испунску конструкцију* (плоснати апсорпциони елемент, рефлексни елемент или обострано апсорпциони елемент) и
- *подножје* (низак зидни елемент за учвршћење панела).



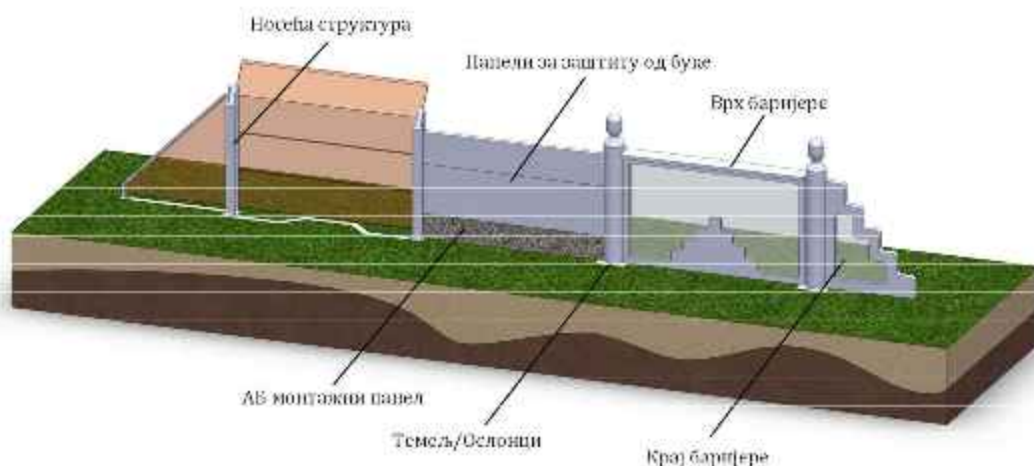
Слика 4.3 Основни елементи конструкције за заштиту од буке [83]

4.2 Морфологија СЗБ

Морфологија (од морфо- < грч. μορφή [morphé] 'облик' и логија < грч. -λογία [-logía] 'знање'; фр. *morphologie*, енгл. *morphology*) је наука о облицима која се бави структуром, облицима, врстама и грађењем одређених целина. Иако је овај термин одомаћен у лингвистици и биологији, у литератури [87] је употребљен како би се описали саставни делови и анализирали елементи баријере.

Морфологија баријере представља класификацију облика и структура од којих су баријере саграђене [23], [87]. Морфологија већине баријера (звучних зидова) у суштини није сложена јер је баријера направљена од малог броја битних делова. Најчешће целине од којих се састоји баријера за заштиту од саобраћајне буке су:

- темељ
- зид баријере
- крајеви баријере
- носећа структура
- монтажни елементи.



Слика 4.4 Морфологија баријере за заштиту од буке

Баријера има две фасаде: предњу и задњу. Предња је окренута ка саобраћајници док је задња окренута ка области која се штити од буке. Визуелни изглед предње и задње фасаде су често различити а захтев за смањење нивоа буке се обично односи само на једну страну баријере.

Профил баријере је најчешће вертикалан али може бити и нагнут под углом, конкаван или конзолни чиме се утиче на правац рефлексије звука али и на естетски изглед баријере. У зависности од топографије терена и баријера се мора прилагодити самом терену па су чести степенести (каскадни) облици баријере.

4.2.1 Темељ/ослонци баријере

Задатак темеља је да целокупно оптерећење од баријере пренесе на носиво тле при чему не сме доћи до деформација и штетних напона у тлу јер би то довело и до

деформација баријере. За правилно пројектовање и израду темеља потребно је познавати оптерећења баријере и детаљно познавање земљишта у коме се врши фундирање (темељење), тј. склоп терена, његову слојевитост, физичке особине и др.

На основу дубине фундирања (темељења) темељи могу бити плитки и дубоки. *Плитки темељи* се углавном раде на дубини од око један метар. У подручјима где су чести мразеви, то је дубина до које мрзне тло. Уопштено речено, плитки темељи се раде до дубине на којој је први стабилан слој терена. Ако се на дубини мањој од дубине смрзавања наиђе на чврсти камен, темељи се изводе најмање 300 mm у камену. Ови темељи имају различите облике и могу бити: тракасти темељи, темељи самци, темељне плоче, темељни роштиљи.

Дубоки темељи су у употреби када је потребно ослонити објекат на стену или дубоки слој тла који има боље физичко-механичке карактеристике у односу на горњи (површински) слој. Постоји више врста ових темеља, као што су: шипови, кесони, бунари.

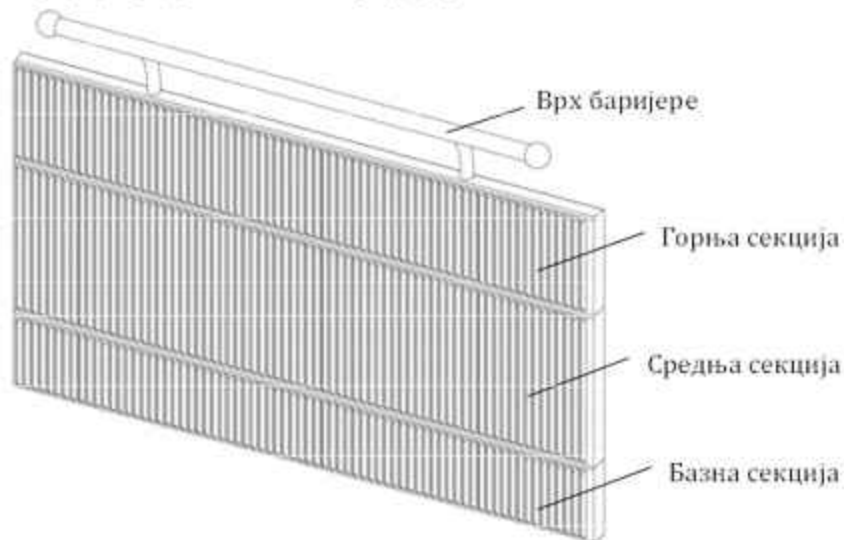
За привремене (мобилне) звучне баријере се користе масивне стопе или ослонци са контра теговима или косим подупирачима што је обрађено у делу 3.2.7.

4.2.2 Зид баријере

Зид баријере представља најзначајнији део звучне баријере. Он обавља главну улогу баријере а то је да одбијањем, апсорпцијом или дифракцијом смањи претерани ниво буке на задовољавајући ниво.

Код овог модула се могу уочити три целине [23], [87]:

- доњи део (базна секција),
- средњи део (средња секција),
- горњи део (горња секција),
- врх баријере (горња ивица баријере).



Слика 4.5 Зид баријере [23]

Зид баријере се ретко ради из једног дела а чест је случај да се и поједине секције склапају од више истородних или разнородних панела.

Доњи део зида баријере је најчешће АБ (армирано-бетонски) монтажни панел. Он се израђује од квалитетног бетона С30/37(МВ35) у фабрици и отпоран је на мраз и соли. АБ монтажни панел се уграђује између носећих стубова и служи да се на њега монтирају апсорпциони панели. Овај панел је у стварности заклоњен засадама, травом или можда ивичњацима или сигурносним оградом. Засади смањују загађења од издувних гасова аутомобила и дају баријери добар визуелни ефекат и боље уклапање у околину. Између доње ивице и темеља се најчешће остављају отвори који обезбеђују потребну дренажу за прикупљену воду и пролаз за мање животиње.

Средњи део баријере обично представља највећи видљиви део баријере. У идеалном случају, да би се избегао несклад и визуелна дисхармонија, пожељно је да средњи део баријере садржи само један материјал са могућношћу промене његовог облика и боје. Средњи и горњи део најчешће чине једну целину и формирају се од истих панела.

У сеоским областима је пожељно да баријере буду сакривене вегетацијом или да буду транспарентне како би се уклопиле у пејзаж. Најчешће се *горњи део* ради од провидних материјала како би се баријера уклопила у позадину неба или вегетације. Ово такође може да буде случај у урбаним областима у којима многе баријере користе провидне и лакше материјале на врху да се смањи укупна привидна висина баријере и да омогући да светлост прође кроз њу.

Већина баријера има једноставну и ненаметљиву горњу ивицу. Пројектанти каткад себи дају за право да због побољшања естетског изгледа баријере конструишу специјалне облике *врха баријере*. Међутим, чешћи је случај да се врх баријере поставља из акустичких разлога што је детаљно обрађено у делу 3.3.1.

4.2.3 Крајеви баријере

Нагли завршетак код баријера лоцираних у градској зони је често визуелно прихватљив, међутим, у руралним и полуруралним срединама је визуелно прихватљивије ако се ови крајеви прикрију или посебно обликују.

Одговарајући изглед се може постићи употребом неког карактеристичног профила, који се монтира као додатак на пуну дужину баријере чиме се интегрише (уклапа) у укупан дизајн баријере. Задатак крајњег профила је да обезбеди постепен визуелни прелаз са простора заклоњеног баријером на слободан простор без баријере и у суштини више представља естетски детаљ него акустично функционални.

Уколико је неопходно прикривање крајева баријере, онда је најједноставнији начин да се посади засад, али је визуелно пријатније уколико се засад посади дуж баријере са обе стране. Међутим, већина баријера почињу и завршавају се конусом, степенасто или нагло а каткад се користе и специфични облици.

4.2.4 Носећа структура

Баријера може бити изложена значајним оптерећењима, посебно оптерећењу ветра, и мора бити дизајнирана да задовољи одговарајуће услове. Ову функцију преузима носећа структура која може бити видљива или пак, скривена у фасади.

Већина баријера је формирана од панела за заштиту од буке, који су директно позиционирани између вертикалних носећих стубова. Код модуларних баријера, носећи стубови се обично фиксирају за бетонску подлогу (темељ) анкер вијцима преко прирубнице или директним бетонирањем у темељ. Уколико се носећа структура монтира на конструкцијама мостова и потпорним конструкцијама онда се веза остварује преко посебно обликованих анкер плоча.

Код већих распона где је мањи број носећих стубова често је неопходно обезбедити и додатну структурну подршку као што су укрућења стубова или коси подупирачи који се обично постављају са задње стране баријере. Поред основне функције, носећа структура може имати и важну визуелну функцију ради уклапања баријере у околни пејзаж.

Ради заштите носећих стубова обично се на њиховом врху монтирају заштитне капе обрађене у делу 3.3.8.

4.2.5 Монтажни елементи

Важни елементи баријере, посебно у погледу монтаже, погодности одржавања, трошкова и отпорности на временске услове су монтажни елементи. Они треба да омогуће лако монтирање баријере на месту употребе и једноставно и лако уклањање и замену оштећених панела или модула. Ово је уједно и најважнија предност модуларне структуре јер је у случају оштећења одређених модула баријере знатно брже и јефтиније заменити модул него вршити његову репарацију. При том, изглед баријере остаје исти као пре оштећења.

Везни елементи су већином једноставне компоненте. То су завртањске везе између стубова и темеља (анкер вијци), опруге за фиксирање панела, компензацијски профили, заптивне траке и сл.

Сложенији елементи везе се каткад јављају само у горњем делу баријере када је потребно обезбедити везу вршних делова баријере који имају украсни или функционални карактер.

4.2.6 Остали елементи баријере

Поред напред поменутог баријера често захтева и друге елементе као што су:

- отвори или врата за хитне случајеве, одржавање баријере или растиња иза баријере,
- дренажни отвори,
- вертикални ослонци за биљке пењачице,
- посебни носачи или додаци причвршћени на зидове баријере и сл.,

који су детаљно обрађени у делу 3.

4.3 Конфигурисање модуларне СЗБ

Развој конфигурабилних производа заснован на модуларној структури производа се данас користи као један од главних начина за решење проблема прилагођења производа индивидуалним захтевима корисника. Иако су производи који се формирају на овај начин предефинисани, тржишту нуде знатно већи број варијанти производа чиме се задовољава широк опсег захтева купаца. Конфигурабилни производи се формирају од релативно малог броја компоненти и модула те су произвођачи у могућности да комбинују све предности како серијске тако и појединачне производње што се у литератури зове *серијско прилагођавање* [88].

Конфигурисање производа „представља активност помоћу које се одређује структура варијанте производа која је прилагођена захтевима купца, унутар ограничења постављених архитектуром производа“ [88]. Процес конфигурисања производа започиње дефинисањем листе захтева и представља итеративни поступак где се од мноштва могућих конфигурација бира она конфигурација која најбоље задовољава постављене захтеве купца. Могуће конфигурације производа се формирају из расположивог скупа елемената и модула при чему је потребно испоштовати одређена правила и ограничења. Процес конфигурисања се своди на следеће фазе [88]:

- дефинисање веза између расположивих модула и листе захтева,
- избор адекватних модула,
- одређивање веза између модула,
- одређивање инстанци модула према листи захтева,
- провера некомпатибилности инстанци модула и
- провера потпуности конфигурације.

Да би се конфигурисала модуларна СЗБ неопходно је:

- дефинисати платформу производа,
- дефинисати и класификовати основне модуле баријере и
- дефинисати поступак конфигурисања производа.

4.3.1 Платформа производа и фамилија производа

Платформа производа представља скуп смерница које произвођачу омогућују да развије довољан број варијанти производа, са циљем задовољења потреба потрошача. Платформа производа обухвата [88]:

- скуп основних физичких компоненти (делова и модула) који егзистирају у „пројектној равни“,
- скуп правила и релација за конфигурисање могућих варијанти производа,
- скуп расположивих технолошких могућности које поседује произвођач у домену производње,
- скуп запослених и њихових односа,

- скуп расположивог знања у домену конструкције, технологије, математичког моделирања, тестирања производа и др.

Варијанте производа које предузеће нуди тржишту ради задовољења индивидуалних потреба потрошача а које се остварују применом модуларне структуре и платформе производа представљају *фамилију производа*. Када су у питању баријере за заштиту од саобраћајне буке, предложеном методологијом је могуће формирати две фамилије баријера:

А) *Фиксне баријере* за заштиту од буке које могу бити:

- постављене на земљу и
- постављене на носећу структуру.

Б) *Мобилне (привремене) звучне баријере* као што су:

- самоносеће баријере са стопама,
- модуларни панели монтирани на бетонски профил,
- лаки мобилни панели и
- мобилни панели са точковима.

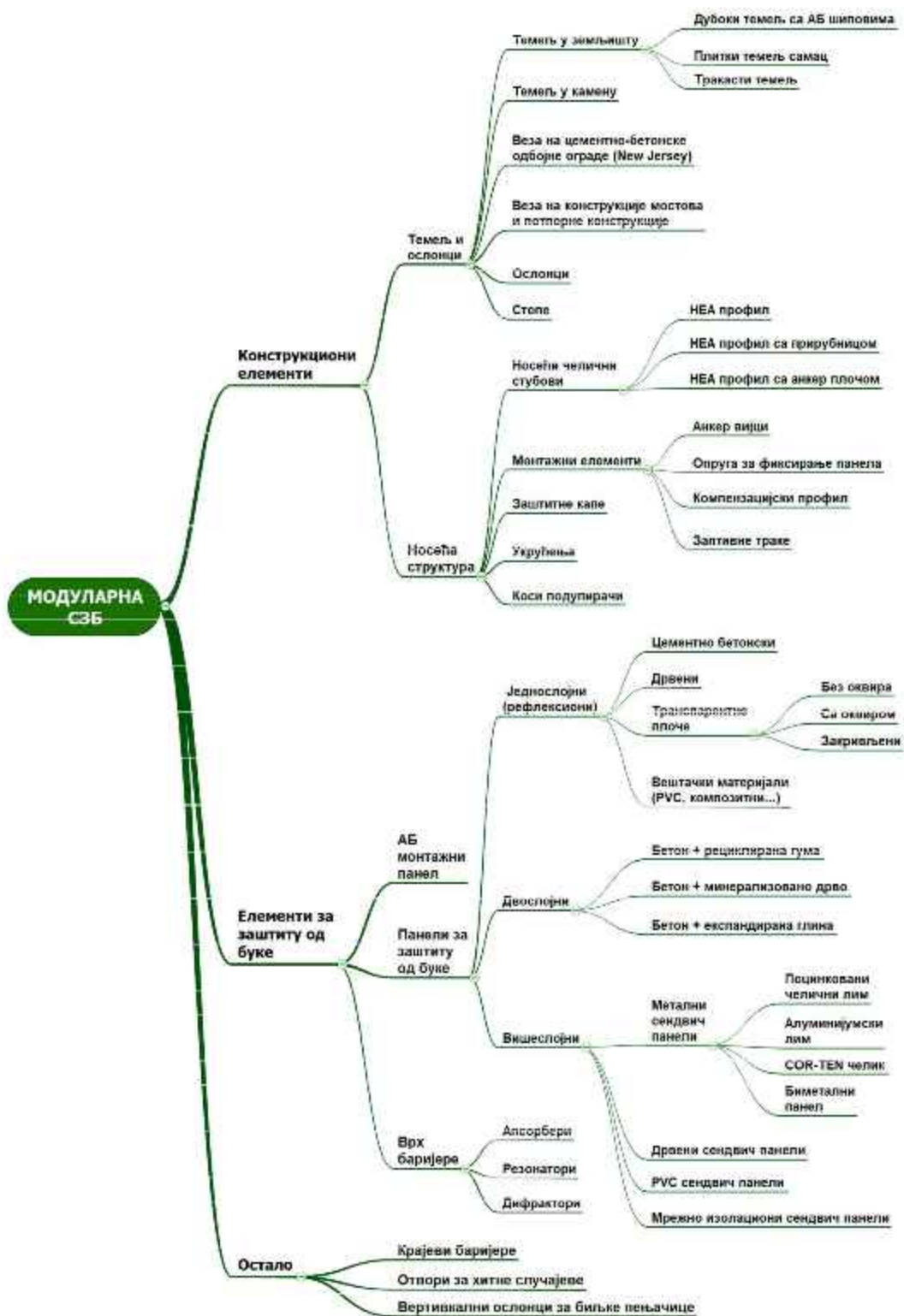
4.3.2 Модуларно структурирање производа

Као што се може видети из анализе која је урађена у претходном поглављу, најчешће се користе модуларни типови баријера. *Модуларна градња* баријере је систем градње од индустријски произведених елемената, при чему се појединачни модули (зид баријере, носећа структура и крајњи профили), осим темеља, у потпуности израђују у фабрици, транспортују се на место употребе и састављају на месту коришћења.

Употребом модуларне структуре добија се производ који је састављен од модула које је могуће заменити и којима је могуће променити геометријске величине или функције да би се остварио довољан број различитих варијанти. Предности примене модуларне структуре производа су [89]:

- могућност да се комбинацијом модула формира већи број варијанти производа,
- могућност замене модула,
- нижа цена варијанти производа,
- једноставније одржавање и замена делова,
- могућа демонтажа производа на крају његовог животног циклуса.

На основу претходних анализа на слици 4.6 је приказан предлог структуре модуларне звучне баријере и њених основних модула.



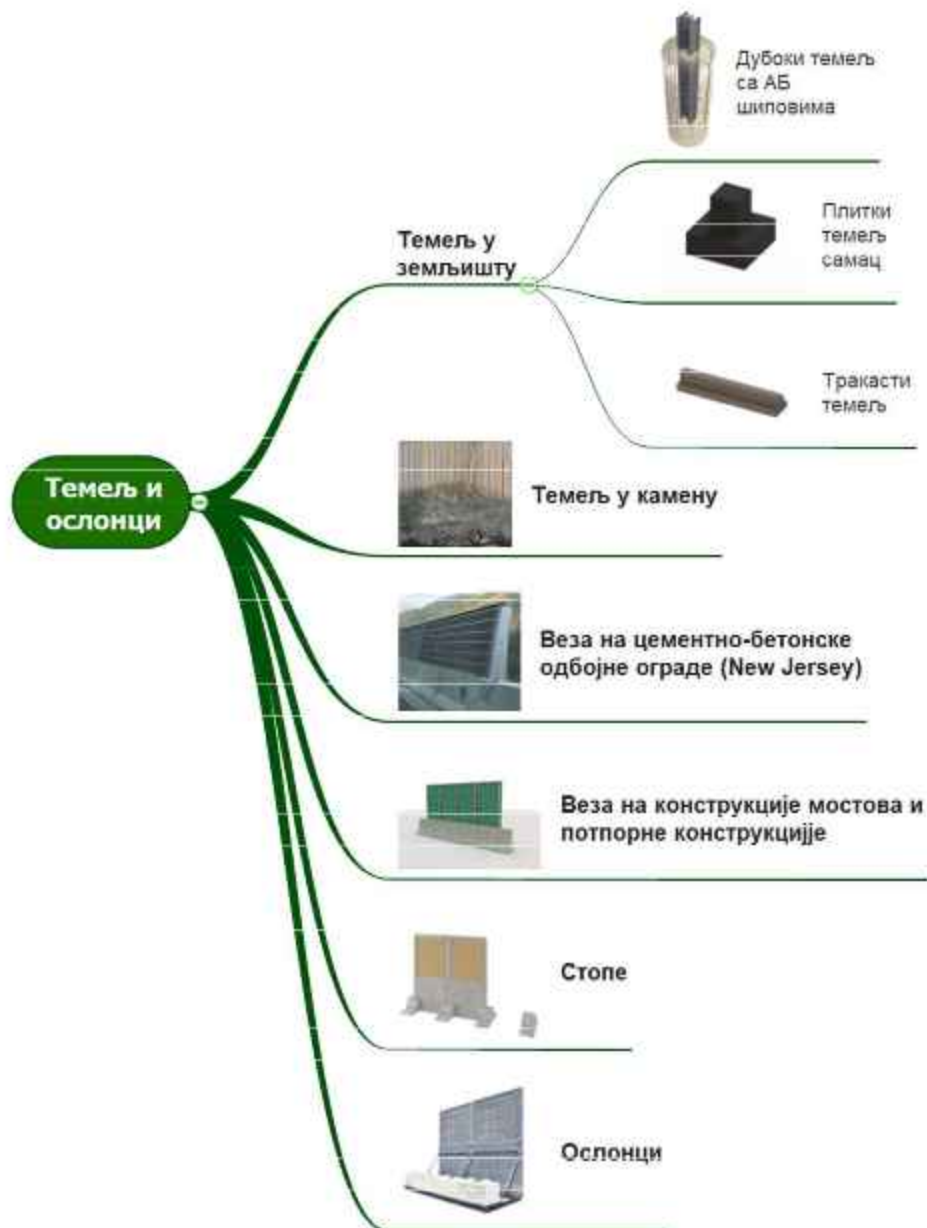
Слика 4.6 Структура модула СЗБ

Структура модуларне СЗБ је конципирана да има три основне целине односно, групе модула:

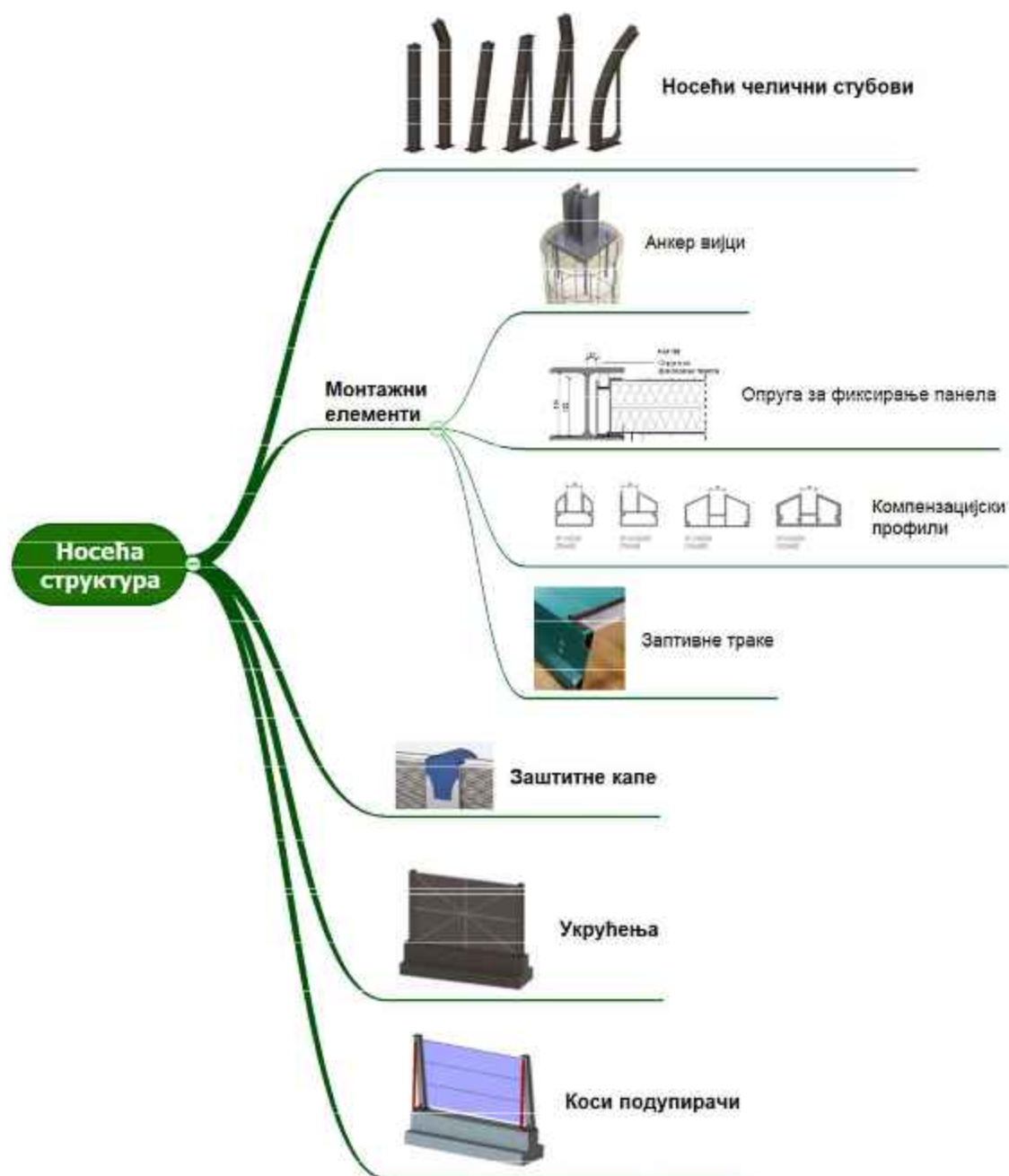
- конструкциони елементи
- елементи за заштиту од буке
- остали модули.

Конструкциона група модула

Конструкциони модули се састоје из модула темеља и ослонаца (слика 4.7) и модула носеће структуре (слика 4.8).



Слика 4.7 Модули темеља и ослонаца



Слика 4.8 Модули носеће структуре

Модули елемената за заштиту од буке (зида баријере)

Зид баријере се састоји од три групе модула:

- АБ монтажни панел,
- панели за заштиту од буке и
- врх баријере.

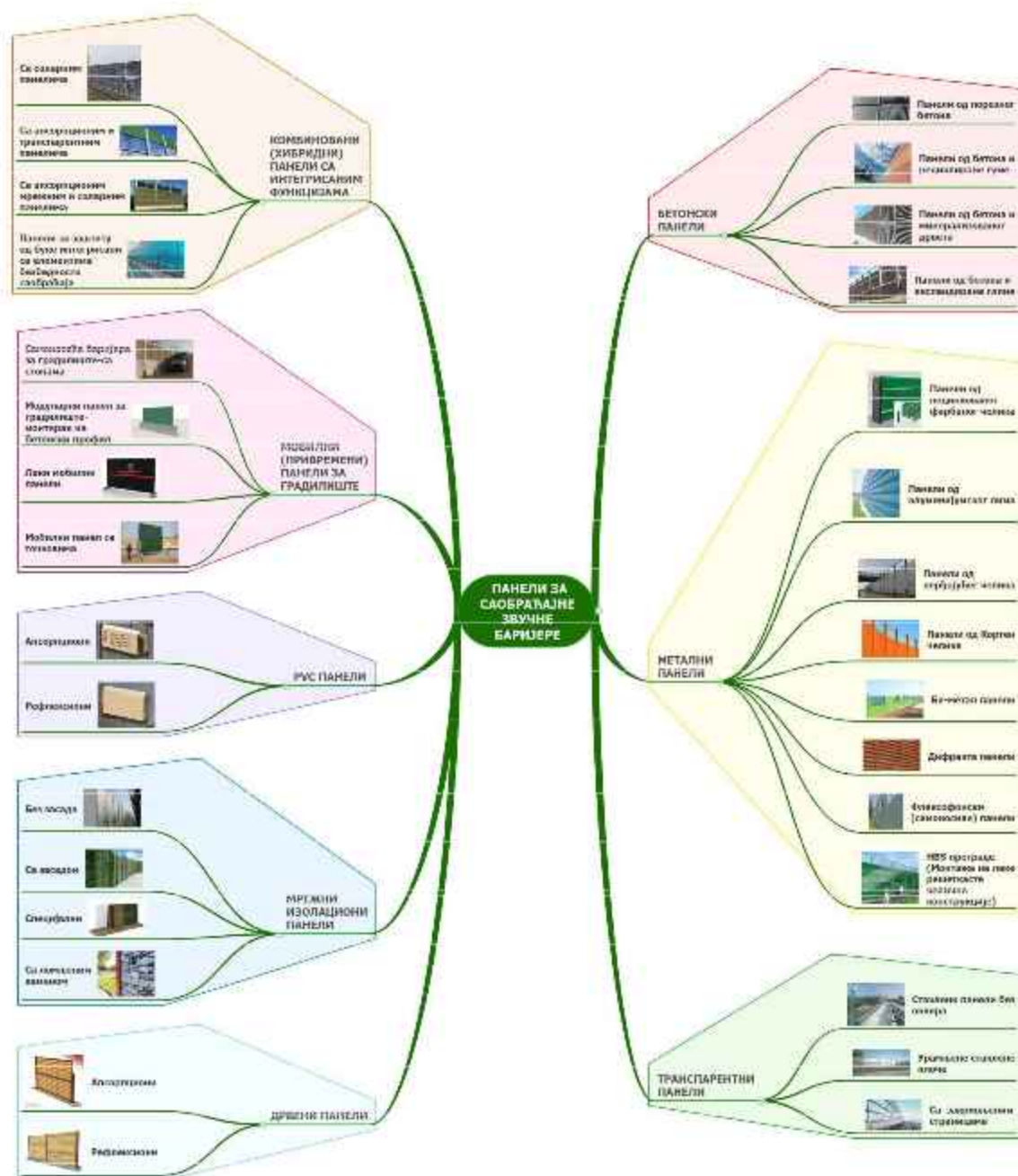
Најбројнија група модула су панели за заштиту од буке. Они могу бити једнослојни, двослојни и вишеслојни [83].

Једнослојни панели су најчешће рефлексиони и могу бити израђени од цементног бетона, опеке, камена или вештачких материјала. У ову групу спадају и транспарентни панели израђени од полиакрила или поликарбоната. Основни проблем код транспарентних панела је њихово причвршћивање због великих температурних разлика те им треба омогућити померање у простору због ширења условљеног температуром.

Двослојни панели се састоје од носећег (задњег) слоја који се најчешће ради од бетона и предњег апсорпционог слоја. Основни проблем који се јавља код ових панела је веза између ова два слоја и могућност њиховог раздвајања и отпадања апсорпционог слоја.

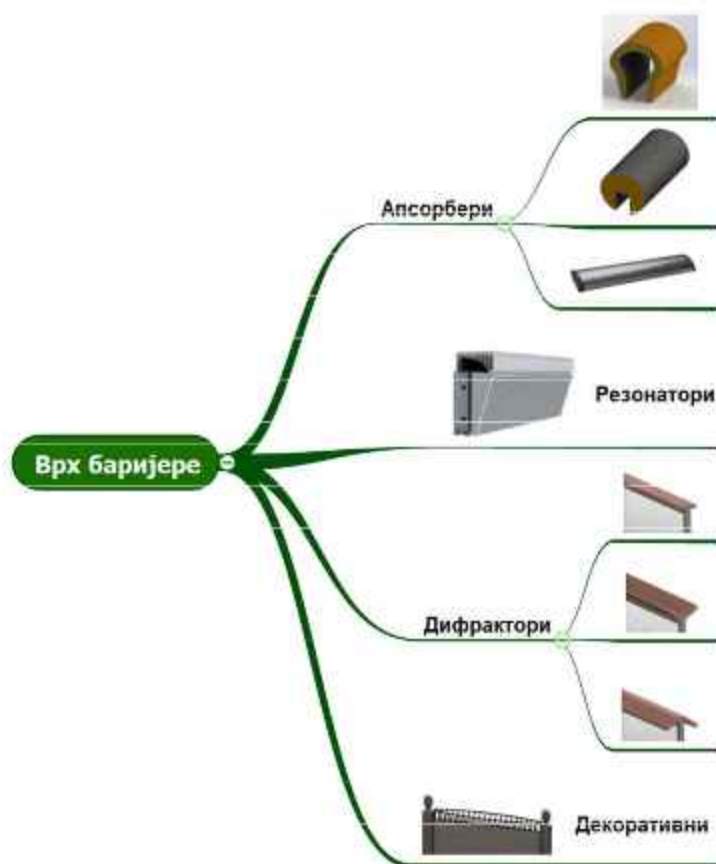
Вишеслојни (сендвич) панели су свакако најбројнији. Раде се од носећег (задњег) слоја, апсорбујућег средњег слоја и предњег слоја који служи за заштиту површине апсорбујућег слоја. Предњи слој је најчешће израђен од перфорираног лима, цементног стакла или дрвених летви да би омогућио пролаз звучне енергије до апсорпционог слоја. Сендвич панели могу бити и двострано апсорпциони уколико је потребна заштита од буке са обе стране баријере. Носећи слој је у том случају у средини баријере, на њега се са обе стране постављају апсорпциони слојеви а заштитни слојеви се постављају са спољашњих страна.

С обзиром на то да се произвођачи панела специјализују за производњу панела од одређених материјала (бетон, дрво, метал, PVC и др.) или за одређење типове панела (транспарентни, сендвич, мрежни и сл.), класификација је урађена према врсти материјала од којих се израђују панели уз додатак панела за мобилне баријере и панела за комбиноване (хибридне) панеле (слика 4.9).



Слика 4.9 Модули панела за заштиту од буке

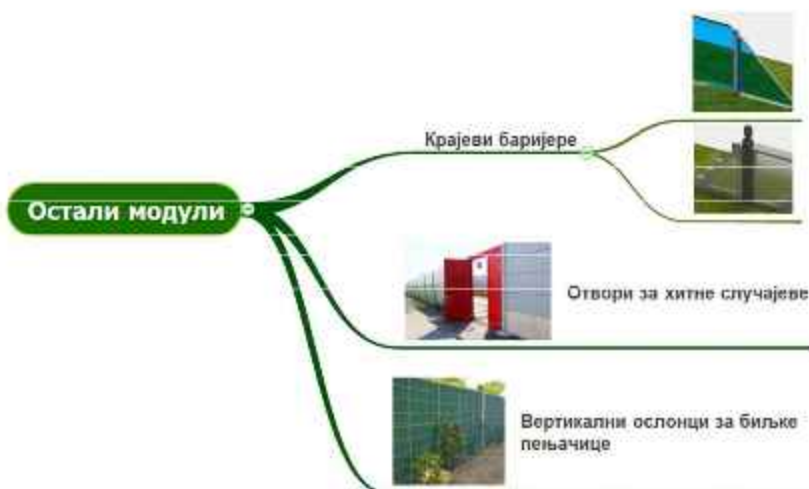
Модули врхова баријере могу бити декоративни или у виду апсорбера, резонатора или дифрактора (слика 4.10).



Слика 4.10 Модули врхова баријере

Остали модули

У осталу групу модула спадају модули који се ређе користе и нису увек обавезни део баријере за заштиту од саобраћајне буке као што су: крајеви баријере, отвори за хитне случајеве, вертикални ослонци за биљке и др.

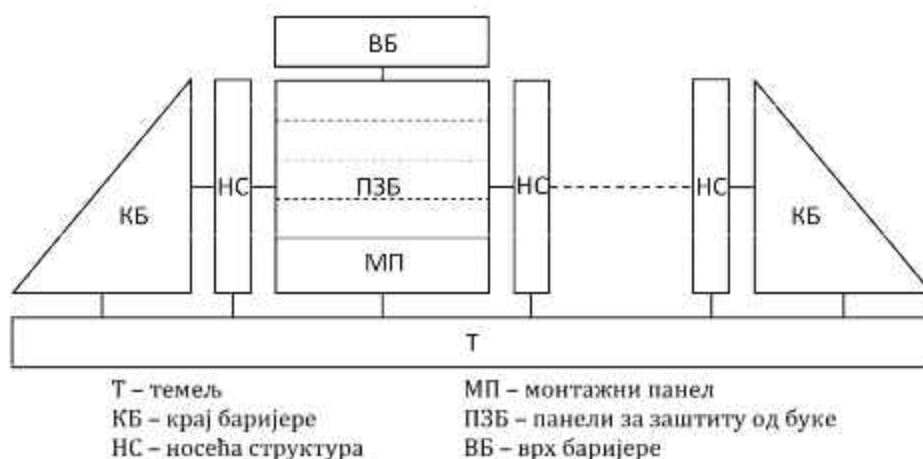


Слика 4.11 Остали модули

4.3.3 Конфигурисање модуларних СЗБ

Поступак формирања (конфигурисања) модуларне звучне баријере (слика 4.12) је следећи:

- прво се формира темељ (Т) који се излива на месту постављања баријере,
- на темељ се затим фиксирају носећи стубови (НС) и по потреби укрућења и подупирачи,
- између носећих стубова се формира зид баријере који се монтира од:
 - армирано-бетонског монтажног панела (МП),
 - панела за заштиту од буке (ПЗБ) и
 - врха баријере (ВБ), уколико је захтевом предвиђено да баријера има врх,
- на врхове носећих стубова се монтирају заштитне капе,
- уколико је предвиђено документацијом, на баријеру се монтирају и остали модули:
 - крајеви баријере (КБ)
 - отвори за хитне случајеве
 - вертикални ослонци за биљке пењачице и др.

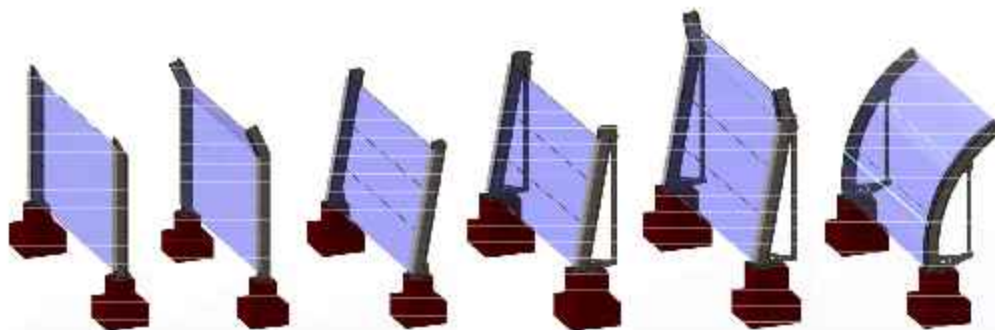


Слика 4.12 Шема поступка конфигурисања модуларне звучне баријере

Систем развијених модула омогућује и реализацију различитих варијација у процесу конфигурисања у зависности од акустичких и неакустичких захтева и конфигурације терена на којој се поставља баријера.

Варијације нагиба и облика профила баријере

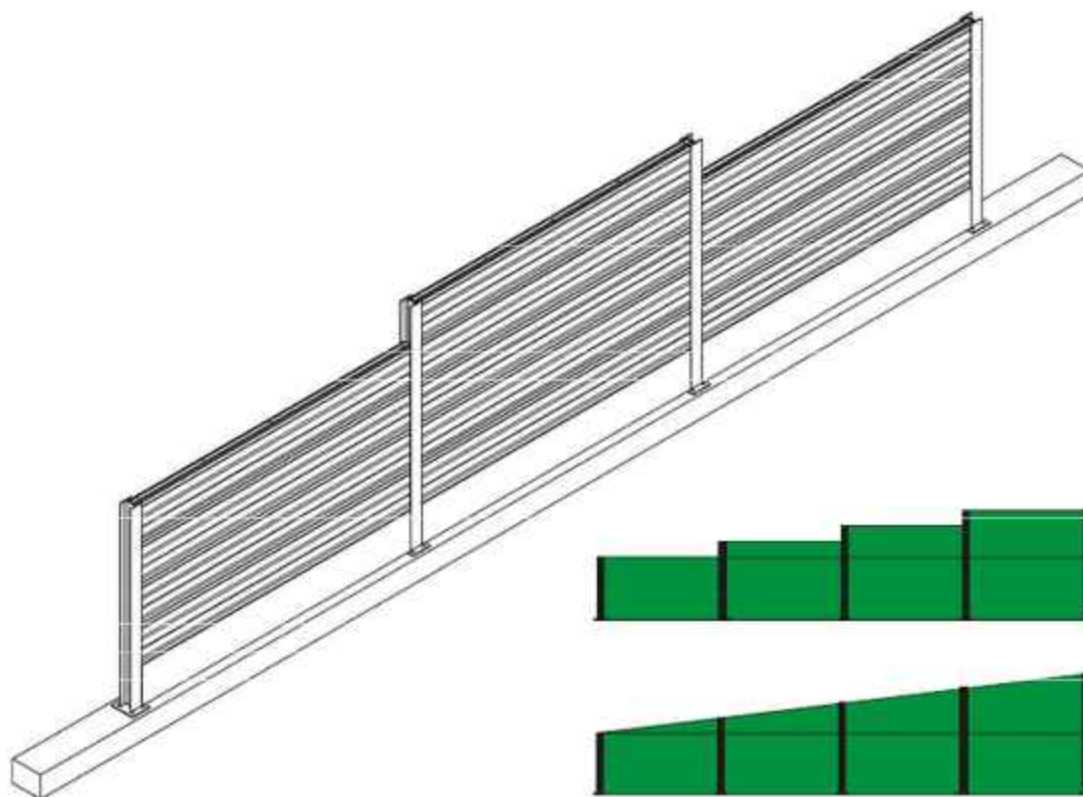
Задовољавање акустичких критеријума често захтева да баријера буде нагнута или да горњи део буде у виду конзоле. Различити облици профила баријере се остварују комбинацијом фонда модула носеће структуре и фонда модула од којег се формира звучни зид (слика 4.13).



Слика 4.13 Варијације нагиба и облика профила баријере [89]

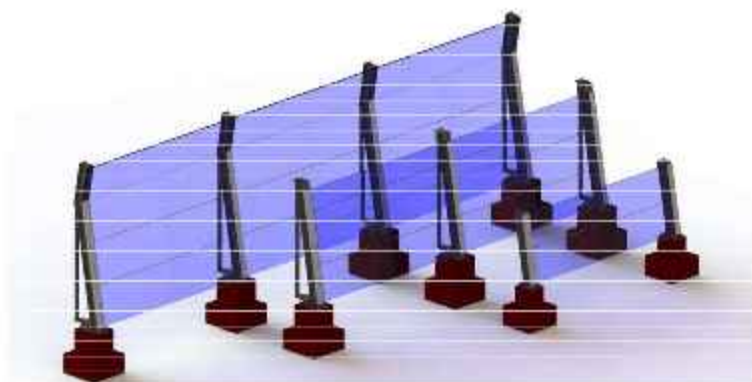
Варијације висине и облика профила

Фонд расположивих модула носеће структуре омогућује да се задовоље и захтеви варијације висине баријере. Овај услов се може испунити варирањем димензија носећих стубова тј. носеће структуре (слика 4.14) и стандардних (правоугаоних) панела тако да се добија степенаст облик баријере. Уколико је захтев да се избегне степенаст облик баријере, неопходно је развити и посебне облике модула изолационих панела који то омогућују.



Слика 4.14 Варијације висине профила баријере

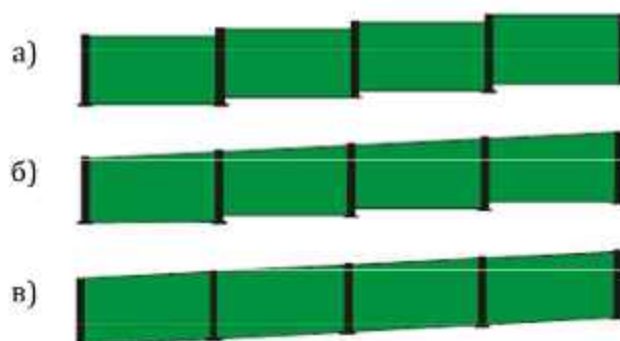
Варијација висине баријере се може комбиновати и са различитим облицима профила баријере (слика 4.15).



Слика 4.15 Варијације висине и облика профила баријере [89]

Варијације услед конфигурације терена

Конфигурација терена на ком се постављају баријере се најчешће састоји од мноштва узвишења и низбродца што се најчешће решава степенастим обликом баријере (слика 4.16 а). Уколико је захтев да се избегне степенаст облик баријере, неопходно је развити и посебне облике модула изолационих панела који то омогућују (слика 4.16 б и в).

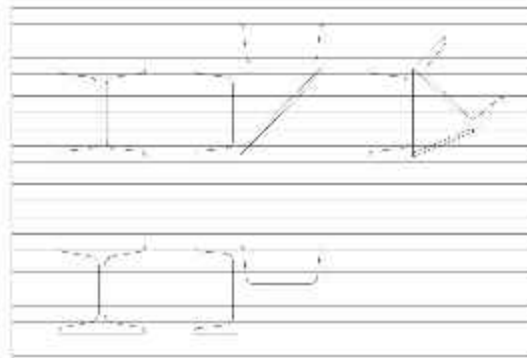


Слика 4.16 Варијације висине баријере у зависности од нагиба терена

Често је конфигурација терена таква да није могуће поставити праволинијску баријеру већ је неопходно обезбедити и промену правца зидова баријере (слика 4.17). У том случају је потребно имати на располагању фонд различитих облика носећих стубова којима се може удовољити овом захтеву (слика 4.18)



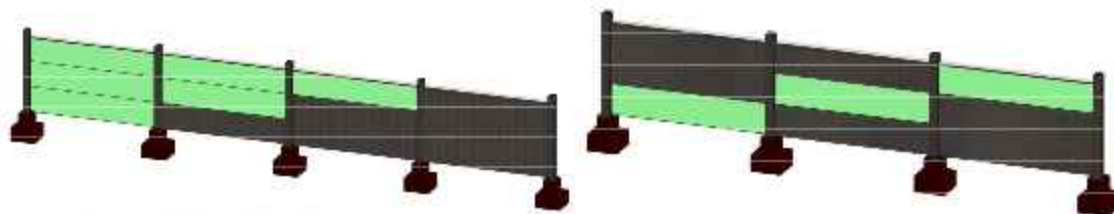
Слика 4.17 Варијације промене правца баријере у зависности од конфигурације терена баријере [87]



Слика 4.18 Облици модула носећих стубова за обезбеђење промене правца пружања баријере [89]

Комбинације различитих врста панела за формирање звучног зида

Ради уклапања у околни амбијент и задовољења визуелне привлачности баријере најчешће се комбинују различити типови панела за формирање зида баријере. Да би се повећала видљивост тј. прегледност саобраћајнице честа је комбинација провидних и непровидних панела (слика 4.19).



Слика 4.19 Комбинација различитих типова панела за формирање зида баријере [89]

Урбана средина је уједно и прилика да архитекте и уметници оставе и нешто по чему би били препознатљиви па се дозвољава и уметничко осликавање или естетски третман зидова баријере.



Слика 4.20 Естетски третман баријере [90]

За разлику од урбане средине где се баријере које се граде од вештачких материјала уклапају у простор, за руралне средине је пожељан отворен простор, природно дрвеће и жбуње. Зато се у руралним срединама уместо баријера обично раде природне препреке у виду земљаних насипа, а уколико је потребно поставити баријере, онда је пожељно да се оне комбинују са природним засадима који имају задатак да сакрију њихову видљивост (слика 4.21).



Слика 4.21 – Комбинација баријере са природним засадима [87]

Да би се из мноштва могућих конфигурација модуларне баријере за заштиту од буке одабрала оптимална конфигурација, неопходно је дефинисати критеријуме за избор модула (пре свега панела за заштиту од буке) и развити математички модел за подршку одлучивању. Решење овог проблема је приказано у поглављима која следе.

ПОГЛАВЉЕ
5

**КЛАСИФИКАЦИЈА КРИТЕРИЈУМА ЗА
КОНФИГУРИСАЊЕ МЗБ**

5.1 Критеријуми за пројектовање баријера

Основни циљ који мора да задовољи успешно пројектовање звучних баријера је акустичка ефикасност. Међутим, решење мора и визуелно да буде прихватљиво и у складу са разним инжењерским, безбедоносним, еколошким и многим другим захтевима који ће бити представљени у овом поглављу.

Критеријуми тј. захтеви које је потребно испоштовати у процесу пројектовања саобраћајних звучних баријера се могу класификовати у четири основне групе: инжењерски, безбедоносни, еколошки и остали (слика 5.1.).



Слика 5.1. Критеријуми за пројектовање и избор СЗБ

5.2 Инжењерски захтеви

Постоји велики број инжењерских захтева које треба размотрити при пројектовању звучних баријера као што су: животно век баријере, статичко оптерећење од сопствене тежине, статичко оптерећење због снега, оптерећење ветром, динамичко оптерећење услед проласка возила, сеизмичко оптерећење, ударно оптерећење које укључује удар камења или делова возила током нормалног коришћења пута, удар возила, и сл. [24], [25]. За потребе овог рада, сви инжењерски захтеви су класификовани у 5 група:

- функционални захтеви,
- животно век баријере,
- конструкциони фактори,
- технологичност израде и монтаже и
- одржавање.

5.2.1 Функционални захтеви

Функционални захтеви које треба размотрити при пројектовању звучне баријере су:

- акустичка ефикасност баријере и
- трајност (*Durability*) баријере.

5.2.1.1 Акустичка ефикасност (акустички захтеви)

Основни задатак саобраћајних звучних баријера је да се смањи ниво буке који долази до окружења, због чега акустичка ефикасност игра кључну улогу при њиховом пројектовању. *Акустичка ефикасност баријере* подразумева способност баријере да ослаби звук при проласку кроз баријеру. Ако је пријемник буке ван коловоза, није битно да ли се звук апсорбује у зиду или рефлектује ка извору. Међутим, ако је пријемник на коловозу, постоје додатни акустички захтеви. У том случају баријера мора да рефлектује звук према горе или да га апсорбује, а мањи део да се рефлектује назад на коловоз [91].

Да би се постигла захтевана акустичка ефикасност, пројектанти морају узети у обзир мноштво фактора, укључујући:

- фреквенцијски спектар буке и укупни ниво буке,
- апсорпцију терена и метеоролошке услове,
- дивергенцију таласа и апсорпцију ваздуха,
- утицај зелених густих засада,
- утицај рефлексије баријере,
- димензије и облик баријере,
- размак између звучне баријере и извора буке,
- материјал баријере и др.

Сви ови параметри и њихов прорачун су обрађени у делу 2 ове дисертације.

5.2.1.2 Трајност (*Durability*) СЗБ

Трајност (енг. *Durability*) се односи на способност производа да задржи своју функционалност током дужег временског периода, без значајног пропадања или оштећења. То значи да производ треба да одржава свој квалитет, поузданост и перформансе током очекиваног радног века чиме се смањује потреба за поправкама или заменским деловима.

Код саобраћајних звучних баријера *Durability* се односи на што мањи губитак функционалности односно, акустичке ефикасности услед утицаја спољашњих фактора као што су: атмосферски утицаји, механичка оштећења или изложеност хемикалијама. У том смислу, главни фактори који утичу на дуготрајност баријере су:

- материјали,
- конструкција и
- одржавање.

Одабир адекватних материјала је један од кључних фактора. Веома је важно да се користе материјали који су отпорни на корозију, UV зраке, температурне промене, хемикалије и друга оштећења која могу настати услед дуготрајне изложености спољним факторима.

Решења прво треба потражити у дизајну баријере као што је на пример, конструкционо решење врха баријере са одговарајућим нагибом како би се смањило накупљање воде на врху баријере и омогућило њено лако отицање.

Редовно одржавање звучних баријера је кључно за њихову дуготрајност. Одржавање може укључити чишћење, премазивање и замену оштећених делова. Редовно чишћење баријере је битно предвидети због наслага прашине и других загађивача који могу смањити акустичку ефикасност баријере.

5.2.2 Животни век баријере

Животни век баријере представља временски период током којег баријера задржава своје карактеристике и функцију под утицајем спољашњих чинилаца у разумним границама. Он зависи од више фактора: квалитета материјала који се користе при изради баријере, климе подручја у ком се поставља баријера, изложености атмосферским утицајима, изложености хемикалијама, близине саобраћајнице, начина одржавања, итд. Ако се пројектовање звучне баријере добро уради и предвиди правилно и правовремено одржавање, продужиће се животни век баријере који варира од 15 до 30 година. Циљ је постићи што већу трајност уз минималне трошкове одржавања.

Међутим, фактори као што су изложеност хемикалијама, ударци од тешких предмета, оштећења од возила и слично могу непланирано скратити животни век баријере. Зато је, поред доброг пројектовања и квалитетне израде баријере, потребно редовно одржавање како би се осигурало максимално трајање и ефикасност баријере.

5.2.3 Конструкциони фактори (енг. *Structural considerations*)

Конструкциони фактори које је потребно размотрити при пројектовању звучних баријера су:

- оптерећења, напрезања и деформације делова баријере,
- дилатације услед промене температуре,
- дужина и висина баријере,
- темељи баријере,
- дренажа баријере,
- отпорност баријере на влагу и циклусе смрзавања и одмрзавања,
- стандардизација делова, димензија и модула и др.

5.2.3.1 Оптерећења баријере

Оптерећење баријере је један од важних фактора који се треба узети у разматрање приликом конструкције звучних баријера. Конструкција баријере може бити изложена различитим врстама оптерећења која делују на њих. Можемо их класификовати у три основне групе:

- статичка,
- динамичка и
- специфична.

Статичко оптерећење је оптерећење које стално делује на конструкцију без промене интензитета или правца током времена. То су:

- сопствена тежина,
- оптерећења услед ветра,
- оптерећење услед снега,
- оптерећење услед притиска тла и
- оптерећења услед додатних објеката који се постављају на баријеру.

Оптерећење због сопствене тежине саме баријере је основно оптерећење баријере. Ово оптерећење може бити од *суве тежине* која подразумева тежину саме конструкције баријере (стубови, панели и носећи елементи) и од *мокре тежине* апсорпционог материјала због упијања влаге. Апсорпциони слој треба да има карактеристику да преузима један део оптерећења који носи звучна баријера, ради побољшања стабилности конструкције. Овде је битно обратити пажњу на врсту материјала који се користе за израду баријере.

Оптерећење услед ветра зависи од положаја локалитета на ком се поставља баријера односно, зависи искључиво од тога да ли је подручје ветровито и у којој мери.

Оптерећење услед снега такође треба узети у обзир приликом пројектовања баријера. Акумулација снега на површини баријере може повећати оптерећење и изазвати додатна напонска напрезања. Зато треба размотрити која количина снега у просеку пада током године. Осим тога, пожељно је предвидети и област за одлагање снега.

Саобраћајне звучне баријере се најчешће монтирају на темеље. Ако се баријера налази на меком и нестабилном тлу, притисак тла се преноси на темеље баријера а тиме и на конструкцију саме баријере.

Оптерећења услед додатних објеката који се постављају на баријеру обухватају: оптерећење од саобраћајних знакова, расвете, стубова, телефонских кутија и слично.

Динамичко оптерећење мења своју вредност и правац током времена. Ово оптерећење може укључити вибрације, ударце, осцилације и слично. Примери укључују:

- оптерећење услед ветрова јачег интензитета,
- ударна оптерећења,
- сеизмичко оптерећење,
- експлозије и сл.

Када су баријере изложене ветровима јаког интензитета, то може изазвати осцилације или промене у притиску који делује на саобраћајне звучне баријере чиме узрокују динамичка напрезања у конструкцији и утичу на њену стабилност и интегритет.

Ударна оптерећења су оптерећења која настају од ваздушних удара услед кретања возила, удара летећих отпадака (гума, камење, делови возила) и удара возила. Динамичко оптерећење које се јавља услед кретања возила настаје од аеродинамичких сила и ефеката вибрација које изазивају возила која пролазе поред баријере. Сви удари утичу на трајност материјала баријере, посебно акустичне површине. Када се баријера налази на мање од 4,5m од коловоза на путевима где су дозвољене брзине од 70km/h и више, треба је заштитити од удара [92].

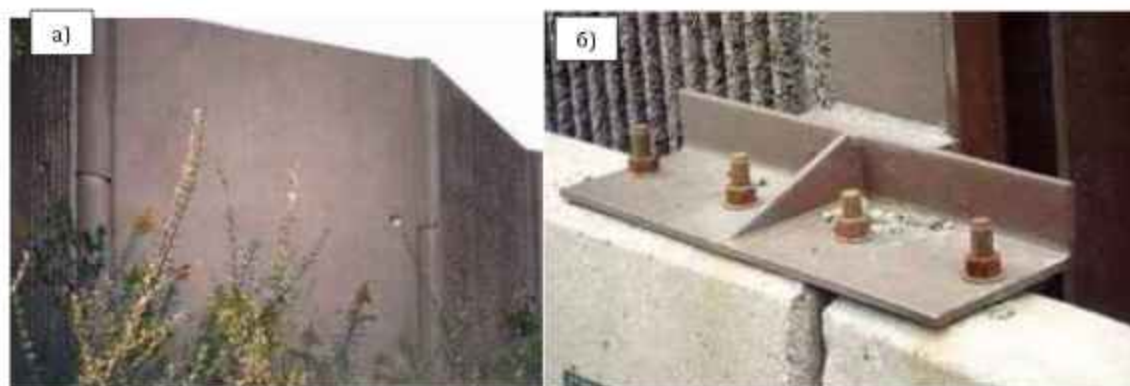
Сеизмичко оптерећење се односи на оптерећење услед сеизмичког кретања тла, односно, могућности појаве земљотреса. Земљотреси су динамички догађаји који могу изазвати значајна оптерећења на саобраћајне звучне баријере. Померање тла током земљотреса може узроковати вибрације и деформације у конструкцији баријере. Сеизмичко оптерећење се може узети у обзир при пројектовању баријера, посебно у подручјима са високим ризиком од земљотреса. У таквим случајевима, баријере се морају дизајнирати тако да могу издржати сеизмичке силе и вибрације.

Експлозије у близини саобраћајне звучне баријере могу генерисати јак ударни талас који делује на конструкцију што може довести до оштећења и рушења баријере.

Постоје и *специфична оптерећења* и ова напрезања се могу јавити у виду ударних оптерећења, контактних оптерећења и слично.

5.2.3.2 Дилатације услед промене температуре

Дилатације односно, ширење и скупљање материјала услед промене температуре је карактеристично за све материјале који се користе при изради звучних баријера и зато се овај фактор мора размотрити при пројектовању баријера, како не би дошло до деформација, стварања пукотина итд. Ширење и скупљање се може јавити на везама између панела, на везама између стубова и панела, на везама баријера и носећих структура, код баријера ливених на лицу места и направљених од блокова или цигала. Разлика у дилатацији различитих материјала који су међусобно спојени као што су нпр. челик и бетон, може довести до пуцања или оштећења баријере (слика 5.2). Конструкционо се овај проблем решава тако што се оставља празан простор између панела који је испуњен флексибилним материјалом попут гуме или полиуретана како би се омогућило панелима да се шире и скупљају независно један од другог што спречава оштећење саме баријере услед промена температуре.



Слика 5.2. Ширење и скупљање материјала: а) везе између панела, б) везе баријера и носећих структура [93]

5.2.3.3 Дужина и висина баријере

Дужина и висина баријере су такође фактор за разматрање при пројектовању баријера и оне су у вези са свим осталим факторима. Ово је већ објашњено у претходним поглављима. Треба узети у обзир и дебљину материјала за израду баријера.

5.2.3.4 Темелји баријере

Темелји који се користе за постављање баријера зависе од више фактора: ширења и скупљања земљишта, сезонских промена земљишта, стабилности земљишта, могућности кретања терена, подземних вода, степена мраза, близине других објеката, радова у близини места постављања баријере и сл.

Могу се користити континуални темелји и бетонске стопе у земљи или у стенама. Према врсти тла земљишта, бира се и врста темелја. Према неким изворима, нова технологија „*auger pile*“ за ископавање и постављање бетона у истој операцији значајно је смањила трошкове и могућност урушавања [91].

5.2.3.5 Дренажа баријере

Дренажа звучне баријере је проблем који се може решити дренажом саме саобраћајнице. Решава се на више начина: преклапањем секција баријера, пропуштањем воде кроз баријеру, применом канала за одвођење воде поред баријере или кроз баријеру и специјалним начинима дренаже, који се обично користе у подручјима у којима су честе поплаве.

Акустичка разматрања показују да све док је укупна површина дренажних отвора мања од 3% од укупне површине панела, њихови утицаји на акустичку ефикасност су занемарљиви [91]. Типови дренажних отвора су детаљно обрађени у делу 3.3.3.

5.2.3.6 Отпорност баријере на влагу и циклусе смрзавања и одмрзавања

Отпорност баријере на влагу и на циклусе смрзавања и одмрзавања је још један од важних конструкционих фактора. У склопу овог фактора треба размотрити и порозност материјала због упијања атмосферских падавина.

5.2.3.7 Стандардизација делова, димензија и модула

Стандардизација делова, димензија и модула је конструкциони фактор који је потребан ради лакше и брже замене делова баријера, односно, доступности резервних делова и ради остварења могућности модуларне градње.

5.2.4 Технолоичност израде и монтаже

Конструкциона сложеност баријере захтева и сложене методе израде и монтаже и има велики утицај на коначну цену баријере. Зато је у оквиру инжењерских захтева неопходно размотрити и технолоичност израде и монтаже баријере. *Технолоичност* се односи на способност или лакоћу којом се неки производ може произвести или монтирати користећи расположиве технологије и опрему на ефикасан начин. То значи да је производ конструисан тако да се може ефикасно и економично произвести и монтирати, уз минималне трошкове и безбедносне ризике. Циљ технолоичности је да се постигне ефикасност у производњи и монтажи производа како би трошкови производње били што нижи а време израде што краће. Треба се трудити да се утроши минимална количина материјала и времена и да се ангажује минимум производне опреме, а да се при том задовоље функционални захтеви звучне баријере.

Технолоичност монтаже звучних баријера подразумева примену помоћне опреме за монтажу баријере као што су: скеле, дизалице, виљушкар, подупирачи и сл. Такође, треба узети у обзир и приступачност терена ради извођења монтаже.



Слика 5.3. Помоћна опрема при монтажи: а) опрема за подршку, б) скеле [94]

Технологија израде и монтаже саобраћајних звучних баријера варира у зависности од материјала и дизајна баријере и обично се састоји од следећих фаза:

- израда техничке документације пројекта,
- набавка материјала и опреме,
- припрема терена и ископ темеља,
- израда темеља и монтажа стубова,
- израда панела баријере и припрема за монтажу,
- монтажа панела на стубове и повезивање делова баријере,
- завршни радови попут фарбања и постављања рефлектујућих трака.

У складу са тим, *технологичност* укључује разматрање низа фактора као што су:

- доступност материјала и опреме за израду производа,
- потребне вештине и обученост радника за израду и монтажу производа,
- избор алата и опреме,
- трошкови израде и монтаже у односу на цену производа,
- време потребно за израду и монтажу,
- степен сложености процеса израде и монтаже,
- могућност одржавања и поправки производа након израде.

5.2.5 Одржавање

Након постављања баријере, деловањем временских услова, деловањем различитих оптерећења и разних других разлога, након одређеног периода долази до оштећења баријере. Због тога треба предвидети поступке одржавања током самог процеса пројектовања баријере како би се осигурала њена функционалност и дуготрајност.

Одржавање обухвата:

- могућност поправке делова баријере,
- доступност резервних делова,
- приступ баријери за одржавање,
- чишћење баријере од загађивача,
- хабање и пропадање површине материјала,
- одржавање вегетације на баријерама са засадима,
- уклањање графита,
- уклањање нагомиланог смећа,
- уклањање снежних наноса,
- уклањање нагомиланог снега од чишћења пута,
- питања у вези са специјалним типовима баријера.

Могућност поправке и замене оштећених делова баријере на лицу места треба предвидети при пројектовању, а такође и приступ баријери ради тих активности. Оштећења која могу да настану су: оштећења од влаге, оштећења услед изложености УВ зрачењу, оштећења услед савијања и губитка боје и премаза. Примери неких оштећења су приказани на слици 5.4.



Слика 5.4. Примери оштећења на баријерама [25]

Доступност резервних делова је још један битан фактор одржавања јер замена елемената баријере може бити потребна током читавог животног века трајања звучне баријере. Резервни делови и њихова доступност неће бити проблем ако су компоненте стандардни производи, у супротном, ако су делови прављени по мери за одређену звучну баријеру, доступност резервних делова може постати проблем (слика 5.5.)

Једно од решења овог проблема је обезбеђење залиха. Ово подразумева да произвођач испоручује додатних 10 процената компоненти [25]. То може бити корисно, али има и недостатке, јер долази до гомилања залиха које можда никада неће бити искоришћене.



Слика 5.5. Проблем доступности резервних делова и њихове замене [25]

Приступ баријери ради одржавања се може спровести на неколико начина: преклапањем баријера, обезбеђивањем врата или пројектовањем делова који се могу привремено уклонити. Разни начини приступа баријери ради одржавања и хитних случајева су већ објашњени у претходним поглављима.

Чишћење баријере од загађивача обухвата утицај прљавштине из воде, прљавштине у ваздуху и слично. Ово је поступак који је потребно обезбедити и предвидети у оквиру одржавања звучних баријера.

Хабање и пропадање површине/материјала је појава која се увек јавља, зато што сви материјали који се користе за израду баријера за заштиту од буке ће се током времена похабати и истрошити. Величина оштећења може бити различита у зависности од: врсте материјала, климатских услова, близине коловоза и других утицаја.

Оштећења која настају због хабања и пропадања површине/материјала су:

- оштећења услед влаге,
- оштећења услед ултраљубичастог зрачења,
- оштећења обојених премаза и
- савијање.



Слика 5.6. Оштећења од влаге и УВ зрачења [25]

Оштећења услед влаге настају због превеликог дејства влаге и соли на путу. Типична поправка је уклањање корозије и фарбање бојом која садржи доста цинка, или замена оштећених компоненти.

Оштећења услед излагања ултраљубичастом светлу су повезана са погоршањем пигмената и боје звучне баријере. Боје, мрље, премази за графите (пигментирани и прозирни), шаблонски дизајни и интегралне боје временом изгледе.

Оштећења обојених премаза су обично узрокована прљавштином и крхотинама са коловоза које ударају у баријеру. Ово оштећење је обично само естетски проблем. Типична поправка је уклањање растреситог материјала са површине и префарбавање одговарајућим бојама.

Савијање се најчешће јавља код дрвених звучних баријера, али се може десити и код металних и бетонских плоча. Код дрвета, обично је узрок прекомерна влага у дрвету и неправилно очвршћавање које доводи до савијања. Код металних баријера ово савијање је углавном само естетски проблем, а код бетонских често није ни видљиво.

Одржавање вегетације на баријерама са засадима је неопходно да би се одржала предвиђена функција дате звучне баријере. Добро осмишљен и естетски леп пејзаж неће имати успеха ако се не одржава адекватно. Потребно је обезбедити и финансијска средства и радну снагу за редовно одржавање. Може се предвидети и раст природне вегетације којој није потребно велико одржавање.

Графити на звучним баријерама и разни аспекти одржавања и премази против графита су већ објашњени у претходним поглављима.

Уклањање нагомиланог смећа је још једна ставка у оквиру одржавања звучних баријера. Простор између звучне баријере и ограде иза баријера је слободан, "ничији" простор и често је подложен бацању смећа, лишћа, траве, грања и слично. Још у фази пројектовања баријере треба размотрити локацију баријере и подложност бацању смећа на тој локацији, као и одговорност задужених за уклањање смећа у том подручју.

Уклањање нагомиланог снега може постати проблем када је звучна баријера постављена близу коловоза. Када постоји већа количина снега, тешко га је одложити са стране пута, као што је приказано на слици 5.7. и потребно је брзо га уклонити. Уклањање снега захтева тешку опрему, кипере, који морају да раде веома близу коловоза. Такође, велика количина снега може да оштети звучну баријеру, и од притиска нагомиланог снега и од силе бацања снега на баријеру приликом чишћења.



Слика 5.7. Нагомилани снег од чишћења пута [25]

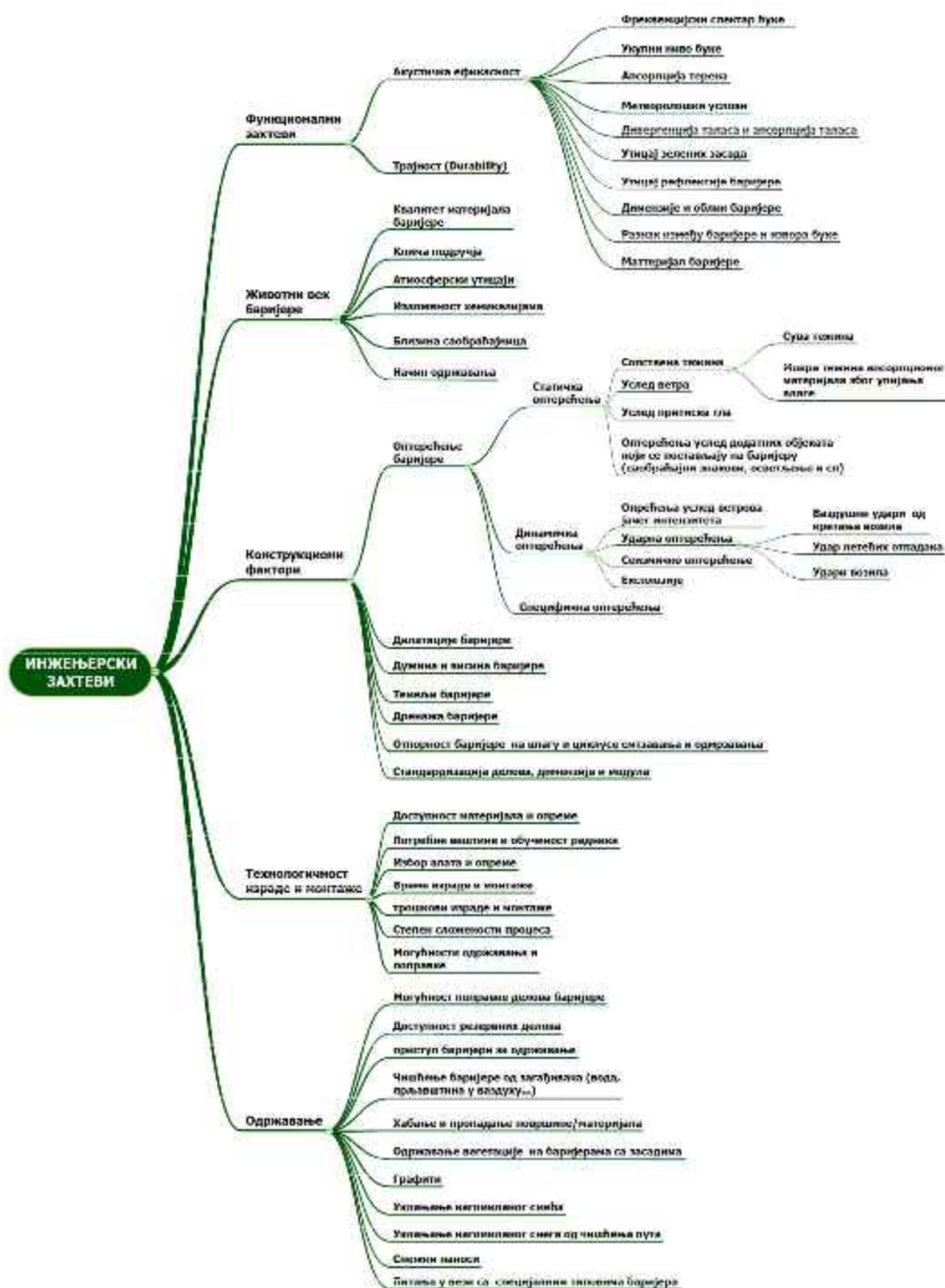
Снежни наноси настају у зависности од локације на којој је баријера, климатских услова, утицаја ветрова, близине коловоза и сл. Могућност њиховог настајања треба разматрати још у фази пројектовања баријера, како би се предвиделе и опције уклањања снега. Може се предвидети већа удаљеност од коловоза, смањење висине баријере, промена положаја и слично.



Слика 5.8. Наноси снега [25]

Питања у вези са специјалним типовима баријера су још једна ставка коју треба узети у обзир при одржавању звучних баријера. Специјални типови баријера могу

имати и специјалне захтеве за одржавањем. На пример, баријере са цик-цак конфигурацијом имају могућност за биљне засаде унутар удубљења, али је тешко одржавање тих засада; био баријере захтевају посебно одржавање - поступак редовног наводњавања; баријере са великим капама могу да спрече природно чишћење помоћу кишнице, итд. Структура инжењерских захтева према претходно дефинисаној класификацији је приказана на слици 5.9.



Слика 5.9. Класификација инжењерских критеријума

5.3 Захтеви безбедности

Безбедност је још један од фактора које треба размотрити при пројектовању звучних баријера. Баријере за заштиту од буке треба постављати тако да буду у некој мери заштићене од удара возила, јер нису пројектоване да издрже јаке ударе. Такође, и возила треба да имају одређену заштиту од удара у баријеру. Ове безбедносне оцене су засноване на процени пројектанта звучне баријере. Прво треба утврдити да ли су модификације стандардног дизајна баријере потребне и оправдане.

Овде је размотрено неколико фактора који утичу на безбедност:

- безбедност саобраћаја,
- безбедност окружења и
- пожарна сигурност.

5.3.1 Безбедност саобраћаја

Безбедност саобраћаја обухвата:

- заштиту од судара,
- добро осветљење,
- прегледност (видљивост) пута и
- ефекте светлости и сенке.

Заштита од судара је посебно важна на путевима са већим саобраћајем и брзим возилима. Уколико баријера није довољно јака и не пружа адекватну заштиту од судара, може доћи до већих материјалних штета и озбиљних повреда учесника у саобраћају. Потребно је да баријера испуни стандардизоване захтеве у смислу кинетичке енергије коју може да упије приликом удара возила у баријеру, а да при том не дође до оштећења која би могла да угрозе сигурност учесника у саобраћају. У неким случајевима, као додатна заштита од судара, постављају се додатни елементи као што су заштитне ограде и предпростор, који доприносе смањењу енергије које возило може да пренесе на баријеру приликом судара. Постоје и посебни стандарди који прописују заштиту од судара, а неки од њих су:

- EN 1317 [95] – Стандард за пасивну сигурност на путевима који утврђује захтеве за тестирање, перформансе и означавање за ограде за заштиту од судара на путевима.
- MASH - *Manual for Assessing Safety Hardware* [96] је амерички стандард за заштиту од судара који обухвата широк спектар сигурносних уређаја, укључујући ограде, бетонске препреке, стубове, сигнале итд.
- NCHRP 350 - *National Cooperative Highway Research Program* [97], који обухвата перформансе сигурносних уређаја и процедуре тестирања за процену способности сигурносних уређаја за заштиту од судара на путевима.
- AS/NZS 3845 [98] – Аустралијски и новозеландски стандард за ограде за заштиту од судара на путевима.

Добро осветљење представља битан фактор у дизајну СЗБ јер пружа сигурност возачима и пешацима који се крећу у њиховој близини, нарочито током ноћних сати или у условима лоших временских услова. Ово је посебно важно за области са великим бројем возила и пешака. При том, треба узети у разматрање и утицаје као што су: интензитет светла, усмереност светлосног снопа, униформност осветљења, избор сијалица, висина постављања сијалица, као и њихова енергетска ефикасност.

Прегледност (видљивост) пута треба узети у обзир када су звучне баријере тако постављене да утичу на видљивост, односно, прегледност пута. Ова ситуација се јавља код великих кривина на путевима, тамо где се звучна баријера завршава у близини раскрснице, када су баријере изграђене на средини или дуж спољашње стране пута.

Звучне баријере треба постављати тако да не смањују видљивост од возила до возила, нити видљивост од возила до раскрсница, знакова или саобраћајних сигнала. Овај захтев може да утиче на акустичке перформансе. Проблем се може решити спуштањем звучне баријере (слика 5.10.), закривљењем баријере уназад и слично.



Слика 5.10. Прегледност (видљивост) пута [25]

Ефекти светлости и сенке су проблем на глатким звучним баријерама као што су металне, пластичне и транспарентне баријере. Овај ефекат може смањити видљивост на путу, стварати одсјај и правити проблем возачима током војње. У зависности од угла сунца овај ефекат се мења. Највећи проблем је током дана када је низак угао сунца, и ноћу, због фарова аутомобила. Проблем се погоршава када је баријера мокра.

Овај проблем безбедности се мора добро размотрити и предузети све мере предострожности да одсјај и рефлексије светлости и сенке не смањују безбедност саобраћаја. Употреба грубљих површина и рељефа може елиминисати овај ефекат или га смањити.



Слика 5.11. Ефекти светлости и сенке [25]

5.3.2 Безбедност окружења

Безбедност окружења подразумева да не треба штитити само човека већ сву животну средину, па самим тим и животиње. Звучне баријере могу утицати на уобичајено понашање животиња, њихова станишта, миграционе руте и слично.

На пример, велике, транспарентне звучне баријере могу утицати на популацију птица. Није познат број птица које су угинуле услед удара у звучне баријере, али се такви случајеви дешавају, тако да треба водити рачуна при пројектовању оваквих баријера, које треба учинити видљивим за птице, како би се избегли удари птица у исте.

Треба унапред предвидети и пројектовати отворе за пролазе животиња, места за гнездење птица, а могуће је и побољшати услове за станишта животиња уз одговарајуће биљне засаде.



Слика 5.12. Безбедност: видљивост за птице [24], [25]

5.3.3 Пожарна сигурност

Пожарна сигурност обухвата:

- отпорност баријере на пожар,
- приступ и евакуацију у случају пожара и
- снабдевање водом.

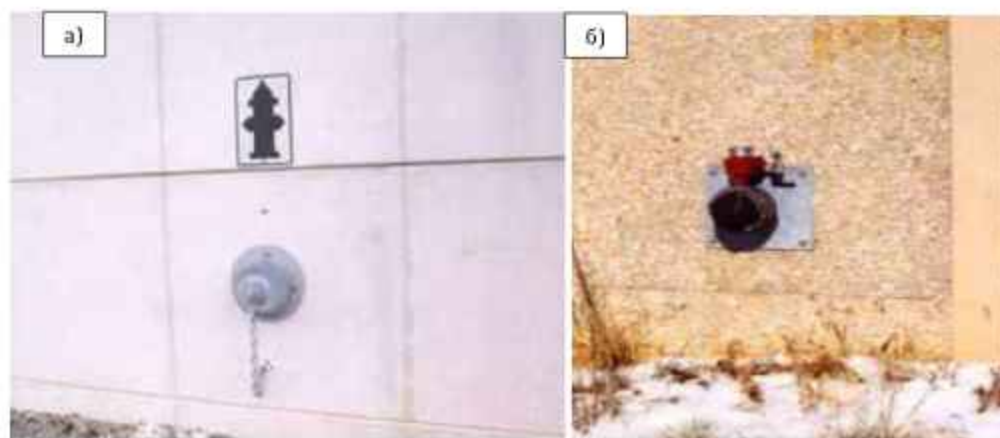
Отпорност на пожар подразумева да се при изградњи звучних баријера не користе материјали који су запаљиви или развијају отровни, густ дим или ужарене капљице које може да разноси ветар. То се односи и на премазе и боје који се користе на баријерама. До пожара може доћи од пламена суве вегетације која се налази око звучне баријере или неког другог материјала који се налази у близини или у случају удеса.

Пристап и евакуација у случају пожара представљају посебно пројектовање баријера које омогућава једноставнији пристап у случају пожара. Могу се предвидети пожарна врата у оквиру баријере, као што је приказано на слици 5.13.



Слика 5.13. Пожарна сигурност: пожарна врата [25]

Снабдевање водом је још један аспект пожарне сигурности. Звучне баријере могу прекинути пут до извора воде који је потребан у случају пожара. Ватрогасна црева се не могу постављати преко баријере и потребно је посебно пројектовање баријере. Постоји могућност пројектовања разних отвора за хитне случајеве или вентила за пристап извору воде, који су уграђени у панеле звучних баријере, као што је приказано на слици 5.14.



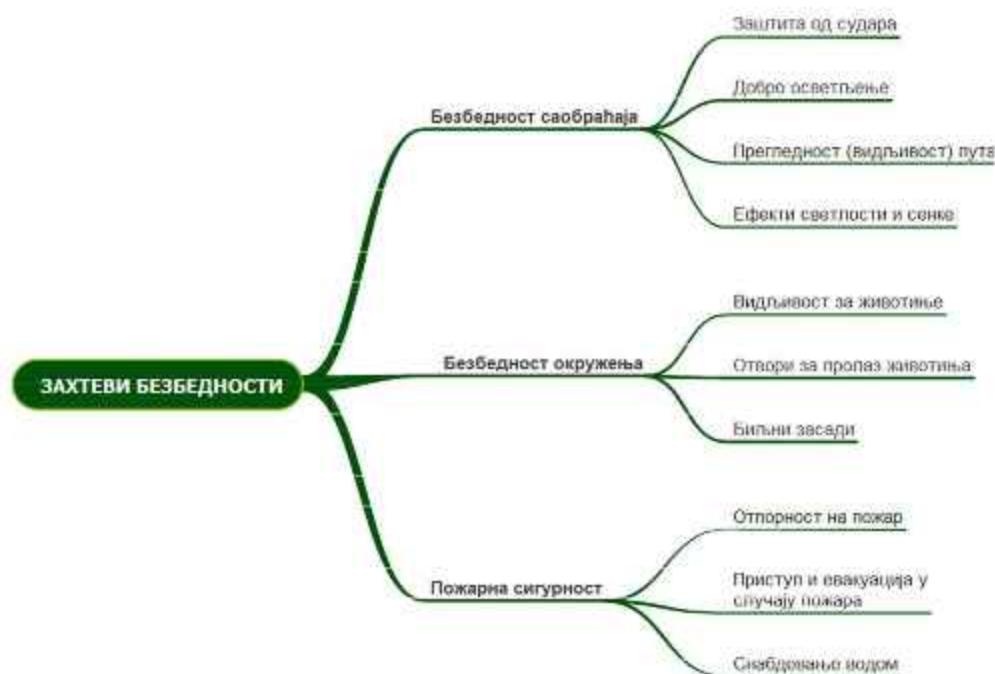
Слика 5.14. Пожарна сигурност: а) спојница за ватрогасно црево интегрисана у панеле, б) вентил интегрисан у панеле [25]

Када се ради о СЗБ у многим земљама постоје противпожарни прописи и стандарди који се односе на захтеве у вези са отпорношћу материјала баријере на ватру. Ови

стандарди обично прописују материјале који се могу користити за изградњу баријере, као и захтеве за противпожарну отпорност тих материјала.

У Европи се примењује стандард EN 13501-1 [99] који се користи за класификацију противпожарних својстава грађевинских производа. Овај стандард дефинише критеријуме и поступке за тестирање и класификацију отпорности грађевинских производа на пожар. Циљ стандарда је осигурати сигурност људи, имовине и околине, кроз успостављање стандардизованих критеријума који ће омогућити процену противпожарних својстава грађевинских производа. Стандард дефинише класификацију материјала према њиховој противпожарној отпорности и означава их словима и бројевима. Класификација почиње са А1 (највиша противпожарна отпорност) и завршава се са F (ниска противпожарна отпорност).

Класификација критеријума безбедности који су напред обрађени је приказана на слици 5.15.



Слика 5.15. Захтеви безбедности

5.4 Захтеви окружења и еколошки фактори

Захтеви окружења и еколошки фактори су још једна група захтева који обухватају следеће групе фактора:

- уклапање у окружење,
- утицај на животну средину и
- одрживост.

5.4.1 Уклапање у окружење

Уклапање у окружење је још један захтев који треба узети у обзир при пројектовању звучних баријера. Без обзира о којој врсти баријера се ради, оне треба што боље да се уклопе у окружење у ком се постављају, како би што боље биле прихваћене од стране локалне заједнице. Такође, треба водити рачуна о вегетацији која већ постоји у датом окружењу, а могу се додати и нови засади биљака. Треба изабрати одговарајуће материјале у складу са окружењем, текстуру, тип и величину панела за изградњу баријера. У суштини потребно је уклопити инжењерске елементе пројектовања баријере са еколошким захтевима окружења.

Уклапање у окружење треба да задовољи следеће аспекте:

- компатибилност са локалним окружењем,
- координација (усклађеност) са деловима пута,
- одговор на амбијент пута,
- страна баријере према објектима који се штите од буке и
- саобраћајна страна баријере.



Слика 5.16. Пример уклапања баријере у постојеће окружење [94]

Компатибилност са локалним окружењем подразумева уклапање звучне баријере у постојећи амбијент, у зависности од тога да ли је окружење урбано, полуурбано или рурално. Становници који живе у локалној средини лакше прихватају баријере које су у складу са изгледом локалног окружења. Треба пратити изглед и материјале који су заступљени у посматраној околини и уклопити баријере према стилу зграда, према биљкама које већ постоје и слично.



Слика 5.17. Компатибилност баријере са локалним окружењем [92]

Координација (усклађеност) са деловима пута подразумева визуелно јединство са другим елементима пута као што су: подвожњаци, раскрснице, мостови и други саобраћајни елементи. Ту усклађеност често кваре елементи као што су: путокази, расветни стубови, сигурносне ограде и друго. Све те елементе треба узети у обзир још у фази пројектовања баријере. Координација са деловима пута доприноси осећају реда и хармоније, а то утиче и на безбедност на путу.

Одговор на амбијент пута подразумева утицај звучних баријера на естетску перцепцију учесника у саобраћају и људи који живе у окружењу. Треба пројектовати баријере одговарајућих димензија које треба да буду компатибилне са окружењем у коме ће се налазити. Такође, треба да буду естетски прихватљиве, али да не буду доминантне.

Страна баријере према објектима који се штите од буке је најбитнија и са становишта заштите од буке и са становишта визуелног изгледа. Ова страна има велики утицај на становнике који ту живе, може да им затвори видно поље, да трпе губитак дневне светлости. Потребно је да се при пројектовању звучне баријере сведу на минимум ови могући утицаји. Једно од решења су биљни засади који могу да дају природнији изглед баријерама.

Саобраћајна страна баријере је мање битна од претходне, зато што се, са стране пута, баријера прође за веома кратко време. Учесник у саобраћају стиче утисак о изгледу баријере, њеној боји, шарам, уклапању са околином, за кратко време, због брзине возила и праћења других учесника у саобраћају. Када су баријере велике дужине, треба се трудити да не буду монотоне. Истраживања међу возачима у Холандији су показала да поглед који се не мења 30 секунди постаје монотон, односно, потребне су промене у изгледу баријере на око 800 m [92].

5.4.2 Утицај на животну средину

Утицај на животну средину, односно, еколошки фактори се, такође, требају размотрити при пројектовању звучних баријера. Постављање баријера може утицати у великој мери на животну средину, невезано за буку. Може уништити обрадиво земљиште, нарушити заштићено подручје, онемогућити кретање људи и животиња, уништити животна станишта животиња, угрозити миграције птица.

У основи може се рећи да овај утицај обухвата следеће:

- онемогућавање кретања људи и животиња,
- нарушавање заштићених подручја,
- угрожавање биодиверзитета,
- употреба токсичних материјала, премаза и боја,
- употреба рециклираних материјала и
- могућност поновне рециклаже делова баријере.

Онемогућавање кретања људи и животиња је фактор који говори да звучна баријера може да представља потенцијалну препреку постојећем кретању људи

или животиња на датом подручју или сметњу постојећем функционисању живота оних који су настањени у близини баријере. Овај фактор треба свести на минимум.

Нарушавање заштићених подручја се односи на потенцијални утицај звучне баријере на већ постојеће и непознате локалитете, односно, утицај на археологију подручја на коме се налази баријера. Ово обухвата и објекте који су заштићени, заштићена подручја, регистроване паркове и баште и друге националне и локалне локације. У неким случајевима, постављање баријере може нарушити визуелни изглед културних споменика, зграда или предела. Зато је потребно дизајн баријере прилагодити постојећим културним елементима и одабрати материјале који се естетски уклапају у визуелни идентитет околине и како би се сачувала културно-историјска баштина.

Угрожавање биодиверзитета се односи на уништавање животног станишта животиња као што је прекид и нарушавање животних навика и станишта дивљих животиња, укључујући сисаре, птице и бескичмењаке. Овај фактор, такође, треба узети у обзир при пројектовању саобраћајних звучних баријера. Да се не би спречило кретање дивљих животиња, пожељно је баријере пројектовати са пролазима за животиње или их постављати на начин који неће нарушавати природне миграционе путеве. Сама изградња звучне баријере може лоше утицати на биљке које се налазе у близини. Додатно, баријере могу утицати на квалитет ваздуха у близини пута, а прашина која се може таложити на баријерама може садржати штетне материјале који могу имати негативан утицај на здравље и животиња и људи.

Употреба токсичних материјала, премаза и боја који се користе за израду звучних баријера и њихова реакција са атмосферским утицајима и окружењем може имати веома лош утицај на животну средину и оставити трајне последице, тако да се и овај фактор мора свести на минималну вредност.

Употреба рециклираних материјала је фактор који треба да буде што већи. Сви материјали који се могу користити за израду панела звучних баријера или за израду апсорпционог слоја се могу рециклирати у мањој или већој мери или користити неке рециклиране компоненте.

Могућност поновне рециклаже је још један фактор у оквиру ове групе фактора који треба да има што већу вредност.

5.4.3 Одрживост (eng. Sustainability)

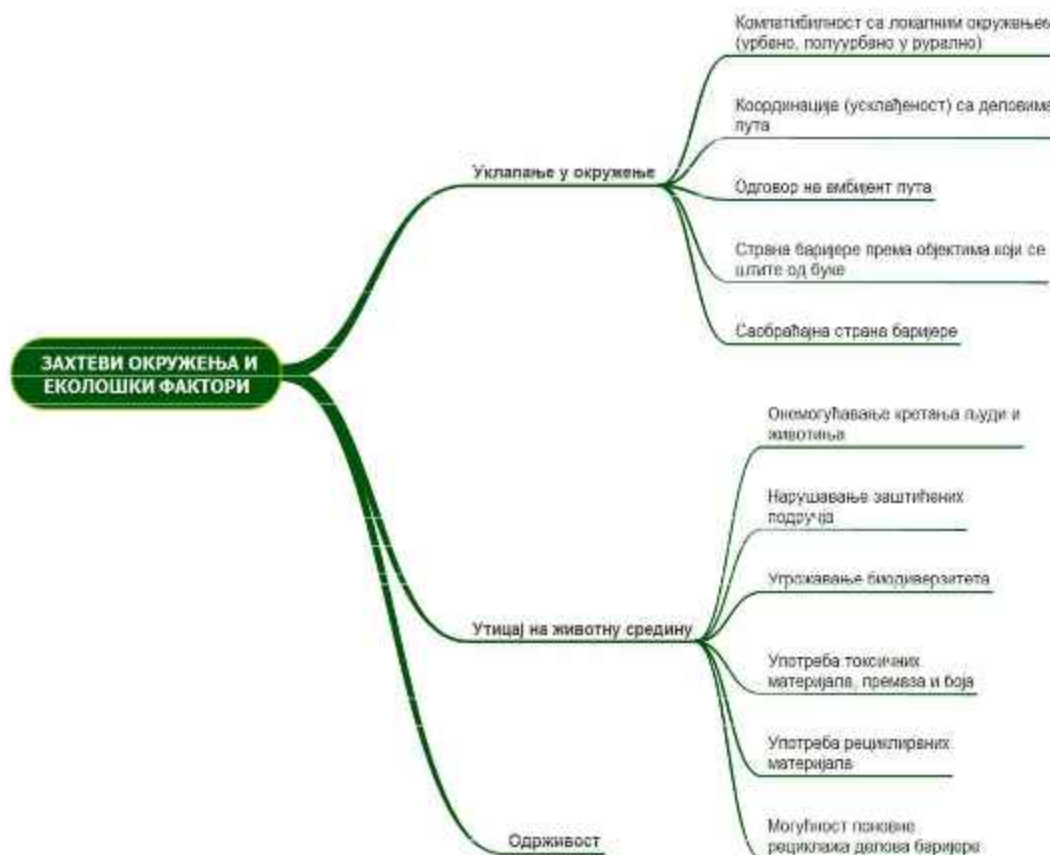
Одрживост се може дефинисати као задовољавање потреба садашњости, без угрожавања будућих генерација да задовоље сопствене потребе [100]. Звучне баријере, поред основног циља, смањења буке, могу се пројектовати тако да донесу и друге користи. Поред тога, одрживост саобраћајних звучних баријера се односи и на њихову способност да испуњавају своју функцију на дугорочном нивоу, што значи да се морају изградити на начин да издрже временске услове, промене температуре, влажности, сеизмичка оптерећења и друге факторе који могу утицати на њихову стабилност и функционалност током времена.

Ово обухвата разматрање низа фактора, као што су:

- употреба материјала и производа локалног порекла,
- употреба дрвета из сертифицираних одрживих шума,
- употреба аутохтоних биљака локалног порекла за насипе или поред звучних баријера,
- употреба материјала који се поново користи или рециклира,
- пуни животни циклус одабраних материјала уз могућност поновне употребе или рециклаже,
- употреба боја и производа који не угрожавају животну средину,
- минимални захтеви за одржавањем и минимални трошкови током целог животног века баријере,
- економска разматрања и
- могућност друштвене користи, побољшан визуелни ефекат.

У циљу постизања одрживог развоја, пројектовање баријера треба да буде усмерено ка проналажењу оптималне равнотеже између заштите околине, функционалности и економске одрживости, како би се обезбедило да баријере дугорочно доприносе квалитету живота људи и очувању природних ресурса.

Класификација захтева окружења и еколошких фактора је приказана на слици 5.18.



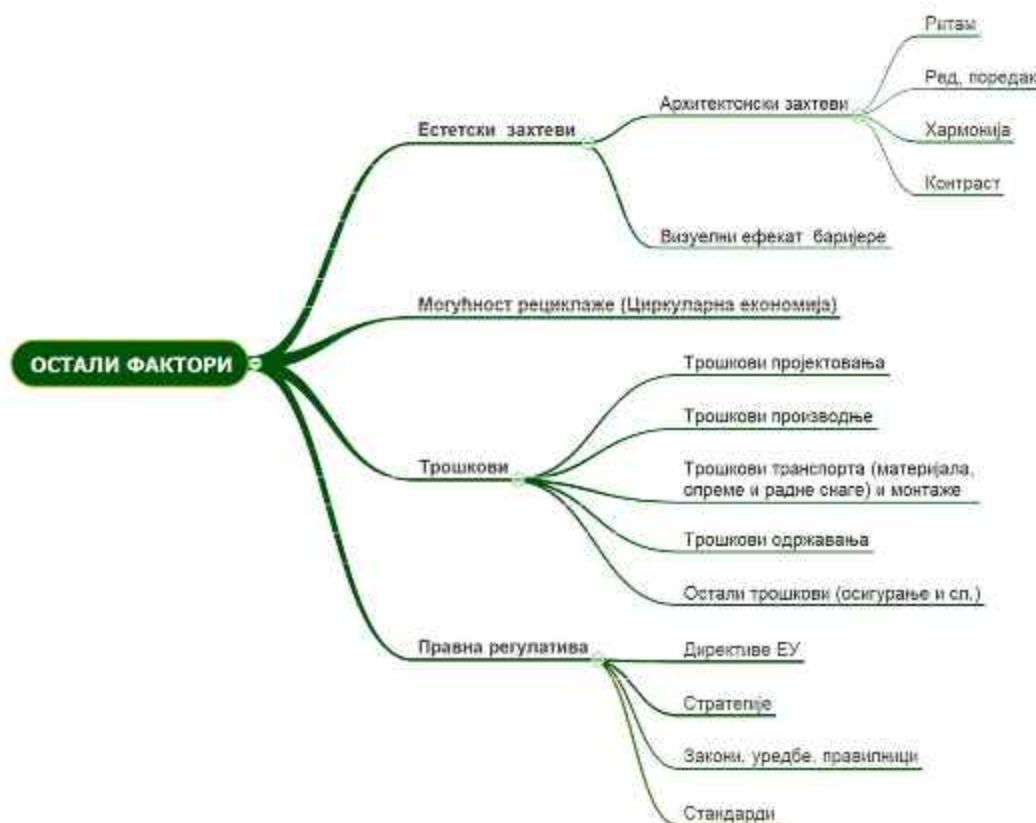
Слика 5.18. Класификација захтева окружења и еколошких фактора

5.5 Остали фактори

Поред наведених фактора, постоји још једна група критеријума за пројектовање и избор саобраћајних звучних баријера, а то су остали фактори, у које спадају:

- естетски захтеви,
- могућност рециклаже (циркуларна економија),
- трошкови и
- правна регулатива.

Класификација осталих стандарда је приказана на слици 5.19.



Слика 5.19. Класификација осталих фактора

5.5.1 Естетски захтеви

Естетски захтеви се односе на визуелни изглед баријере. При пројектовању баријера треба узети у обзир и ове захтеве, који се могу решавати на различите начине. Начини за разматрање ових захтева у великој мери су субјективни. Углавном ови захтеви су:

- архитектонски захтеви и
- визуелни ефекат баријере.

Архитектонски захтеви обухватају промене у нивелацији, разне облике закошења панела, разне начине завршетка баријера и уклапање баријера у постојећи амбијент. За прилагођавање специфичним архитектонским захтевима разматра се и могућност обликовања изолационог слоја материјала.

Ови захтеви обухватају:

- ритам,
- ред, поредак,
- хармонију и
- контраст.



Слика 5.20. Пример постепеног завршетка баријере у три нивоа (а) и применом косог краја (б) [24]

Визуелни утицај баријере се може посматрати са стране саобраћаја и са стране локалне заједнице. У том случају се све мора узети у обзир: удаљеност и висина баријере, видљивост, проток ваздуха, изглед баријере. Овде се разматра како направити различите облике текстуре, односно, променити гранулацију зрнасте текстуре, како би се остварио одређени визуелни утисак. Елементи визуелног утицаја су: облик, боја, текстура, шаблони баријере.

5.5.2 Могућност рециклаже

Рециклажа баријере се односи на процес поновне употребе материјала који су коришћени у изградњи баријере, са циљем да се смањи количина отпада која одлази на депоније и како би се штедели природни ресурси. Сви материјали који се могу користити за израду неких од компоненти звучних баријера, се могу рециклирати у мањој или већој мери или се за њихову израду могу користити неке рециклиране компоненте. Различити материјали имају различите могућности рециклирања. На пример, могућност рециклирања дрвета као материјала за израду звучних баријера није толико велика и очигледна као код неких других материјала, као што су метал или неке врсте пластике. Панели од бетона се такође могу рециклирати на крају свог животног века или при неким функционалним променама. Посебне компоненте се могу одвојити и поново употребити.

Међутим, важно је водити рачуна о квалитету рециклираног материјала и осигурати да он задовољава исте стандарде квалитета као и нови материјал.

Такође, важно је узети у обзир трошкове рециклаже и одржавања баријере током њеног животног века, како би се избегли непотребни трошкови и негативни утицаји на економску одрживост пројекта.

Рециклажа је директно везана и за појам *циркуларне економије* која представља економски систем који подразумева одржив и ефикасан начин коришћења ресурса, како би се остварио циљ да се, што је више могуће, смањи отпад и негативни утицај на животну средину. Идеја је да се производи стварају тако да могу бити коришћени више пута, смањујући количину отпада и емисију штетних материјала у процесу производње.

Поред коришћења рециклираних материјала, примена циркуларне економије код баријера подразумева и поновну употребу и пренамену постојећих баријера уместо њиховог уништавања и бацања. Тако нпр. баријере које више нису потребне на једном месту могу се демонтирати и пренети на друго место, где се могу искористити за неку другу намену.

5.5.3 Трошкови

Трошкови, као још један од захтева које треба размотрити при пројектовању звучних баријера обухватају основне и додатне трошкове. *Основни трошкови* се углавном односе на материјал, израду и монтажу звучне баријере, а *додатни трошкови* обухватају трошкове транспорта материјала, опреме и људи и трошкове времена пројектовања и изградње. Овај критеријум је од великог значаја при избору врсте и карактеристика звучне баријере имајући у виду да су СЗБ релативно скупи инфраструктурни објекти. Зато је потребно пажљиво проценити трошкове и користи пре него што се приступи изградњи звучне баријере. Трошкови баријере зависе од различитих фактора као што су: величина баријере, материјали од којих се прави, дизајн, начин монтаже, локација, као и додатни трошкови одржавања и евентуалних поправки.

С друге стране, трошкови баријере су директно зависни и од њеног квалитета. Баријере високог квалитета свакако више коштају али треба имати у виду да дугорочно гледано, инвестиција у квалитетнију баријеру може бити исплативија због нижих трошкова одржавања.

Збирно, трошкови обухватају у основи следеће категорије:

- трошкове пројектовања,
- трошкове израде,
- трошкове транспорта (материјала, опреме и радне снаге) и монтаже,
- трошкове одржавања,
- остале трошкове (осигурање и сл.).

Трошкови пројектовања су трошкови које треба платити за израду пројектних идеја, планова и дизајна баријере. Ови трошкови укључују накнаде за архитекте, инжењере и друге стручњаке који су укључени у процес пројектовања, као и трошкове материјала и опреме потребних за израду пројекта.

Трошкови пројекта варирају у зависности од врсте баријере и опсега пројекта. Што је баријера мања и трошкови ће бити мањи. Такође, што је пројекат баријере сложенији то ће захтевати више радних сати и ангажовање већег броја стручњака, те ће и трошкови бити већи.

Трошкови израде зависе од врсте материјала који се користе за израду баријере, њихове количине, сложености облика, величине баријере, начина израде, типа баријере и других карактеристика које утичу на процес производње звучне баријере. Ово укључује трошкове материјала као што су бетон, челик, алуминијум или дрво, као и трошкове рада на изради баријере.

Трошкови транспорта подразумевају транспорт материјала, панела и осталих компоненти који улазе у састав баријере до места на коме ће се баријера поставити. Такође, транспорт укључује и превоз људи, радне снаге која ће радити на пословима везаним за изградњу баријере и превоз опреме која је потребна за изградњу и монтажу компоненти звучне баријере.

Трошкови монтаже обухватају трошкове који се односе на саму уградњу, склапање компоненти звучне баријере и заједно са трошковима материјала и израде чине основне трошкове који се рачунају посебно за сваку баријеру.

Трошкови одржавања подразумевају довољна средства за одржавање како би се обезбедио добар животни век звучне баријере и како би се задовољили сви захтеви околине и животне средине. Ови трошкови зависе од врсте предвиђене баријере и потребних поступака за одржавање те исте баријере.

Остали трошкови обухватају све трошкове који нису претходно поменути, као што су: осигурање, куповина земљишта за изградњу звучне баријере, куповина садница за биљне засаде, ако су потребни, постављање система за наводњавање и друго, у зависности од врсте баријере и потребних додатних елемената.

5.5.4 Правна регулатива

Постоје различити закони, прописи и стандарди који се тичу саобраћајних звучних баријера, а који се разликују од земље до земље. У наставку ће бити обрађени само најважнији.

5.5.4.1 Директиве Европске Уније

Директива о оцени и управљању буком у животној средини (енг. *The Environmental Noise Directive - END*) која је усвојена у Европској Унији је Директива 2002/49/EC [3]. Ова директива има за циљ постизање унификоване методологије за процену и управљање буком у урбаним срединама како би се идентификовали, проценили и смањили негативни утицаји буке на здравље људи и животну средину. Она укључује одредбе о мерењу, процени и управљању буком у урбаним срединама, укључујући и саобраћајну буку.

Према овој директиви, државе чланице ЕУ су дужне да развију стратегије смањења буке и идентификују "тихе зоне" у којима се захтева примена одговарајућих мера, укључујући постављање саобраћајних звучних баријера. Имплементација

директиве врши се на националном нивоу уз усклађивање са локалним прописима и специфичностима сваке државе чланице.

Кључни елементи Директиве 2002/49/ЕС су:

1. *Идентификација зона буке:* Државе чланице ЕУ су обавезне да идентификују зоне буке у свом територијалном подручју. То укључује урбана подручја, путне мреже, железничке пруге, аеродроме и индустријске зоне.
2. *Мерење и процена буке:* Државе чланице треба да изврше мерење буке и израде детаљну процену њених утицаја на животну средину и људско здравље. Ова процена обухвата идентификацију изложености буци, процену њених штетних ефеката и идентификацију потребних мера за смањење буке.
3. *Акциони планови за управљање буком:* На основу процене буке, државе чланице треба да развију и примене акционе планове за управљање буком. Ти планови укључују мере за смањење буке, као што су примена саобраћајних звучних баријера, коришћење тихог асфалта, ограничавање брзине, планирање урбаног развоја и друге мере које су релевантне за смањење буке.
4. *Информисање јавности:* Директива захтева од држава чланица да информишу јавност о нивоу буке и њеним утицајима. То укључује пружање информација о процени буке, акционим плановима и предузетим мерама за смањење буке.

5.5.4.2 Стратегије

Стратегија одрживог урбаног развоја Републике Србије до 2030. године [7] која је донета у складу са *Агендом 2030* за одрживи развој Генералне скупштине Уједињених нација истиче потребу уређења градског простора и решавања проблема урбаног развоја. Део 4.1.6.5 ове Стратегије је посвећен заштити од буке и односи се на дефинисане граничне вредности индикатора буке за одређене акустичке зоне и законску обавезу за Јединице локалне самоуправе да изврше акустичко зонирање како би се оформио обједињен/централизован систем станица за мониторинг буке.

5.5.4.3 Закони, уредбе, правилници

Влада Републике Србије донела је 2021. године *Закон о заштити од буке у животној средини* [101] који се односи на:

- субјекте задужене за заштиту животне средине од буке,
- средства и услове за заштиту животне средине од буке,
- мерење буке у животној средини,
- приступ информацијама о буци,
- надзор и друге теме од значаја за заштиту животне средине и здравља.

Даљи правци су дефинисани одговарајућим националним Уредбама и Правилницима који су релевантни за заштиту животне средине од буке а који су у

складу са Директивом 2002/49/ЕС Европског парламента и Савета Европске уније. У наставку ће бити поменути само најзначајнији.

УРЕДБА о индикаторима буке, граничним вредностима, методама за оцењивање индикатора буке, узнемиравања и штетних ефеката буке у животној средини [102].

Овом уредбом су дефинисани индикатори буке у животној средини, које су њихове граничне вредности, наведене су методе за оцењивање наведених индикатора буке, и могућих штетних ефеката на здравље људи. Индикатори буке се користе како би се утврдило стање буке, за процену и предвиђање стања буке, за израду стратешких карата буке и, на крају, за планирање мера заштите од буке. Начин одређивања индикатора буке дат је у Прилогу 1 – Индикатори буке у животној средини ове уредбе.

Правилник о садржини и методама израде стратешких карата буке и начину њиховог приказивања јавности [103].

Овај правилник ближе уређује садржину и методе израде стратешких карата буке, а такође и начине како ће оне бити приказане јавности. Стратешка карта буке садржи податке о нивоима буке на одређеном подручју и израђује се за претходну календарску годину у односу на годину у којој се ради. Према овом правилнику, стратешке карте буке друмског саобраћаја треба да садрже податке о буци на аутопутевима и магистралним саобраћајницама са просечним годишњим протоком саобраћаја већим од 3.000.000 возила и састоје се од текстуалног и графичког дела.

Правилник о методологији за израду акционих планова [104].

Овим правилником се прописује методологија за израду акционих планова заштите од буке у животној средини. Акциони план се израђује на основу стратешке карте буке за подручја где постоје прекорачења граничних вредности.

Правилник о методологији за одређивање акустичких зона [105].

Овај правилник ближе прописује методологију за одређивање акустичких зона у насељима јединица локалне самоуправе и граничне вредности индикатора буке у тим зонама. Акустичке зоне се приказују:

- за појединачну зону насеља, једну или две зоне сродне намене, за величине комплекса објеката који може бити или извор буке или угрожен буком,
- за зоне дуж аутопута, магистралних и регионалних саобраћајница и сабирних градских улица у којима се одвија транзитни, теретни и јавни градски саобраћај.

Правилник о методама мерења буке, садржини и обиму извештаја о мерењу буке у животној средини [106].

Овај правилник ближе прописује методе мерења буке у складу са стандардима SRPS ISO 1996-1 и SRPS ISO 1996-2, као и садржину и обим извештаја о мерењу буке у животној средини.

Правилник о условима које мора да испуњава стручна организација за мерење буке у животној средини, потребној документацији, поступку овлашћивања, садржини

решења о овлашћивању, као и о садржини, обиму и року важења извештаја о мерењу буке [107].

Овим правилником се прописују услови које мора да испуњава стручна организација за мерење буке у животној средини, потребна документација, поступак овлашћивања, садржина решења о овлашћивању, као и садржина, обим и рок важења извештаја о мерењу буке. Према овом правилнику, мерење буке у животној средини може да врши стручна организација која:

- 1) је регистрована у одговарајућем регистру;
- 2) испуњава услове у погледу опреме, простора и кадрова;
- 3) је акредитована код надлежног акредитационог тела.

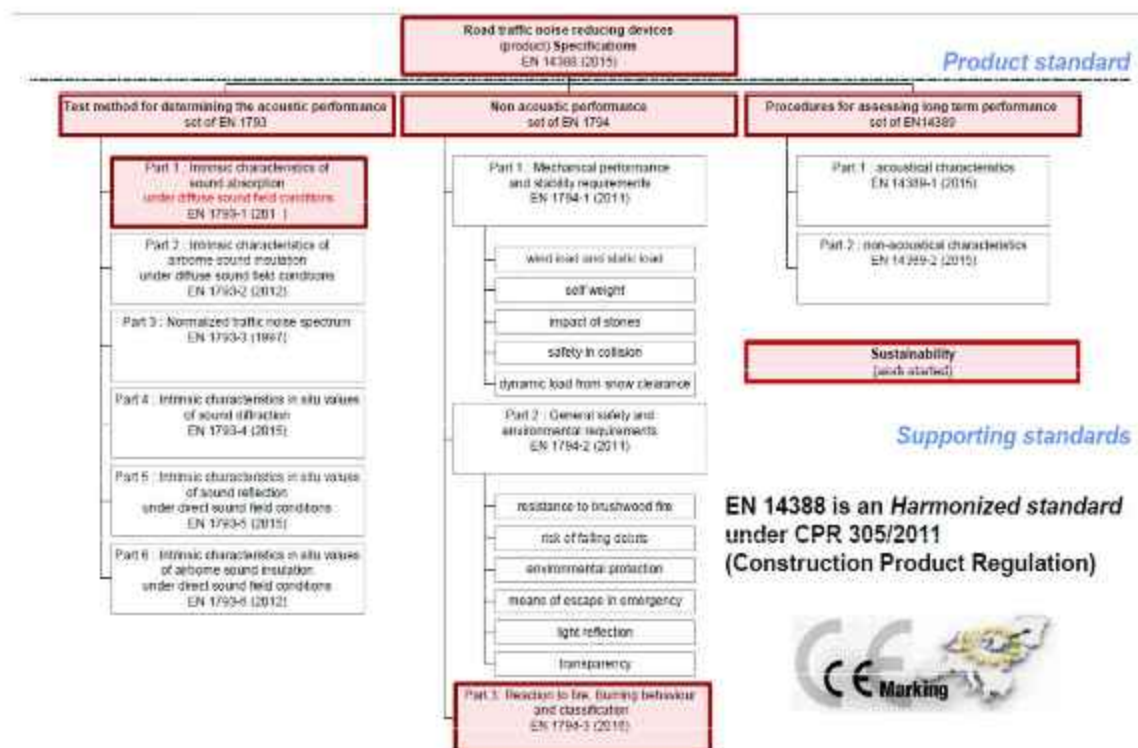
5.6 Стандарди

Европски комитет за стандардизацију (**CEN - European Committee for Standardization**) је удружење које окупља национална тела за стандардизацију 34 европске земље. CEN обезбеђује платформу за развој европских стандарда и других техничких докумената у вези са различитим врстама производа, материјала, услуга и процеса. CEN уско сарађује са другим регионалним и међународним организацијама, као што је Међународна организација за стандардизацију (ISO), радећи на хармонизацији стандарда и олакшавању слободне трговине и размене робе и услуга између земаља. Користећи стандарде развијене од стране CEN-а, предузећа и организације могу имати поверење да ће њихови производи и услуге задовољити европске захтеве и стандарде квалитета.

У оквиру Европске комисије за стандардизацију (CEN) постоји технички комитет који се бави стандардизацијом путне опреме. Ознака му је "**CEN/TC 226 - Road Equipment**". Чланови CEN/TC 226 обухватају представнике различитих заинтересованих страна, као што су произвођачи опреме, стручњаци из области путне инфраструктуре, административних тела и органа задужених за безбедност саобраћаја, и друге релевантне организације и институције.

CEN/TC 226/WG 6 - Noise reducing devices [108] је радна група (*Working Group*) у оквиру техничког комитета CEN/TC 226 која је посвећена стандардизацији уређаја за смањење буке. Ова радна група обухвата стручњаке и представнике различитих заинтересованих страна, као што су произвођачи уређаја за смањење буке, истраживачи, представници институција и органа задужених за контролу буке и други релевантни актери. Циљ CEN/TC 226/WG 6 је развој стандарда и техничких спецификација које се односе на уређаје за смањење буке на путевима. У оквиру ове радне групе постоје различити стандарди и техничке спецификације које се односе на уређаје за смањење буке на путевима. Неки од најзначајних стандарда у овом оквиру укључују (слика 5.21):

- стандард EN 14388,
- серију стандарда EN 1793,
- серију стандарда EN 1794,
- серију стандарда EN 14389.



Слика 5.21. Европски (CEN) стандарди за саобраћајне звучне баријере [109]

5.6.1 Стандард EN 14388 : (2005) – Спецификације

Кровни стандард у оквиру којег су груписани остали актуелни стандарди који се односе на саобраћајне звучне баријере је EN 14388 : (2005) – Спецификације. Пун назив стандарда је „EN 14388 - Specifications. Road traffic noise reducing devices - Test method for determining the acoustic performance - Intrinsic characteristics to be used for verification purposes” (Уређаји за смањење буке у саобраћају на путу - Метод испитивања за утврђивање акустичке перформансе - Основне карактеристике за верификацију).

Овај стандард се односи на методу испитивања и утврђивање акустичке перформансе **уређаја за смањење буке** (енг. *NRDs - Noise Reducing Devices*) на путу и дефинише поступак испитивања и захтеве које требају задовољити уређаји за смањење буке како би се утврдила њихова акустичка перформанса.

EN 14388 обухвата следеће аспекте испитивања:

- *Испитивање акустичке апсорпције*: Стандард дефинише методе испитивања које се користе за мерење акустичке апсорпције материјала или система уређаја за смањење буке.
- *Испитивање акустичке рефлексије*: Методе испитивања у стандарду односе се на мерење акустичке рефлексије, односно одбијања звука од површине уређаја.

- *Испитивање акустичке пропусности*: Стандард наводи методе испитивања које се користе за мерење акустичке пропусности, односно способности уређаја да пропусти звук кроз себе.

Стандард EN 14388 има за циљ обезбеђивање конзистентности и усаглашености у испитивању акустичке перформансе уређаја за смањење буке на путу. Он утврђује јасне параметре и процедуре испитивања које треба применити при верификацији акустичких карактеристика уређаја. Стандард EN 14388 такође пружа оријентир за произвођаче уређаја за смањење буке, као и за органе задужене за контролу и сертификацију. Он им помаже да упореде и испитају перформансе различитих уређаја и да обезбеде исправност и усаглашеност са стандардима.

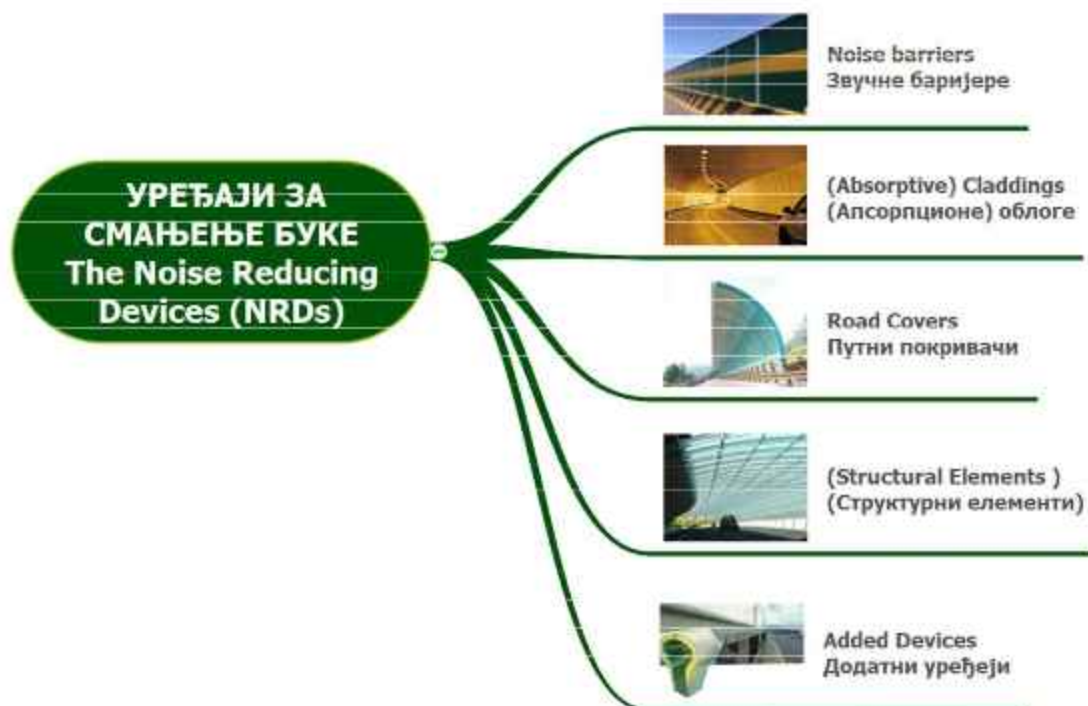
Важно је имати на уму да стандард EN 14388 обухвата само методу испитивања и утврђивања акустичке перформансе уређаја за смањење буке, а не и детаљне захтеве за дизајн и израду уређаја. За потпуну конформност уређаја, такође је важно да се примене одговарајући стандарди и спецификације који се односе на конкретне типове уређаја. Стандард EN 14388 се односи на уређаје за смањење саобраћајне буке који се користе на путевима. Ови уређаји укључују различите типове акустичних баријера, звучних зидова и других уређаја који имају за циљ смањење нивоа буке која настаје у саобраћајним окружењима.

Уређаји за смањење буке (*NRDs*) на које се односи стандард EN 14388 обухватају:

- *Noise barriers (баријере против буке)*, дефинисане у делу 3.2 као: уређаји за смањење буке који ометају директан пренос ваздушног звука који се емитује из друмског саобраћаја;
- *Claddings (Облоге)*, дефинисане у делу 3.5 као: уређаји за смањење буке који су причвршћени за зид или другу структуру и смањују количину рефлектованог звука;
- *Road covers (покривачи поклопци, настрешнице)*, дефинисани у делу 3.6 као: уређаји за смањење буке који обухватају или надвисују аутопут;
- *Added devices (додатни уређаји)* дефинисани у делу 3.7 као: додатне компоненте које утичу на акустичке перформансе оригиналног уређаја за смањење буке (делујући првенствено на дифракцију енергије).

Ови уређаји могу укључивати и акустичке и структурне елементе, где:

- *Acoustic element (акустички елемент)* је елемент чија је примарна функција да обезбеди акустичке перформансе уређаја и
- *Structural element (структурни елемент)* је елемент чија је примарна функција да подупире или држи на месту акустичне елементе.



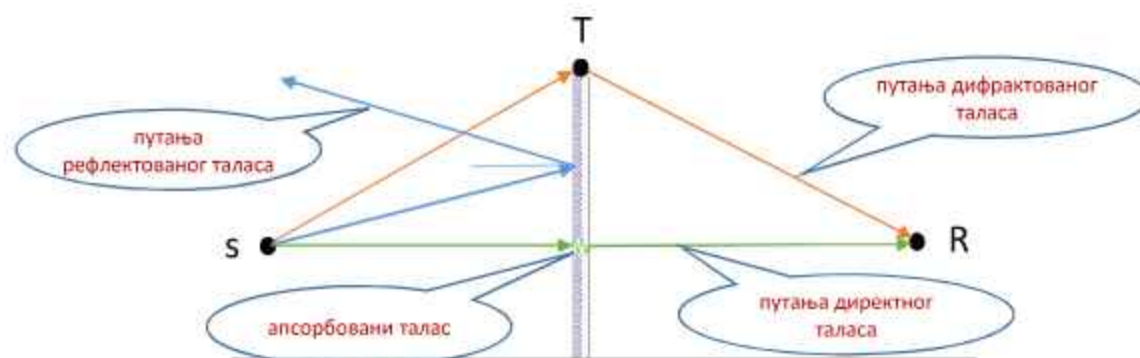
Слика 5.22. Уређаји за смањење саобраћајне буке (*Noise Reducing Devices-NRDs*) као што је дефинисано у стандарду EN 14388

5.6.2 Стандард EN 1793: Акустичне перформансе

Серија стандарда EN 1793 се састоји од 6 стандарда и баве се унутрашњим акустичким перформансама, односно, методама испитивања за одређивање акустичких перформанси уређаја за смањење саобраћајне буке. Ови стандарди су усвојени и у Србији и носе ознаке SRPS EN 1793.

Када звучни талас од извора *S* дође до *Уређаја за смањење буке (NRD)* дешавају се три физичке појаве (слика 5.23) [110]:

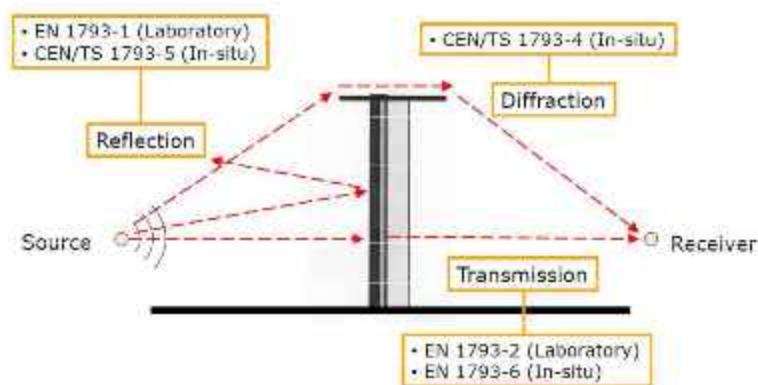
- 1. Рефлексија:** део звучног таласа се рефлектује назад;
- 2. Апсорпција:** део звучног таласа се апсорбује на самој препреци;
- 3. Трансмисија:** део звучног таласа се преноси кроз сам уређај на страну пријемника *R*;
- 4. Дифракција:** део звучног таласа који пролази преко горње ивице уређаја се савија и шири на заштићену страну уређаја (страну пријемника).



Слика 5.23. Рефлексија звука, апсорпција звука, пренос звука и дифракција звука (прилагођено из [110])

У складу са сликом 5.23. и стандарди серије EN 1793 се односе на утврђивање ефеката рефлексије, апсорпције, трансмисије и дифракције (слика 5.24.).

Overview of acoustic standards (EN 1793)



Слика 5.24. Преглед акустичких стандарда (EN 1793) [111]

SRPS EN 1793-1, Системи за смањење саобраћајне буке на путевима – Методе испитивања за одређивање акустичких особина – **Део 1: Основне карактеристике апсорпције звука.**

Према овом стандарду се испитује апсорпција звука узорка звучне баријере површине до 12m^2 у националној акредитованој лабораторији. Узорак се поставља на под реверберационе коморе (слика 5.25.) а ниво апсорпције се мери у фреквентном опсегу од 100Hz до 5kHz . Добијене вредности коефицијента апсорпције звука α_s се приказују табеларно и графички (слика 5.26.) а резултат испитивања се исказује преко Мерадавне апсорпције DL_α у децибелима (dB) и категорије испитаног узорка. DL_α је једнобројна оцена перформанси апсорпције звука изражена као разлика A-пондерисаних нивоа звучног притиска у децибелима. Једнобројна оцена апсорпције звука DL_α , у децибелима, дата изразом:

$$DL_{\alpha} = -10 \lg \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{18} \alpha_{Si} 10^{0,1L_i}}{\sum_{i=1}^{18} 10^{0,1L_i}} \right] \quad (5.1)$$

где је:

DL_{α} - једнобројна оцена перформанси апсорпције звука изражена као разлика А-пондерисаних нивоа звучног притиска, у децибелима;

α_{Si} - коефицијент апсорпције звука у i -том опсегу једне трећине октаве;

L_i - нормализовани А-пондерисани ниво звучног притиска, у децибелима, саобраћајне буке у i -том опсегу једне трећине октаве дефинисан у EN 1793-3.

Апсорпција DL_{α} се рангира у категорије А0 до А5 према табели 5.1.

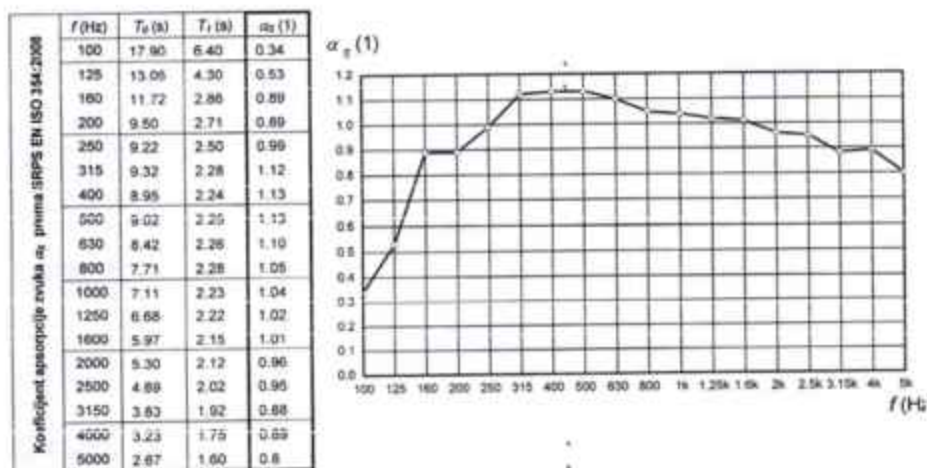
Табела 5.1. Категорије апсорпционе перформансе

Категорија	DL_{α} [dB]
A0	Није утврђено
A1	$DL_{\alpha} < 4$
A2	4 - 7
A3	8 - 11
A4	12 - 15
A5	> 15

Када су у питању апсорпционе баријере, већина пројеката аутопутева захтева категорију А3 или већу, А4 треба резервисати за тунеле и високе баријере (>3m), док је А0 резервисано за рефлектујуће баријере где апсорпцију није потребно тестирати.

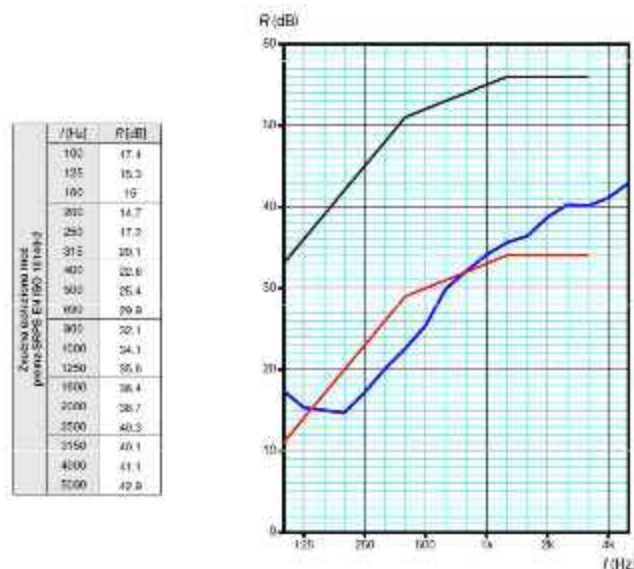


Слика 5.25. Испитивање узорка СЗБ у реверберационој комори

Слика 5.26. Измерене вредности коефицијента апсорпције звука α_0 .

SRPS EN 1793-2. Уређаји за смањење саобраћајне буке на путевима – Методе испитивања за одређивање акустичких особина – **Део 2: Интринзичне карактеристике изолације од ваздушног звука у условима дифузног звучног поља.**

Овим стандардом утврђује се лабораторијска метода за мерење перформанси изолације ваздушног звука уређаја за смањење саобраћајне буке у условима реверберације. Испитивање се спроводи по процедури која је описана у стандардима EN ISO 10140-1, EN ISO 10140-2 и EN ISO 10140-4 за преграде. Узорак саобраћајне звучне баријере површине не мање од $9,5 \text{ m}^2$ се монтира у отвор између две суседне просторије за реверберацију. Ниво изолације ваздушног звука се затим мери у опсегу фреквенције од 100Hz до 5kHz. Индекси редукције звука R_i у сваком опсегу једне трећине октаве одређују се коришћењем методе описане у EN ISO 10140-2 и приказују се у виду табеле и дијаграма (слика 5.27.).

Слика 5.27. Резултати испитивања индекса редукције звука R_i

За оцену се користи *једнобројна оцена изолације ваздушног звука* DL_R . Индивидуални индекси смањења звука се пондеришу у складу са нормализованим спектром саобраћајне буке дефинисаним у EN 1793-3.

Једнобројна оцена DL_R звучне изолације у ваздуху, у децибелима, дата је следећим изразом:

$$DL_R = -10 \lg \left[\frac{\sum_{i=1}^{18} 10^{0.1L_i} 10^{-0.1R_i}}{\sum_{i=1}^{18} 10^{0.1L_i}} \right] \quad (5.2)$$

где је:

DL_R - једнобројна оцена перформанси звучне изолације у ваздуху изражена као разлика А-пондерисаних нивоа звучног притиска, у децибелима;

R_i - индекс редукције звука у i -том опсегу једне трећине октаве;

L_i - нормализовани А-пондерисани ниво звучног притиска, у децибелима, саобраћајне буке у i -том опсегу једне трећине октаве дефинисан у EN 1793-3.

Категоризација изолације од ваздушног звука се спроводи на основу табеле 5.2.

Табела 5.2. Категорије изолације од ваздушног звука

Категорија	DL_R [dB]
B0	Није утврђено
B1	< 15
B2	15 – 24
B3	25 – 34
B4	> 34

Употреба једнобројне оцене DL_R служи искључиво у сврху поређења укупних перформанси уређаја за смањење буке, без обзира на локалне услове, састав саобраћаја и тип површине пута. За већину пројеката аутопутева задовољава категорија баријере B3. За ниске баријере (<2 метра) је довољно B2. B1 се у пракси ретко разматра а B0 је резервисано за "отворене" баријере [112].

SRPS EN 1793-3, Уређаји за смањење саобраћајне буке на путевима – Методе испитивања за одређивање акустичких особина – **Део 3: Нормализовани спектар саобраћајне буке.**

Пошто су главне акустичке особине уређаја за смањење саобраћајне буке, губитак преноса и апсорпција, зависни од фреквенције, потребно је дефинисати спектар саобраћајне буке за потребе испитивања.

Нормализовани спектар саобраћајне буке је спектар који се користи за прорачун акустичких перформанси уређаја за смањење саобраћајне буке у близини путева, у

смислу једнобројних оцена апсорпције звука и изолације ваздушног звука. Спектар је изражен у релативним А-пондерисаним нивоима звучног притиска, у децибелима, за опсеге од једне трећине октаве L_i , у опсегу фреквенција од 100 Hz до 5 kHz.

Нормализовани спектар саобраћајне буке који се користи за процену акустичких перформанси уређаја за смањење саобраћајне буке је дат у табели 5.3.

Табела 5.3. Нормализовани спектар саобраћајне буке

Нормализовани спектар саобраћајне буке	
f_i [Hz]	L_i [dB]
100	-20
125	-20
160	-18
200	-16
250	-15
315	-14
400	-13
500	-12
630	-11
800	-9
1000	-8
1250	-9
1600	-10
2000	-11
2500	-13
3150	-15
4000	-16
5000	-18

SRPS EN 1793-4, Уређаји за смањење саобраћајне буке на путевима – Методе испитивања за одређивање акустичких особина – **Део 4: Интринзичне карактеристике *In Situ* (на лицу места) вредности дифракције звука.**

Стандард EN 1793-4 квантификује нови параметар: дифракцију звука. Овај стандард дефинише методе испитивања и захтеве за допунске уређаје који се монтирају на саобраћајне звучне баријере, а који се користе за преусмеравање или смањење дифракције звука који пролази преко звучних баријера. Интринзична карактеристика дифракције звука је важна у процени перформанси допунских уређаја. Она одређује колико добро уређај преусмерава или смањује дифракцију звука који пролази кроз звучну баријеру. Стандард EN 1793-4 усмерен је ка изради конзистентних метода испитивања и оцене учинка допунских уређаја за побољшање перформанси баријера [112].

Извештај о испитивању ће изразити резултат теста као једнобројну оцену „разлике индекса дифракције“ ΔDI . Овај индекс је разлика између резултата тестова

дифракције звука на истом референтном зиду са и без додатка уређаја на врху, у децибелима.

SRPS EN 1793-5, Уређаји за смањење саобраћајне буке на путевима – Методе испитивања за одређивање акустичких особина – **Део 5: *In Situ* вредности рефлексије звука и изолације ваздушног звука.**

EN 1793-5 је развијен као резултат забринутости за валидност интерних лабораторијских тестова за саобраћајне звучне баријере јер EN 1793-1 и EN 1793-2 нису у потпуности репрезентативни за инсталиране радне услове за саобраћајне звучне баријере.

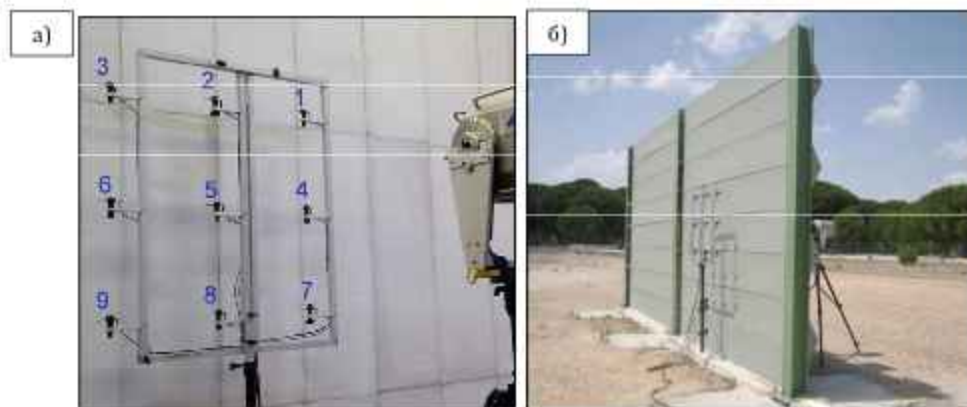
Метода испитивања се може применити и на лицу места, а резултати се изражавају у терминима:

- Индекс рефлексије (апсорпције) звука DL_{RI} (eng. *Sound Reflection (Absorption) Index*)
- Индекс звучне изолације DL_{SI} (eng. *Sound Insulation Index*)

DL_{RI} је једнобројна оцена перформанси рефлексије звука пондерисана према нормализованом спектру саобраћаја дефинисаном у EN1793-3 и изражена у децибелима.

DL_{SI} је једнобројна оцена за перформансе изолације од ваздушног звука пондерисана према нормализованом спектру саобраћаја дефинисаном у EN1793-3 и изражена у децибелима.

Примери мерења индекса звучне рефлексије и индекса звучне изолације *In Situ* су приказани на слици 5.28.



Слика 5.28. Мерење: а) индекса звучне рефлексије, б) индекса звучне изолације [110]

SRPS EN 1793-6, Уређаји за смањење саобраћајне буке на путевима – Методе испитивања за одређивање акустичких особина – **Део 6: Интринзичне карактеристике *In Situ* вредности изолације ваздушног звука у условима директног звучног поља.**

Стандард EN 1793-6: 2012 се односи на методе испитивања за процену перформанси изолације од ваздушног звука на лицу места (лабораторија на

отвореном'). Према овом стандарду се одређују перформансе у директном звучном пољу тј. под условима репрезентативним за стварну употребу баријере. На слици 5.29. је пример мерења импулсних одзива у слободном пољу, близу узорка, са низом од 9 микрофона под директним звучним пољем.



Слика 5.29. Мерење са 9 микрофона поред баријере у директном звучном пољу [109]

Може се констатовати да се стандарди EN 1793-1 и EN 1793-2 односе на дифузно звучно поље и испитивања која се заснивају на лабораторијским мерењима, док се стандарди EN 1793-4, EN 1793-5 и EN 1793-6 односе на директно звучно поље и мерења на лицу места. Стандард EN 1793-3 даје *Нормализовани спектар саобраћајне буке* који се користи за нормализацију података добијених мерењем и у дифузном и у директном звучном пољу (слика 5.30.).



Слика 5.30. Односи међу стандардима серије EN 1793 о акустичким карактеристикама *NRDs* (прилагођено из [113])

5.6.3 Стандард EN 1794: Неакустичне перформансе

EN 1794 покрива неакустичне карактеристике које су такође веома важне за звучне баријере. Неакустичке карактеристике су груписане у три стандарда EN 1794-1, EN 1794-2 и EN 1794-3.

SRPS EN 1794-1

У току експлоатације саобраћајне звучне баријере су изложене бројним оптерећењима: оптерећење од сопствене тежине, оптерећење ветром, притисак изазван саобраћајем на путу, ударима камења и других предмета које бацају гуме возила, динамичком оптерећењу које настаје услед удара снега које возила за уклањање снега бацају на баријеру и др. Потребно је да саобраћајне звучне баријере буду способне да издрже ова оптерећења током свог животног века. Овај стандард покрива *механичке перформансе и захтеве стабилности* при статичким оптерећењима баријере. Ово укључује следеће:

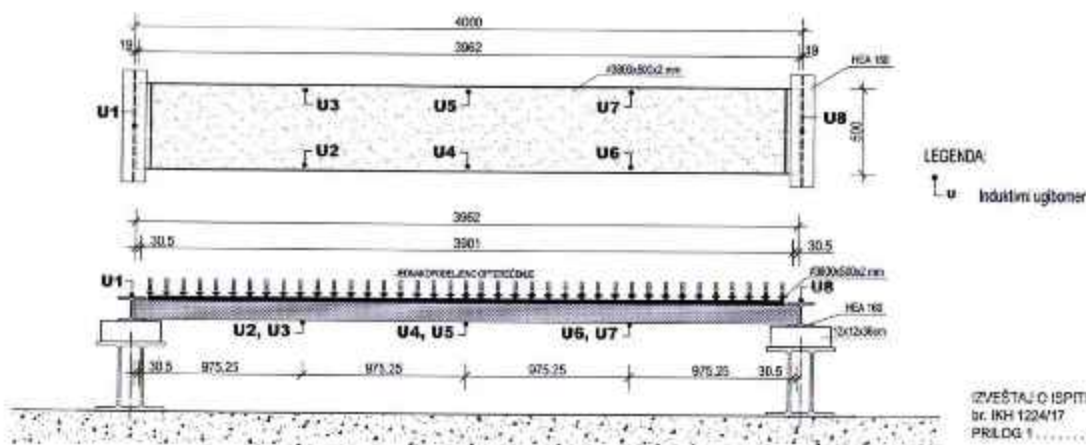
- оптерећење ветром и статичко оптерећење,
- сопствена тежина баријере,
- удар камења,
- безбедност при судару,
- динамичко оптерећење од чишћења снега.

Испитивање носивости и деформабилности панела за утицај једнако подељеног оптерећења ветра се изводи на одређеном броју панела са најдужим распоном заједно са носачима за причвршћивање. Панел са носачима се поставља у хоризонталној равни и обезбеђује се од бочног померања и ротације (слика 5.31.).

На површину елемента за заштиту од буке који треба да буде подвргнут напрезању мора се пажљиво поставити челична плоча изрезана на величину панела дебљине 2 mm. Одредиће се тачка у којој се јавља највећи вертикални отклон под овим оптерећењем и у тој тачки ће се извршити сва мерења угиба у односу на унапред одређену вредност. Прво мерење угиба ће се извршити 30 минута након што је челична плоча причвршћена. Челична плоча се затим уклања и мерење угиба се понавља након 30 минута. Разлика између два резултата мерења се сматра отклоном под сопственом тежином.

Челичну плочу треба вратити на исто место и одговарајући број челичних греда (исте дужине као и ослонци) равномерно распоредити преко челичне плоче, паралелно са ослонцима. (Уместо челичних греда по стандарду SRPS EN 1794-1: 2012 било је могуће користити бетонске коцке које се постављају преко челичног лима дебљине 2mm). Укупна тежина челичних греда укључујући челичну плочу мора бити 1,5 пута већа од укупне силе ветра (површине компресије) за коју се испитује зидни елемент. После 30 минута при овом оптерећењу угиб се мора поново измерити. Разлика између овог мерења и претходног мерења када је оптерећена само челичном плочом сматра се угибом под симулираним оптерећењем ветром.

У свим фазама испитивања се врше мерења угиба индуктивним угибомерима. Диспозиција испитивања и распоред угибомера је приказан на слици 5.31.



Слика 5.31. Диспозиција испитивања панела за смањење саобраћајне буке на утицај ветра

Измерене вредности карактеристичних угиба при одговарајућим оптерећењима се дају табеларно и у виду дијаграма оптерећење-угиб за све испитиване узорке. Максимални еластични отклон услед савијања под пројектованим оптерећењем ветром треба да буде мањи од 50 mm.



Слика 5.32. Испитивање панела за смањење саобраћајне буке на утицај ветра

Сопствена тежина елемената за заштиту од буке је потребна из два разлога. Одређивање суве тежине је неопходно да би се могла проценити вредност звучне изолације елемента. Ако елементи могу да апсорбују воду, тежина када су мокри је важан фактор у дизајну и елемената и структурних компоненти. Ограничења угиба су потребна да би се избегло продор звука, смањење висине или преоптерећење конструкционих елемената.

Стандардом је дефинисана тежина у сувом стању, тежина у влажном стању и смањена тежина у влажном стању. Одређени су механички захтеви који произилазе

из тежине самих елемената за заштиту од буке и у комбинацији са оптерећењима ветром. Дате су рачунске методе и тестови којима се може утврдити да ли су ови захтеви испуњени.

Тежина елемента за заштиту од буке када је сув може се одредити вагањем или израчунати из специфичне тежине и масе коришћених грађевинских материјала. Мокра тежина узима у обзир да се шупљине и порозни грађевински материјали могу напунити водом; такође треба сматрати да сви делови уређаја за заштиту од буке који упијају воду делују са тежином воде.

Отпорност на удар камена. Саобраћајне звучне баријере су подложне удару камења избаченог са површине пута. Императив је да издрже такве ударе и да оштећење баријере не буде велико. Стандардизовано лабораторијско испитивање симулира мале ударе, као што су удари изазвани камењем избаченим са коловоза. Тест се не односи на ударе тешких предмета или оштећења узрокована вандализмом. Процедура испитивања подразумева следеће:

- користи се каљена ударна игла,
- енергија удара чекића треба да буде $(30 \pm 1) \text{ Nm}$,
- оштећења морају бити ограничена на спољашње делове конструкције а унутрашње компоненте не смеју бити оштећене или померене услед удара,
- ударна игла не сме да продре у спољашњи зид шупљих елемената, али су дозвољена локализована оштећења у виду пукотина максималне дужине 50 mm,
- мања оштећења на површини крхких грађевинских материјала у виду љуштења у облику кратера (када се фрагменти љуште) су дозвољена под условом да је дубина кратера мања од дебљине спољног зида или не прелази 20 mm.

Стандардом су дефинисане димензије ударне игле и локације тачака које се тестирају у оквиру испитног подручја.



Слика 5.33. Испитивања отпорности на удар камена [109]

Безбедност у случају судара возила. Генерално се не очекује да уређаји за смањење буке издрже ударе возила. Такви удари се могу избећи постављањем система за задржавање или држањем довољног растојања од пута. Ако ниједна опција није могућа, надлежни органи морају размотрити последице удара возила и размотрити да ли сам уређај за заштиту од буке треба да служи и као систем за задржавање возила при чему су последице удара возила прихватљиве из перспективе путника у возилу. Даље последице оштећења које могу настати након удара на уређај за смањење буке обрађене су у EN 1794-2:2003, Анекс Б.

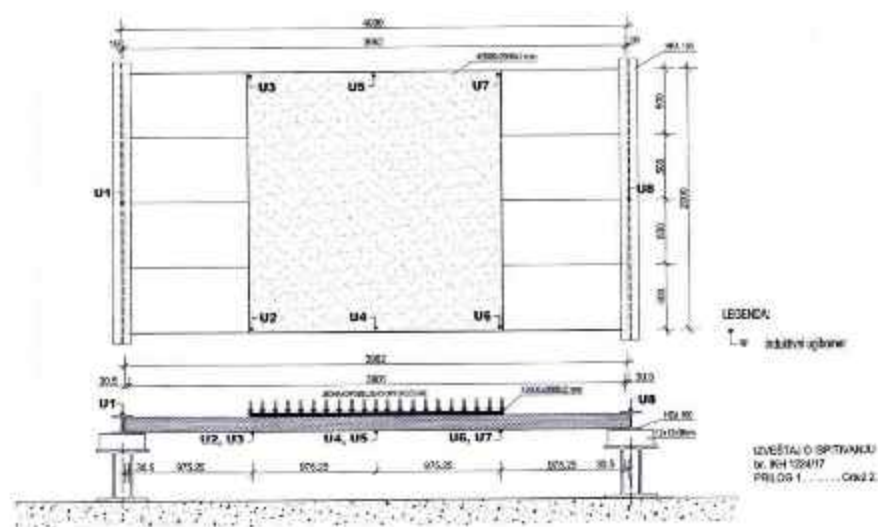
Критеријуми прихватања уређаја за заштиту од буке безбедних у саобраћају су следећи:

- делови уређаја за заштиту од буке не смеју да продру у унутрашњост возила. Нису дозвољене деформације унутрашњости возила или делимични продор делова у унутрашњост возила који могу довести до озбиљних повреда,
- возило мора остати усправно након удара, иако је дозвољено умерено превртање, нагиб или скретање,
- јачина удара мора одговарати нивоу јачине удара А или Б као што је наведено у EN 1317-2.

Динамичка оптерећења због чишћења снега. У областима где се снежни плугови често користе за чишћење путева зими, саобраћајне звучне баријере могу бити оштећене снегом и ледом које баца снежна ралица. Оптерећење изазвано баченим снегом се овде назива динамичким оптерећењем услед уклањања снега. Количина и висина терета зависе од брзине и врсте снежног плуга и удаљености СЗБ од ивице коловоза. Машине за чишћење снега такође могу да бацају комаде леда, али се такви удари третирају као удари изазвани баченим камењем.

Испитивање носивости и деформибилности панела за утицај оптерећења од чишћења снега се симулира постављањем ђакова напуњених песком на четири монтирана панела (или наношењем бетонских коцки преко челичног лима димензија 2000x2000x2mm). Панели треба да буду ослоњени на стубове или темеље у складу са нормалном употребом, али се постављају у хоризонталном положају са страном пута окренутом нагоре. Тежина врећа по квадратном метру мора бити 1,5 пута већа од израчунатог динамичког оптерећења због уклањања снега по квадратном метру, умањена за тежину зидне плоче по квадратном метру. Оптерећење се равномерно распоређује на површини од 2000mmx2000mm тако да резултанта оптерећења буде центрирана између стубова. Резултирајућа сила треба да буде 1,5m изнад површине пута осим ако други распореди оптерећења доводе до већег угиба или критичнијег оптерећења у зглобовима; користи се распоред оптерећења који доводи до најнеповољнијег оптерећења.

Под динамичким оптерећењем као резултатом чишћења снега, ни носеће компоненте ни елементи за заштиту од буке не могу показати знаке оштећења као нпр. пукотине које могу довести до оштећења у високо корозивном окружењу, извијања, трајне деформације или релативних померања која могу довести до отварања спојева између зидних панела. Елементи се не смеју одвојити од носивих компоненти или од њихових прикључака.



Слика 5.34. Диспозиција испитивања панела за смањење саобраћајне буке на динамичко оптерећење од чишћења снега

Резултати испитивања се такође дају табеларно и у виду дијаграма оптерећење-угиб за све испитиване узорке.



Слика 5.35. Примери испитивања панела за смањење саобраћајне буке на динамичко оптерећење од чишћења снега

SRPS EN 1794-2

Уређаји за смањење саобраћајне буке не би требало да представљају опасност за учеснике у саобраћају, за друге људе у близини, нити за животну средину уопште. Поред тога, уређаји за заштиту од буке не би требало да спречавају ширење ватре са суседних трака или са оближњег терена. Отпорност на ватру према одређеним стандардима такође може бити потребна да би се смањила опасност за суседне објекте и учеснике у саобраћају на затвореним путевима. Уређаји за заштиту од буке не би требало да рефлектују светлост на начин да се наруши безбедност саобраћаја. Треба да буду направљени од материјала који, као резултат природних или индустријских процеса или у случају пожара, не испуштају токсична испарења и из којих не могу да изађу токсичне алкалије. Уређаји за заштиту од буке треба да садрже путеве за евакуацију за учеснике у саобраћају и да омогуће хитним службама приступ путу у случају нужде.

Овај европски стандард пружа минималне захтеве и друге критеријуме за оцењивање уређаја за смањење буке у смислу безбедности и заштите животне средине уопште у типичним условима поред пута. Ово укључује следеће:

- отпорност на ватру шибља,
- секундарна безбедност (опасност од пада делова зида),
- заштита животне средине,
- средства за евакуацију у случају опасности,
- рефлексија светлости,
- транспарентност (провидност).

Отпорност на ватру шибља. Саобраћајне звучне баријере могу бити изложене пожарима који настају када се сува вегетација или други оближњи материјал запали. Веће пожаре може изазвати проливено гориво као последица саобраћајних незгода. Ако се уређаји за заштиту од буке подижу у непосредној близини изграђених имања, може бити потребно и да се обезбеди да се пожар са пута не прошири на ова имања. Тамо где се користе запаљиви системи, препоручује се да се баријера опреми ватроотпорним тракама од материјала отпорног на ватру или друге конструкције како би се спречило даље ширење било каквог пожара који би могао да избије. Овај стандард се не примењује на такве материјале отпорне на ватру.

Овим стандардом се утврђује испитивање на репрезентативном зидном панелу вертикалне саобраћајне звучне баријере под типичним условима који се јављају током пожара шибља поред пута. Испитују се елементи за заштиту од буке са минималном дужином од 2m и минималном висином од 1,5m тако што су обе стране узорка појединачно изложене локализованој ватри, која се пали на тлу непосредно уз предњи и задњи део елемента (слика 5.36.).



Слика 5.36. Испитивања панела СЗВ на отпорност на ватру шибља

Уређаји за смањење буке испитани према процедури наведеној у анексу А.3 класификују се у једну од следећих класа:

Класа 1: ако је зидна плоча оштећена у већој мери него што је прописано за класе 2 и 3;

Класа 2: ако је оштећена површина изнад било ког од два извора пожара мања од $0,06 \text{ m}^2$ и не протеже се више од 200mm изнад доње ивице зида и зид није прогорео до задњег дела;

Класа 3: ако није дошло до оштећења осим промене боје.

Секундарна безбедност (опасност од пада делова зида). Уређаји за заштиту од буке могу у случају оштећења представљати опасност за учеснике у саобраћају и друге учеснике у близини баријере јер постоји опасност да се делови (опасне крхотине) или цели зидни панели одвоје и падну услед снажног удара, угрожавајући људе испод. Зато је у одређеним случајевима потребно причврстити зидне елементе помоћу унутрашњих или спољашњих уређаја како би се спречило њихово одвајање и падање.

Уређај за смањење буке сматра се безбедно причвршћеним ако су елементи причвршћени на такав начин да неће пасти у случају деформације или лома или ако су компоненте које носе оптерећење и елементи за заштиту од буке ове категорије уређаја спречени да падну помоћу система за задржавање који повезује компоненте или елементе.

У овој методи испитивања, удар са тешком масом се примењује управно на центар или најосетљивију тачку узорка или друге тестиране компоненте или система, тако да је узорак уништен или избачен из држача. Ударно тело се састоји од ротационо симетричног двоструког конуса направљеног од челика и тежи 45kg.

У делу Б.3.8.1 су дефинисани критеријуми детекције лабавих фрагмената:

- нема крутих фрагмената узорка већих од 25cm^2 и тежине веће од $0,100\text{ kg}$,
- нема чврстих фрагмената узорка дужих од 15 cm ,
- нема чврстих фрагмената узорка са угловима мањим од 15° и тежим од $0,100\text{ kg}$,
- нема фрагмената тежине веће од $0,400\text{ kg}$,
- нема чврстих фрагмената оштрих ивица дебљине мање од 1 mm и тежине веће од $0,100\text{ kg}$.



Слика 5.37. Испитивања секундарне сигурности СЗБ [114]

Заштита животне средине. Одговорни за тендер треба да буду обавештени о томе које компоненте СЗБ могу дугорочно имати негативан утицај на животну средину или се могу поново користити као слични или различити производи након одговарајућих процеса рециклаже. Стога је неопходно да добављачи јасно назначе компоненте како би се могло утврдити који производи разградње настају услед излагања временским условима или као последица пожара. Информације о компонентама и њиховим могућностима рециклаже су корисне информације за понуђача.

Захтеви овог дела стандарда су дефинисани Анексом Ц:

- треба приложити спецификацију свих материјала који се користе у уређају за смањење буке,
- треба приложити спецификацију свих физичких и хемијских услова који могу довести до ослобађања потенцијално токсичних компоненти у животну средину,
- ако се неки од ових материјала у потпуности или делимично састоје од рециклираних материјала, треба навести проценат таквих материјала,

- могу се дати информације о разумној могућности рециклирања грађевинских материјала од којих је направљен уређај за заштиту од буке, али се мора позвати на границе рециклирања.

Средства за евакуацију у случају опасности. У одређеним околностима може бити неопходно обезбедити директан приступ путу:

- за одржавање баријере од буке,
- за службе спасавања након несреће,
- као путеви за бекство за возаче после незгоде.

Захтеви дефинисани Анексом Д стандарда су:

- сваки приступ треба да има следеће минималне димензије: висина 2.1m и ширина 0.9m,
- потребно је предузети одговарајуће мере за пројектовање приступних тачака на такав начин да се задржи укупна акустичка ефикасност саобраћајне звучне баријере,
- врата морају бити опремљена механизмом за самозатварање и заптивкама како би се спречило прекомерно продирање буке кроз отворе и да се обезбеди да остану функционална чак и у неповољним временским условима,
- врата на страни окренутој од саобраћаја могу се отворити само кључем или специјалним алатом, осим ако приступ путу са суседних имања није онемогућен другим мерама. Врата која служе као путеви за евакуацију морају да се отварају даље од саобраћаја у правцу евакуације и да буду опремљена паник арматуром,
- потребно је да постоје знакови који ће указивати на локацију путева за евакуацију.

Рефлексија светлости. Светлост се одбија од глатких површина у зависности од упадног угла. При великим угловима упада, одсјај сунца или фарова ноћу може бити толико јак да су возачи иритирани или заслепљени, што нарушава безбедност саобраћаја. Обично су ови проблеми последица интеракције производа и локалних услова.

За испитивање рефлексије се користи узорак са минималним димензијама 150mmx300mm. Потребно је извршити 10 мерења рефлексије за три упадна угла (20°, 60° и 85°) са испитним апаратом постављеним на различитим насумично одабраним локацијама. На основу добијених резултата рефлексије одређује се резултујућа класа, користећи табелу 5.4.

Табела 5.4. Класе рефлексије

Класа	Вредност сјаја
Класа 0	Није проверено
Класа 1	Вредност сјаја >80
Класа 2	Вредност сјаја 40÷80
Класа 3	Вредност сјаја >40



Слика 5.38. Примери рефлексија СЗБ [115]

Транспарентност. Постоје два аспекта транспарентности које треба размотрити одвојено:

- транспарентност за људе који живе иза уређаја за заштиту од буке (статичка транспарентност),
- транспарентност за учеснике у саобраћају (динамичка транспарентност).

Статичка транспарентност је важна из естетских разлога за људе заштићене баријером од буке. Док гледају дуж ње, њихов поглед је ограничен непрозирним елементима.

Динамичка транспарентност утиче на учеснике у саобраћају да виде локацију иза саобраћајне звучне баријере и може бити важна за безбедност на путевима, на пример, када возачи треба да предвиде спајање са саобраћајницом иза саобраћајне звучне баријере. Возачи ће често моћи да виде локацију само под косим углом кроз уређај за заштиту од буке.

Процедура за процену укупне ефективне транспарентности узима у обзир релативну транспарентност различитих материјала и губитке повезане са гледањем косих углова кроз провидне елементе, као и непрозирне елементе баријере као што су стубови, траке за заштиту птица и сл. који утичу на укупан изглед и смањују транспарентност. Ефекти површинских третмана и контаминације провидних елемената прашином се не узимају у обзир.

EN 1794-3

Стандард EN 1794-3 се односи на реакцију баријере на пожар и понашање при сагоревању. Перформансе баријере се тренутно процењују тестирањем система против пожара шибља и дефинисане су у Анексу А стандарда.

Класификација производа према еврокласама (EN 13501) препоручује се за одређену намену према приложеној табели:

Табела 5.5. Класификација реакције на ватру за уређаје за смањење буке [114]

Класа	Намена	Тест перформансе
1	Тунели и тотални покривачи	Класа Б или боља према EN 13501
2	Делимични покривачи на мостовима и у близини кућа	Класа Е или боља према EN 13501
3	Све друге ситуације у којима би пожар могао бити релевантан	Резултати испитивања према Анексу А

5.6.4 Стандард EN 14389: Трајност (Дугорочне перформансе)

Поред испуњавања акустичких и конструкционих захтева, СЗБ и сродни уређаји треба и да одржавају своје перформансе током потребног радног века. Акустични елементи морају да се одупру деловању више агенаса у окружењу на путу који би могли значајно да деградирају њихове перформансе. Конструкциони елементи треба да задрже прихватљиве сигурносне факторе на крају свог радног века. Сви елементи у конструкцији саобраћајне звучне баријере треба да буду отпорни на електролитску и/или хемијску корозију и кртост, да буду димензионално стабилни и генерално имају високу отпорност на старење под различитим излагањима околине.

Иако HA66/95 [116] захтева да се баријере граде за 40 година радног века, многе баријере пропадају након само 5 или 10 година због лошег квалитета изградње. Ово је указало на потребу за методом за процену дугорочних перформанси СЗБ и у смислу њених акустичких и неакустичких карактеристика.

Дугорочне перформансе су дефинисане стандардом EN 14389.1.2. При том треба имати у виду следеће:

- трајност (*durability*) саобраћајне звучне баријере је веома осетљива ствар јер СЗБ могу бити израђене од различитих материјала и комбинују различите материјале,
- различити материјали не старе на исти начин,
- комбинација различитих материјала може драстично утицати на старење,
- старење утиче на акустичне и неакустичне карактеристике СЗБ.

Стандард EN 14389-1 (2015) третира трајност акустичких карактеристика. Наслов стандарда је: *Уређаји за смањење саобраћајне буке – Процедуре за процену дуготрајних перформанси – Акустичке карактеристике*. Овај стандард обезбеђује метод за процену акустичне издржљивости користећи „ин ситу“ процедуру испитивања EN 1793-5. Стандард дозвољава произвођачу да изјави процењено смањење акустичких перформанси баријере за буку након 5, 10, 15 и 20 година рада у датим класама изложености уз претпоставку њеног одржавања у складу са препорукама произвођача. Такође пружа метод за купца да се врати на постојећу баријеру и поново је тестира на лицу места како би утврдио колико је дуготрајна.

Апсорпција звука DL_{α} треба да задовољи следеће услове:

- вредност на крају радног века треба да буде 12 dB,

- декларисани радни век у годинама као функција класа изложености животној средини:

4B1	4B2	4C2	4C3	4C4	4K2	4K3	4M3	4M4	4S2	4Z6	4Z7
10	NPD	15	15	23	8	20	NPD	NPD	10	20	20

Стандард EN 14389-2 (2015) третира трајност неакустичких карактеристика. Наслов стандарда је: *Уређаји за смањење саобраћајне буке – Процедуре за процену дуготрајних перформанси – Неакустичке карактеристике*. Овај стандард пружа метод за процену неакустичних аспеката трајности првенствено дескриптивним средствима.

Декларисани радни век у годинама као функција класа изложености животној средини је:

4B1	4B2	4C2	4C3	4C4	4K2	4K3	4M3	4M4	4S2	4Z6	4Z7
10	NPD	15	15	23	8	20	NPD	NPD	10	20	20

5.6.5 Одрживост (Sustainability)

У складу са сликом 5.21. *Европски (CEN) стандарди за саобраћајне звучне баријере* започео је рад на изради стандарда и протокола за процену одрживости саобраћајних звучних баријера.

На крају треба констатовати следеће:

Очигледно је да нису све ове области потребне за сваки пројекат. Оптерећење ветром и статичко оптерећење и безбедност при судару су од виталног значаја у сваком случају како би се осигурало да баријера испуњава захтеве Националне управе за аутопутеве. Остале области као што су рефлексија светлости или опасност од отпадака су специфичније за локацију и разликују се од локације до локације.

**РАЗВОЈ МОДЕЛА ЗА ПОДРШКУ
ОДЛУЧИВАЊУ**

6.1 Приступ развоју модела

Главни задатак ове дисертације је развој модела одлучивања за избор оптималне конфигурације саобраћајних звучних баријера заснованих на модуларној градњи. Модел треба да омогући да се из фонда расположивих модула конфигурише СЗБ која ће на оптималан начин задовољити акустичке и неакустичке захтеве. Понуђена конфигурација треба да омогући инвеститору да за конкретне услове сваке деонице пута одабере најквалитетнију варијанту која ће уједно бити и економски најисплативија, а предложена методологија ће произвођачима баријера обезбедити јасна правила на основу којих могу градити своју конкурентност на тржишту СЗБ.

Вишекритеријумско одлучивање се примењује у различитим ситуацијама када треба донети одлуку код сложених проблема, где постоји велики број критеријума, који могу бити веома различити, па чак и међусобно супротни. Потребно је размотрити све критеријуме заједно, рангирати и изабрати једну од алтернатива.

Ове методе су познате као вишекритеријумско доношење одлука (енг. MCDM- *Multi Criteria Decision Making*) или анализа вишекритеријумског одлучивања (eng. MCDA- *Multicriteria decision analysis*).

Постоје две основне групе поделе ових метода [117]–[120]:

- Методе вишеатрибутивног одлучивања (енг. MADM-*Multiple Attribute Decision Making*) које представљају избор оптималне алтернативе између одређеног броја алтернатива на основу дефинисаних критеријума, и
- Методе вишециљног одлучивања (енг. MODM-*Multi Objective Decision Making*) које дају решење проблема у континуалном или целобројном домену на основу више дефинисаних функција циља са великим бројем алтернатива. MODM се обично може уклопити у аспект програмирања/дизајнирања, као што је постизање оптималних циљева разматрањем различитих интеракција унутар датих ограничења.

С обзиром на природу проблема који се решава, из фонда расположивих метода вишеатрибутивног одлучивања MADM, предложена је интеграција FUZZY AHP и MODIPROM методе. У наставку је изложен модел са детаљно образложеном методологијом примене.

6.2 Интеграција FUZZY AHP и MODIPROM метода

У поглављу 5 су детаљно анализирани критеријуми које треба да испуни СЗБ. У зависности од конкретних услова за одређену деоницу пута односно, средине коју је потребно заштити од прекомерне буке, избор и вредновање усвојених критеријума ће бити различито. Тако ће значај критеријума бити различит за урбано, рурално или полурурално подручје. Осим тога, трасе пута поред мора и у пределима где је велика влажност ће захтевати већу отпорност баријере на корозију, подручја са јаким ударима ветра ће захтевати јачу отпорност баријере на статичко оптерећење и оптерећење ветром, подручја где су велике снежне падавине захтевају и већу отпорност баријере на динамичко оптерећење од чишћења снега итд.

Проблем се своди на избор најприхватљивије алтернативе на основу великог броја критеријума при чему је одређивање значаја (релативне тежине) критеријума од пресудног значаја. Зато је за квантификовање релативних тежина критеријума коришћена *Метода фази аналитичког хијерархијског процеса* (енг. *FAHP -Fuzzy Analitic Hierarchy Process*) која користи лингвистичке варијабле помоћу којих доносилац одлуке квантитативно исказује своје процене узимајући при том у обзир ризике непрецизности, неизвесности и неодређености. За описивање неизвесности у овој дисертацији су коришћени лингвистички искази моделирани применом троугластих *fuzzy* бројева са променљивим интервалом поверења.

За избор најбоље алтернативе из скупа расположивих алтернатива је одабрана *MODIPROM* метода (**MOD**ified **PROM**ethee **M**ethod) заснована на побољшању фамилије метода за вишекритеријумско рангирање познате под називом *PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation)*. Ова метода спада у методе „вишег ранга“ (outranking methods) и посебно је корисна у случајевима кад постоји ограничен број алтернатива и већи број међусобно конфликтних критеријума.

Алгоритам интеграције ове две методе је приказан на слици 6.1.

6.2.1 Дефинисање проблема и циља одлучивања

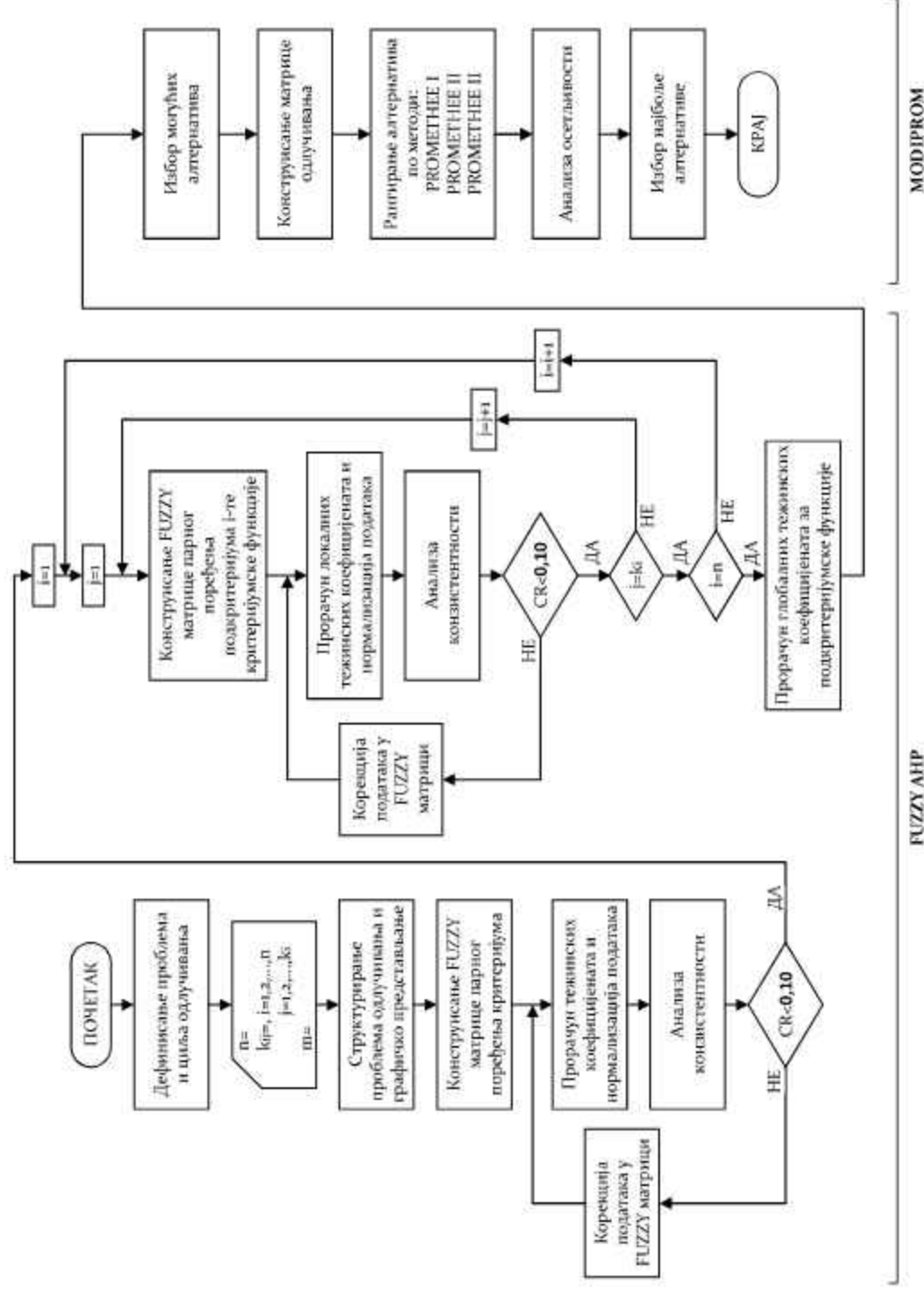
Проблем који треба решити је избор оптималне алтернативе (конфигурације СЗБ) из коначног скупа расположивих алтернатива. Циљ је да оптимална конфигурација СЗБ задовољи акустичке и неакустичке захтеве конкретне деонице пута.

6.2.2 Дефинисање критеријума одлучивања

На основу поглавља 5 се може дефинисати 6 главних критеријума:

- C1. Акустичке перформансе
- C2. Механичке перформансе
- C3. Безбедност и заштита животне средине
- C4. Трајност
- C5. Трошкови-цена
- C6. Остало

Структура усвојених критеријума и поткритеријума је приказана у табели 6.1. Види се да је задатак веома комплексан тим пре што су поједини критеријуми и поткритеријуми међусобно супростављени.



Слика 6.1. Интеграција FANP и MODIPROM методе – дијаграм тока

Табела 6.1 Класификација критеријума за избор панела СЗБ

Критеријум	Ознака	Поткритеријум	Стандард	Ознака
Акустичке перформансе	C1	Једнобројне вредности оцене перформанси звучне апсорпције материјала – DL_{α} [dB]	EN 1793-1	C11
		Једнобројна вредност оцене изолације од ваздушног звука – DL_{π} [dB]	EN 1793-2	C12
		Вредност дифракције звука (<i>In Situ</i>)- ΔDL [dB]	EN 1793-4	C13
		Индекс рефлексије звука (<i>In Situ</i>)- DL_{RI} [dB]	EN 1793-5	C14
		<i>In Situ</i> вредност изолације ваздушног звука у условима директног звучног поља – DL_{SI} [dB]	EN 1793-6	C15
Механичке перформансе и захтеви стабилности при статичком оптерећењу баријере	C2	Оптерећење ветром и статичко оптерећење	EN 1794-1- Анекс А	C21
		Оптерећење од сопствене тежине	EN 1794-1- Анекс Б	C22
		Отпорност на удар камења	EN 1794-1- Анекс Ц	C23
		Безбедност у случају удара возила у баријеру	EN 1794-1- Анекс Д	C24
		Динамичко оптерећење због чишћења снега (оптерећење изазвано баченим снегом и ледом које баца снежна ралица при чишћењу путева зими)	EN 1794-1- Анекс Е	C25
Безбедност и заштита животне средине	C3	Отпорност на ватру шибља	EN 1794-2- Анекс А	C31
		Секундарна безбедност (опасност од пада делова зида-крхотина)	EN 1794-2- Анекс Б	C32
		Заштита животне средине	EN 1794-2- Анекс Ц	C33
		Средства за евакуацију у случају опасности	EN 1794-2- Анекс Д	C34
		Рефлексија светлости	EN 1794-2- Анекс Е	C35
		Транспарентност (провидност)	EN 1794-2- Анекс Ф	C36
		Реакција баријере на пожар и понашање при сагоревању	EN 1794-3	C37
Трајност (дугорочне перформансе)	C4	Трајност акустичких карактеристика	EN14389-1	C41
		Трајност неакустичких карактеристика	EN14389-2	C42
Трошкови	C5	Трошкови конструкције (израде) [EUR/m ²]		C51
		Трошкови одржавања и замене [EUR/m ²]		C52
		Укупни трошкови радног века [EUR/m ²]		C53
Остало	C6	Производња обновљиве енергије [MJ/m ²]		C61
		Радни век [година]		C62
		Мogućност рециклаже [%]		C63
		Генерисање прихода [EUR/m ²]		C64
		CE сертификат		C65

За решење конкретног проблема је неопходно дефинисати индикаторе (показатеље) за сваки критеријум и претворити квалитативне атрибуте у

квантитативне тј. у бројне вредности. Усвојене скале за квантификацију дефинисаних критеријума су приказане у табели 6.2.

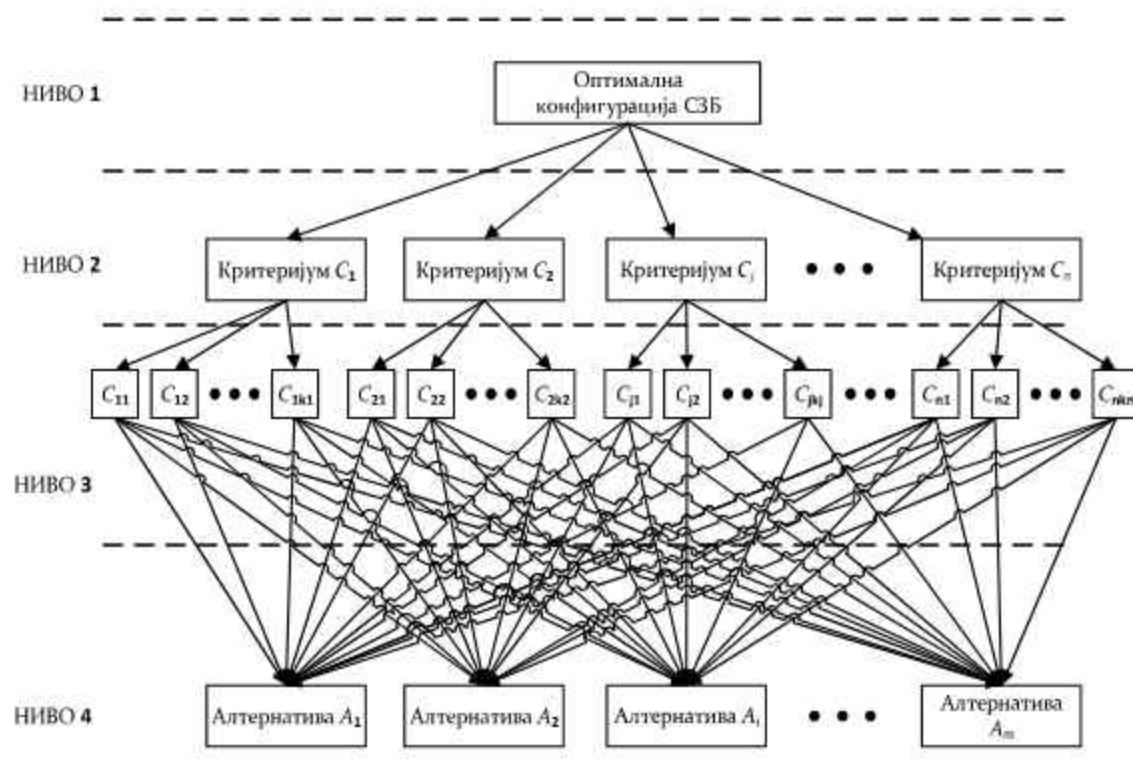
Табела 6.2. Квантификација критеријума

Критеријум	критеријум оптимизације min/max	Индикатор	квантификација критеријума	
C11	max	Прорачуната вредност $D_{L\alpha}$ [dB] или категорија апсорпционе перформансе	A5 (>15 [Db]) A4 (12-15 [Db]) A3 (8-11 [Db]) A2 (4-7 [Db]) A1 (<4 [Db]) A0 (није утврђено)	5- изузетна 4-одлична 3- вр. добра 2- добра 1- лоша 0-изузетно лоша
C12	max	Прорачуната вредност D_{Lr} [dB] или категорија изолације од ваздушног звука	B4 (>34 [Db]) B3 (25-34 [Db]) B2 (15-24 [Db]) B1 (<15 [Db]) B0 (није утврђено)	4- изузетна 3-одлична 2- добра 1- лоша 0-изузетно лоша
C13	min	Једнобројна оцена разлике индекса дифракције ΔDL	Измерена вредност ΔDL у [dB]	
C14	max	Једнобројна оцена перформанси рефлексије звука пондерисана према нормализованом спектру саобраћаја дефинисаном у EN 1793-3	Вредност DL_{RI} у [dB]	
C15	max	Једнобројна оцена перформанси изолације од ваздушног звука пондерисана према нормализованом спектру саобраћаја дефинисаном у EN 1793-3	Вредност DL_{SI} у [dB]	
C21	max	Поседује сертификат по стандарду EN 1794-1-Анекс А - да је максимални еластични отклон од оптерећења ветром < 50mm		1- задовољава 0-не задовољава
C22	min	Поседује сертификат по стандарду EN 1794-1-Анекс Б - да задовољава оптерећење од сопствене тежине		1- задовољава 0-не задовољава
C23	max	Поседује сертификат по стандарду EN 1794-1-Анекс Ц - да су дозвољена локализована оштећења у виду пукотина максималне дужине 50mm		1- задовољава 0-не задовољава
C24	min	Поседује сертификат по стандарду EN 1794-1-Анекс Д - да делови баријере не смеју да продру у унутрашњост возила у случају удара возила у баријеру		1- задовољава 0-не задовољава
C25	max	Поседује сертификат по стандарду EN 1794-1-Анекс Е - да ни носећи елементи ни елементи за заштиту од буке не смеју показивати знаке оштећења (пукотине, извијања, трајне деформације, релативна померања, одвајање од носивих компонената...) од динамичког оптерећења због чишћења снега		1- задовољава 0-не задовољава
C31	max	Класа отпорности на ватру шибља Поседује сертификат по стандарду EN 1794-2-Анекс А	Класа 3 Класа 2 Класа 1	5- висока 3- просечна 1-ниска

C32	max	Поседује сертификат по стандарду EN 1794-2-Анекс Б - да задовољава секундарну безбедност		1- задовољава 0-не задовољава
C33	max	Поседује сертификат по стандарду EN 1794-2-Анекс Ц - Информације о уграђеним компонентама које могу имати негативан утицај на ЖС и њиховим могућностима рециклаже		1- задовољава 0-не задовољава
C34	max	Поседује сертификат по стандарду EN 1794-2-Анекс Д - да поседује средства за евакуацију у случају опасности		1- задовољава 0-не задовољава
C35	max	Класа рефлексије светлости Поседује сертификат по стандарду EN 1794-2-Анекс Е	Класа 3 (вредност сјаја <40) Класа 2 (вредност сјаја 40-80) Класа 1 (вредност сјаја >80) Класа 0 (није проверено)	3-одлична 2- добра 1- лоша 0-изузетно лоша
C36	max	Укупна ефективна транспарентност Поседује сертификат по стандарду EN 1794-2-Анекс Ф		1- задовољава 0-не задовољава
C37	max	Поседује сертификат по стандарду EN 1794-3- о перформансама баријере која се односи на реакцију на пожар и понашање при сагоревању	Класа Б за тунеле Класа Е за баријере	1- задовољава 0-не задовољава
C41	max	Декларисани радни век у годинама као функција класа изложености животној средини Поседује сертификат по стандарду EN 14389-1	Бројна вредност у годинама	[год.]
C42	max	Декларисани радни век у годинама као функција класа изложености животној средини Поседује сертификат по стандарду EN 14389-2	Бројна вредност у годинама	[год.]
C51	min	Трошкови конструкције (израде)	Бројна вредност	[EUR/m ²]
C52	min	Трошкови одржавања и замене	Бројна вредност	[EUR/m ²]
C53	min	Укупни трошкови радног века	Бројна вредност	[EUR/m ²]
C61	max	Производња обновљиве енергије		[MJ/m ²]
C62	max	Радни век		[година]
C63	max	Могућност рециклаже		[%]
C64	max	Генерисање прихода		[EUR/m ²]
C65	max	Поседује СЕ сертификат		1- поседује 0-не поседује

6.2.3 Структурирање проблема одлучивања

Како се ради о сложенем систему критеријума који су декомпоновани на два нивоа, декомпоновање проблема одлучивања се у овом случају изводи на четири хијерархијска нивоа. На највишем хијерархијском нивоу је циљ одлучивања тј. избор оптималне конфигурације СЗБ. Други хијерархијски ниво представљају главни критеријуми, а трећи поткритеријуми на основу којих се рангирају алтернативе. На најнижем хијерархијском нивоу су алтернативе које треба рангирати. Структурирање проблема одлучивања је приказано на слици 6.2.



Слика 6.2. Структурирање (декомпозиција) проблема одлучивања

6.2.4 Конструисање fuzzy матрице парног поређења критеријума

Да би се објаснио поступак конструисања матрице парног поређења критеријума неопходно је дати основне напомене о методама АНР и FАНР (Fuzzy АНР).

6.2.4.1 АНР метода

Методу аналитичког хијерархијског процеса (АНР) је развио Thomas Saaty [121]. Код ове методе се одређује значај сваког критеријума у односу на циљ. То се изводи поређењем парова, односно, применом *матрице поређења*. За проблем који треба решити направи се структура према хијерархији, тако што се на врху поставља циљ, а затим критеријуми, поткритеријуми и алтернативе на нивоима и поднивоима хијерархијске структуре.

За рангирање алтернатива код АНР методе, потребно је спровести четири фазе [117]: структурирање проблема, прикупљање података, оцењивање релативних тежина и одређивање решења проблема. Постоје и два додатна корака: провера конзистентности и анализа осетљивости. Ови кораци нису обавезни, али се препоручују као потврда робустности добијених резултата.

Формира се матрица поређења која одговара сваком нивоу у хијерархији. Поређење парова се изводи на основу прикупљених или измерених података, на основу процена оних који доносе одлуку. Ако су подаци описни, потребно је превести их у нумеричке вредности, а за АНР методу користи се Saaty-јева скала.

Применом *Saaty*-јеве скале за поређење у паровима [122]–[125], тако што се сваком критеријуму додаје одређена вредност из ове скале, може се извршити поређење свих критеријума међусобно и након математичке обраде добити вредности које се на крају могу рангирати.

Нумеричке вредности које се додељују критеријумима крећу се у интервалу од 1 до 9. Постоје основне вредности 1, 3, 5, 7 и 9 и међувредности 2, 4, 6 и 8, чије су дефиниције приказане у наредној табели.

Табела 6.3. *Saaty*-јева скала за поређење у паровима [122]–[125]

Нумеричке вредности	Дефиниција	Реципрочне вредности
1	Исти значај	1
3	Слаба доминантност	1/3
5	Јака доминантност	1/5
7	Врло јака доминантност	1/7
9	Апсолутна доминантност	1/9
2, 4, 6, 8	Међувредности	1/2, 1/4, 1/6, 1/8

Доносиоци одлука уз помоћ *Saaty*-јеве скале формирају *матрицу поређења парова*, на основу поређења парова критеријума.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & & a_{2n} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Табеларни приказ овог поређења парова критеријума је приказан у следећој табели.

Табела 6.4. Табеларни приказ поређења парова

		Критеријуми			
		C_1	C_2	$\dots$	C_n
Критеријуми	C_1	a_{11}	a_{12}	$\dots$	a_{1n}
	C_2	a_{21}	a_{22}	$\dots$	a_{2n}
	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$	$\dots$
	C_n	a_{n1}	a_{n2}	$\dots$	a_{nn}

Потребно је да матрица буде конзистентна, што значи да треба да испуни услове транзитивности и реципроцитета:

$$a_{ij} = a_{ik} \cdot a_{kj}$$

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (6.2)$$

Тада се матрица поређења може написати на следећи начин:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & 1 & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{1}{a_{1j}} & \cdots & 1 & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \cdots & \cdots & 1 & \cdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \cdots & \frac{1}{a_{in}} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

6.2.4.2 Fuzzy скупови и Fuzzy бројеви

Теорија fuzzy скупова је представљена 1965. године од стране америчког професора Задеха [126] и од тада се користи за решавање различитих проблема у процесу доношења одлука. Постоји и светски научни часопис „*Fuzzy Sets and Systems*“ [117], који се бави применом ове теорије.

У класичној теорији скупова су прецизно дефинисане границе припадности и неприпадности елемената одређеном скупу. У теорији fuzzy скупова ова граница није прецизно дефинисана. Основа која дефинише fuzzy скупове је степен припадности једног елемента x ($x \in X$) скупу A , где његова вредност може бити било која вредност у интервалу између 0 и 1. Сваки fuzzy скуп је дефинисан својом функцијом припадности [126], као скуп уређених парова:

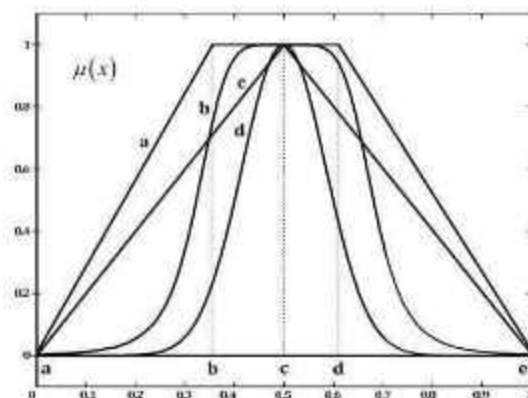
$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X, 0 \leq \mu_A(x) \leq 1\} \quad (6.4)$$

где је:

X – универзални скуп, односно скуп разматрања на основу којих се дефинише fuzzy скуп A

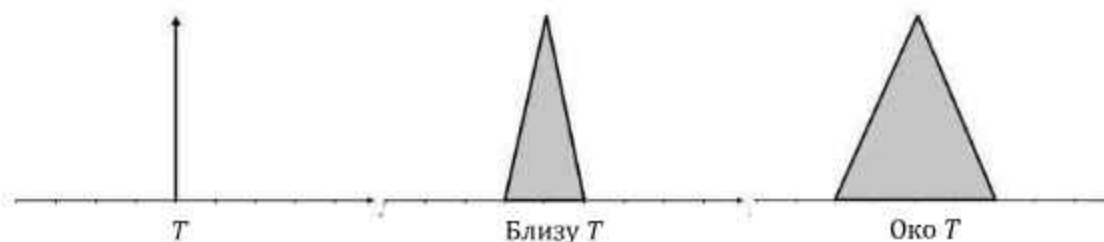
$\mu_A(x)$ – функција припадности елемента x скупу A

Облик функције припадности и ширина интервала поверења су у основи субјективна оцена, односно, бирају се на основу субјективне процене или искуства, тако да најбоље описују проблем који треба решити. Једна од основних карактеристика fuzzy система је fuzzy број. Постоји више врста fuzzy бројева: троугласти, трапезоидни, Гаусов, Белов, итд. Облици одговарајућих функција припадности су приказани на следећој слици.



Слика 6.3. Облици функција припадности: а) трапезоидни б) Белова крива ц) троугласти д) Гаусова крива [125]

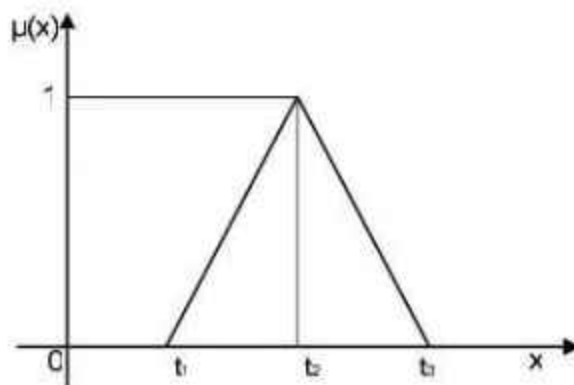
Fuzzy бројеви се користе у ситуацијама када доносилац одлуке пред собом има описне вредности, које се могу различито тумачити, вредности „близу“ или „око“ неке вредности, а *fuzzy* логика омогућава да се ове непрецизне информације користе у многим пољима за решавање различитих практичних проблема.



Слика 6.4. *Fuzzy* број T (прилагођено из [125])

У овој дисертацији ће се користити троугласти *fuzzy* бројеви. Троугласти *fuzzy* број се може представити у облику $T = (t_1, t_2, t_3)$, као што је приказано на слици 6.5. где је:

- t_1 – лева дистрибуција интервала поверења, односно доња граница *fuzzy* броја T
- t_2 – место где функција припадности *fuzzy* броја има вредност 1 (највећи степен припадности)
- t_3 – десна дистрибуција интервала поверења, односно горња граница *fuzzy* броја T



Слика 6.5. Троугласти *fuzzy* број T [123]

Функција припадности *fuzzy* броја T се дефинише на следећи начин:

$$\mu_T(x) = \begin{cases} 0, & x < t_1 \\ \frac{x - t_1}{t_2 - t_1}, & t_1 \leq x < t_2 \\ 1, & x = t_2 \\ \frac{t_3 - x}{t_3 - t_2}, & t_2 < x \leq t_3 \\ 0, & x > t_3 \end{cases} \quad (6.5)$$

6.2.4.3 Фазификација Saaty-јеве скале

Поред примене класичне Saaty-јеве скале, све је већи број радова где се користи фазификација Saaty-јеве скале на различите начине. Фазификација подразумева употребу fuzzy бројева уместо стандардних вредности. Један од начина фазификације је примена fuzzy бројева са унапред дефинисаним интервалом поверења [127]–[133]. Други начин је примена променљивог интервала поверења fuzzy броја, где интервал поверења зависи од степена уверености доносиоца одлуке у своје тврдње и мења своје вредности у различитим случајевима. Степен уверења доносиоца одлуке се може дефинисати на нивоу целе скале (табела 6.5) или за сваку тврдњу (табела 6.6).

Табела 6.5. Фазификована Saaty-јева скала за поређење у паровима помоћу степена уверености дефинисаног на нивоу целе скале [124]

Стандардне вредности	Фазификација
1	(1, 1, 1) ако се поређење врши са самим собом (β , 1, $2-\beta$) у осталим случајевима
3	$(3 \cdot \beta, 3, (2-\beta) \cdot 3)$
5	$(5 \cdot \beta, 5, (2-\beta) \cdot 5)$
7	$(7 \cdot \beta, 7, (2-\beta) \cdot 7)$
9	$(9 \cdot \beta, 9, 9)$
2, 4, 6, 8	$(x \cdot \beta, x, (2-\beta) \cdot x), x = 2, 4, 6, 8$

У овом случају се користи параметар β и он је једнак за сва поређења једног доносиоца одлука.

Табела 6.6. Фазификована Saaty-јева скала за поређење у паровима помоћу степена уверености за сваку тврдњу [123]–[125]

Стандардне вредности	Fuzzy број	Инверзне вредности fuzzy броја
1	(1, 1, 1)	(1, 1, 1)
3	$(3 \cdot \gamma_{ji}, 3, (2 - \gamma_{ji}) \cdot 3)$	$(\frac{1}{(2 - \gamma_{ji}) \cdot 3}, \frac{1}{3}, \frac{1}{3 \cdot \gamma_{ji}})$
5	$(5 \cdot \gamma_{ji}, 5, (2 - \gamma_{ji}) \cdot 5)$	$(\frac{1}{(2 - \gamma_{ji}) \cdot 5}, \frac{1}{5}, \frac{1}{5 \cdot \gamma_{ji}})$
7	$(7 \cdot \gamma_{ji}, 7, (2 - \gamma_{ji}) \cdot 7)$	$(\frac{1}{(2 - \gamma_{ji}) \cdot 7}, \frac{1}{7}, \frac{1}{7 \cdot \gamma_{ji}})$
9	$(9 \cdot \gamma_{ji}, 9, (2 - \gamma_{ji}) \cdot 9)$	$(\frac{1}{(2 - \gamma_{ji}) \cdot 9}, \frac{1}{9}, \frac{1}{9 \cdot \gamma_{ji}})$
2, 4, 6, 8	$(x \cdot \gamma_{ji}, x, (2 - \gamma_{ji}) \cdot x)$ $x = 2, 4, 6, 8$	$(\frac{1}{(2 - \gamma_{ji}) \cdot x}, \frac{1}{x}, \frac{1}{x \cdot \gamma_{ji}})$ $x = 2, 4, 6, 8$

Фазификација Saaty-јеве скале за поређење у паровима помоћу степена уверености за сваку тврдњу је настала на основу претпоставке да доносилац одлуке није подједнако уверен у сваку тврдњу коју износи. За дефинисање нове скале уводи се *степен уверености* доносиоца одлука - експерта γ и он се може различито

дефинисати за свако поређење. Вредност овог степена се креће од 0 до 1, $\gamma \in [0,1]$, $\gamma_{ji} \neq 0$, $\gamma_{ji} = \gamma_{ij}$. Када је вредност $\gamma_{ji} = 1$ то значи да је доносилац одлуке потпуно уверен у одређено поређење парова [123]–[125].

За формирање ове фазификоване *Saaty*-јеве скале користе се троугаони *fuzzy* бројеви, који су претходно већ објашњени. Лева и десна дистрибуција *fuzzy* бројева t_1 и t_3 , односно, доња и горња граница код ове скале имају различите вредности за сваки *fuzzy* број. У случају када је степен уверености $\gamma_{ji} = 1$, а то је максимална вредност, постоји класично поређење из *Saaty*-јеве скале, тј. не постоји *fuzzy* број ($t_1 = t_2 = t_3$).

Вредности леве и десне дистрибуције *fuzzy* бројева t_1 и t_3 се одређују према изразу [123]:

$$T = (t_1, t_2, t_3) = \begin{cases} t_1 = \gamma \cdot t_2, & t_1 \leq t_2, & t_1, t_2 \in \left[\frac{1}{9}, 9\right] \\ t_2 = t_2, & & t_2 \in \left[\frac{1}{9}, 9\right] \\ t_3 = (2 - \gamma) \cdot t_2, & t_3 \leq t_2, & t_2, t_3 \in \left[\frac{1}{9}, 9\right] \end{cases} \quad (6.6)$$

Вредност t_2 заузима максималну вредност функције припадности $t_2 = 1$.

Фазификација подразумева дефинисање *fuzzy* броја T и инверзног *fuzzy* броја T^{-1} , што се ради помоћу следећих израза [123], [124]:

$$T = (t_1, t_2, t_3) = (x \cdot \gamma_{ji}, x, (2 - \gamma_{ji}) \cdot x), \quad x \in [1, 9] \quad (6.7)$$

$$t_1 = x \cdot \gamma_{ji} = \begin{cases} x \cdot \gamma_{ji}, & \forall 1 \leq x \cdot \gamma_{ji} \leq x \\ 1, & \forall x \cdot \gamma_{ji} < 1 \end{cases}$$

$$t_2 = x, \quad \forall x \in [1, 9]$$

$$t_3 = (2 - \gamma_{ji}) \cdot x, \quad \forall x \in [1, 9]$$

$$T^{-1} = \left(\frac{1}{t_3}, \frac{1}{t_2}, \frac{1}{t_1}\right) = \left(\frac{1}{(2 - \gamma_{ji}) \cdot x}, \frac{1}{x}, \frac{1}{\gamma_{ji} \cdot x}\right), \quad x \in \left[\frac{1}{9}, 1\right] \quad (6.8)$$

$$\frac{1}{t_3} = \frac{1}{(2 - \gamma_{ji}) \cdot x} = \begin{cases} \frac{1}{[(2 - \gamma_{ji}) \cdot x]}, & \forall \frac{1}{[(2 - \gamma_{ji}) \cdot x]} < 1 \\ 1, & \forall \frac{1}{[(2 - \gamma_{ji}) \cdot x]} \geq 1 \end{cases}$$

$$\frac{1}{t_2} = \frac{1}{x}, \quad \forall \frac{1}{x} \in \left[\frac{1}{9}, 1\right]$$

$$\frac{1}{t_1} = \frac{1}{\gamma_{ji} \cdot x}, \quad \forall \frac{1}{x} \in \left[\frac{1}{9}, 1\right]$$

Када се овај поступак заврши, даље се наставља са стандардним корацима који постоје у АНР методи. Претходно наведена матрица поређења се проширује са степеном уверења доносиоца одлука и добија се модификована матрица:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11}; \gamma_{11} & a_{12}; \gamma_{12} & \dots & a_{1n}; \gamma_{1n} \\ a_{21}; \gamma_{21} & a_{22}; \gamma_{22} & & a_{2n}; \gamma_{2n} \\ & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}; \gamma_{n1} & a_{n2}; \gamma_{n2} & \dots & a_{nn}; \gamma_{nn} \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

6.2.5 Прорачун тежинских коефицијената и нормализација података *fuzzy* матрице парног поређења критеријума

Оцена вредности тежинских коефицијената се може радити на више различитих начина: примена геометријске средње вредности (Buckley, 1985), метода проширене анализе (Chang, 1996) и др. У овој дисертацији је коришћена *геометријска средња вредност* $\tilde{r}_i$ [134].

Fuzzy геометријска средња вредност се рачуна тако што се за сваки критеријум помноже све доње вредности *fuzzy* броја l и степенују реципрочном вредношћу броја критеријума n , односно $1/n$, а затим се понови поступак за све средње вредности m и све горње вредности u . Тако се добијају вредности $\tilde{r}_1, \tilde{r}_2, \dots, \tilde{r}_n$.

$$\tilde{r}_i = \left((l_1 * l_2 * \dots * l_n)^{\frac{1}{n}}, (m_1 * m_2 * \dots * m_n)^{\frac{1}{n}}, (u_1 * u_2 * \dots * u_n)^{\frac{1}{n}} \right) \quad (6.10)$$

Затим треба израчунати *fuzzy* тежинске коефицијенте $\tilde{w}_i$. Овај поступак се обавља помоћу израза:

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i \cdot (\tilde{r}_1 + \tilde{r}_2 + \dots + \tilde{r}_n)^{-1} \quad (6.11)$$

Саберу се добијене *fuzzy* геометријске средње вредности за сваки од критеријума, као и у претходном случају, према принципу сабирања *fuzzy* бројева, све доње вредности *fuzzy* броја l , све средње вредности m и све горње вредности u . Затим се израчуна реципрочна вредност, а на крају се добијена вредност множи са средњом геометријском вредношћу сваког критеријума $\tilde{r}_1, \tilde{r}_2, \dots, \tilde{r}_n$ и добијају се вредности $\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_n$. Ове вредности се узимају према растућем поретку.

Тежински коефицијенти w_i се рачунају као средина области:

$$w_i = \frac{l + m + u}{3} \quad (6.12)$$

Када се израчунају тежински коефицијенти за сваки од критеријума, израчуна се њихов збир. Ако вредност није једнака јединици, приступа се нормализацији. Овај поступак се изводи тако што се сваки тежински коефицијент подели збиром свих коефицијената. Даљи прорачун се наставља са овим добијеним вредностима.

6.2.6 Анализа конзистентности

Да би се извршила анализа конзистентности потребно је урадити поступак дефазификације добијених вредности. Постоји више метода помоћу којих се може обавити овај поступак. Једна од метода за поступак дефазификације се може спровести применом следећих израза [135]:

$$A = \frac{(t_3 - t_1) + (t_2 - t_1)}{3} + t_1 \quad (6.13)$$

$$A = \frac{[\lambda t_3 + t_2 + (1 - \lambda)t_1]}{2} \quad (6.14)$$

где λ представља степен оптимизма [125].

У овој дисертацији је коришћен први израз.

Коефицијент конзистенције се рачуна на следећи начин:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6.15)$$

Где је:

CI - индекс конзистенције

RI - индекс случајне конзистенције

Индекс конзистенције CI се рачуна помоћу израза:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (6.16)$$

Где је:

λ_{max} - највећа карактеристична вредност матрице

n - димензионалност матрице, односно, број критеријума

Вредности индекса случајне конзистенције RI зависе од броја критеријума n и узимају се у обзир само ако је број критеријума 3 или већи од 3. Ове вредности су дате у следећој табели.

Табела 6.7. Индекс случајности [122]

Број критеријума n	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Највећа карактеристична вредност матрице се рачуна помоћу израза:

$$\lambda_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n CV_i}{n}, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6.17)$$

Где је CV_i - вектор конзистенције

Вектор конзистенције се рачуна помоћу израза:

$$CV_i = \frac{Sv_i}{w_i}, i = 1, 2, \dots, n \quad (6.18)$$

Вредност коефицијента конзистенције треба да буде мања од 10%, односно, $CR \leq 0,10$. То показује да је матрица конзистентна. Уколико овај услов није испуњен потребно је поновити поступак поређења парова критеријума.

6.2.7 Прорачун локалних тежинских коефицијената за поткритеријумске функције

Прорачун локалних тежинских коефицијената за поткритеријумске функције се изводи на исти начин као и за главне критеријуме:

- Конструира се *fuzzy* матрица парног поређења поткритеријума i -те критеријумске функције,
- Прорачунавају се локални тежински коефицијенти w_{ij} и по потреби изводи њихова нормализација,
- Проверава се конзистентност добијених вредности локалних тежинских коефицијената поткритеријумских функција.

6.2.8 Прорачун глобалних тежинских коефицијената за поткритеријумске функције

У претходним фазама је израчуната и потврђена конзистентност:

- Релативних тежинских коефицијената критеријумских функција w_i и
- Локалних тежинских коефицијената поткритеријумских функција w_{ij} .

Глобалне тежине се рачунају за поткритеријумске функције тако што се локални тежински коефицијенти поткритеријумске функције множе са тежинским коефицијентима критеријумске функције:

$$W_{ij} = w_i \cdot w_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, k_i \quad (6.19)$$

6.2.9 Избор могућих алтернатива

Пројектом заштите од буке за одређену деоницу пута се дефинишу техничке спецификације које треба да задовољи панел за заштиту од буке. Панели могу бити апсорпциони, рефлексиони и транспарентни. Сваки произвођач из фонда расположивих панела нуди своју оптималну варијанту а инвеститор бира оне панеле који најбоље задовољавају дефинисане критеријуме и који су економски најисплативији.

6.2.10 Конструисање матрице одлучивања

Конструисање матрице одлучивања и рангирање алтернатива по предложеном моделу се изводи помоћу MODIPROM методе која је описана у наставку а која се ослања на групу метода PROMETHEE.

6.2.10.1 PROMETHEE метода

Метода PROMETHEE спада у групу метода вишекритеријумског рангирања. Ову методу је развио *Jean-Pierre Brans* и представио је 1982. године на конференцији коју су организовали *R. Nadeau* и *M. Landry* на Универзитету *Université Laval, Québec, Canada* (*L'Ingénierie de la Décision. Elaboration d'instruments d'Aide à la Décision*). Исте године је ова метода већ примењена у области здравствене заштите [136].

Назив PROMETHEE је скраћеница од *Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluation* [137], [138]. Аутори ове методе су укупно развили VI варијанти ове методе [136], [139]. Прво су развијене PROMETHEE I за парцијално рангирање и PROMETHEE II за потпуно рангирање алтернатива.

Неколико година касније су развијене PROMETHEE III (рангирање на основу интервала) и PROMETHEE IV (непрекидан случај). Исти аутори су 1988. године представили визуелни интерактивни модул GAIA који обезбеђује графички приказ који подржава PROMETHEE методологију. 1992. и 1994. године су предложили још две варијанте ове методе: PROMETHEE V (MCDA укључујући сегментацију ограничења) и PROMETHEE VI (представљање људског мозга) [136]. У литератури има много примера примене PROMETHEE метода и њихових модификација за решавање различитих проблема [140], [141], [150], [142]–[149].

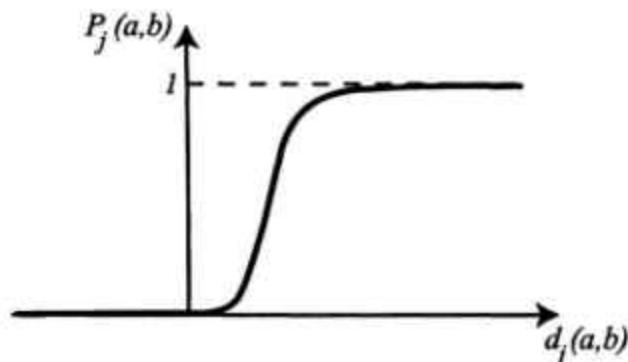
Задатак оптимизације је да омогући избор најбоље варијанте из коначног скупа понуђених варијанти и оптимизација математичке форме се своди на максимизацију критеријумске функције $\max\{f_1(x), \dots, f_n(x)\}$ у датом скупу $x \in A\{a_1, \dots, a_m\}$. Вредности f_{ij} су познате за сваки критеријум f_j за сваку могућу алтернативу A_i [151]:

$$f_{ij} = f_j(a_{ij}) \quad \forall (i, j); i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n. \quad (6.20)$$

Рангирање m алтернатива $A = \{a_1, \dots, a_i, \dots, a_m\}$ укључује генерализацију концепта n критеријума $f = \{f_1, \dots, f_j, \dots, f_n\}$ [151], [152].

Прво се дефинише почетна матрица. Након тога, сваком критеријуму се додељује једна преференцијална вредност $P_j(a, b)$ која чини основу за поређење две алтернативе a и b . На основу функција преференција, које су бесконачне, бира се тип генерализоване критеријумске функције чија је вредност између 0 и 1 и та вредност је [151], [152]:

$$P_j(a, b) = \begin{cases} 0, & \text{ако } f(a) \leq f(b) \\ P_j[f(a) - f(b)] = P_j[d(a, b)], & \text{ако } f(a) > f(b) \end{cases} \quad (6.21)$$



Слика 6.6. Функција преференције [136]

За критеријуме који захтевају минимизацију, функцију преференције треба окренути у другом смеру и приказати је изразом:

$$P_j(a, b) = P_j[-d(a, b)] \quad (6.22)$$

Постоји шест типова генерализованих критеријума функције преференције: I (Обичан критеријум), II (Квази критеријум), III (Критеријум са линеарном преференцијом), IV (Степенасти критеријум), V (Критеријум са линеарном преференцијом и облашћу индиферентности) и VI (Гаусов критеријум). У сваком случају треба да се одреди 0, 1 или 2 параметра, који су:

q - граница индиферентности;

p - граница строге преферентности;

σ - стандардна девијација Нормалне расподеле.

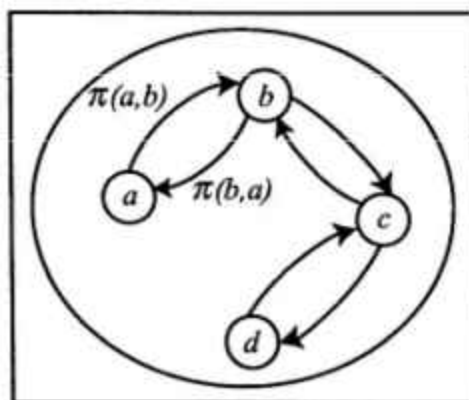
Сваком критеријуму се додељује одређена тежина $w_j, j = 1, \dots, n$, као мера релативне важности датог критеријума, па је:

$$\sum_{j=1}^k w_j = 1, 0 < w_j < 1 \quad (6.23)$$

Индекс вишекритеријумске преференције се одређује у складу са изразом [151], [152]:

$$\Pi(a, b) = \frac{\sum_{j=1}^n w_j \cdot P_j(a, b)}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (6.24)$$

Овај индекс представља меру преференције алтернативе a у односу на алтернативу b . Што је ова вредност ближа јединици, то значи да је преференција већа и узима у обзир све критеријуме у исто време. На тај начин се добија оријентисан график рангирања који чини основу за рангирање према PROMETHEE методама, и он садржи два лука између сваког пара алтернатива a и b , $\Pi(a, b)$ и $\Pi(b, a)$ (слика 1.6).



Слика 6.7. График рангирања [136]

За сваку алтернативу треба дефинисати позитивне, негативне и средње вредности тока [151], [152]:

$$\begin{aligned} \phi^+(a) &= \sum_{b \in A} \Pi(a, b) \\ \phi^-(a) &= \sum_{b \in A} \Pi(b, a) \end{aligned} \quad (6.25)$$

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a)$$

Алтернатива је боља ако позитивни ток има вишу вредност, а негативни ток мању [153].

У складу са PROMETHEE I, која даје парцијални поредак алтернатива, ако је $\phi^-(a) \geq \phi^+(b)$ и $\phi^+(a) \leq \phi^+(b)$, онда алтернатива a има виши ранг од алтернативе b .

Приликом поређења две алтернативе једнакост ϕ^- и ϕ^+ показује индиферентност, а каже се да су алтернативе a и b неупоредиве ако [136], [151], [152]:

$$\phi^-(a) > \phi^-(b) \text{ и } \phi^+(a) > \phi^+(b) \text{ или}$$

$$\phi^-(a) < \phi^-(b) \text{ и } \phi^+(a) < \phi^+(b) \quad (6.26)$$

У складу са PROMETHEE II, средње вредности тока, односно, разлике између токова показују приоритет сваке алтернативе у односу на остале и дају потпуни поредак алтернатива [136], [151], [152]:

Ако је $\phi(a) > \phi(b)$ алтернатива a има виши ранг од алтернативе b

Ако је $\phi(a) = \phi(b)$ алтернатива a је индиферентна према алтернативи b

У складу са PROMETHEE III, која даје интервални поредак алтернатива, рангирање се врши додељивањем интервала $[x_a, y_a]$ свакој алтернативи уз примену следећих дефиниција [151], [152]:

Ако је $x_a > x_b$ алтернатива a има виши ранг од алтернативе b

Ако је $x_a \leq y_b$ и $x_b \leq y_a$ алтернатива a је индиферентна према алтернативи b

Где је:

$$x_a = \underline{\phi}(a) - \alpha \cdot \sigma_a$$

$$y_a = \underline{\phi}(a) + \alpha \cdot \sigma_a$$

$$\underline{\phi}(a) = \frac{1}{m} \cdot \sum_{b \in A} (\prod(a, b) - \prod(b, a)) = \frac{1}{m} \cdot \phi(a)$$

$$\sigma_a = \sqrt{\frac{1}{m} \cdot \sum_{b \in A} (\prod(a, b) - \prod(b, a) - \underline{\phi}(a))^2}$$

$$\alpha > 0 \quad (6.27)$$

6.2.10.2 MODIPROM метода

MODIPROM метода представља побољшање методе PROMETHEE. Ова побољшања су следећа: промене генерализованих критеријума, избор генерализованих

критеријума, анализа утицаја промене тежинских коефицијената и трансформација средњих вредности чистог тока [151], [154], [155].

Генерализовани критеријуми су промењени тако што су критеријуми I (Обичан критеријум), II (Квази критеријум), IV (Степенасти критеријум) и VI (Гаусов критеријум) остали исти, а промењени су критеријуми III (Критеријум са линеарном преферентношћу) и V (Критеријум са линеарном преферентношћу и облашћу индиферентности). Ови критеријуми су замењени Линеарним критеријумом чији се параметри израчунавају преко линеарне регресије. Уведени су „Квадратни критеријум“ и „Кубни критеријум“ чији се параметри, такође, израчунавају регресионом анализом [151], [154], [155].

Усвојени генерализовани критеријуми су приказани у табели 6.8 са параметрима:

q - граница индиферентности

p - граница строге преферентности

σ - стандардна девијација Нормалне расподеле

b_0, b_1, b_2, b_3 - коефицијенти регресионе линије

Избор генерализованих критеријума не зависи од субјективне оцене доносиоца одлуке, већ се изводи помоћу „Метода најмањих квадрата“. Бира се критеријум код кога је збир квадрата одступања теоријске криве генерализованог критеријума од тачака на графу функције преференције које представљају вредности преференције $P_j(a, b)$ за диференције $d_j(a, b)$ сваког пара алтернатива „a“ и „b“, најмањи [154], [155].

За све вредности $(d_{ik})_j$ којих највише може бити $\frac{m(m-1)}{2}$, у нормализованом координатном систему $\{(d_{ik})_j, P_{jik}[(d_{ik})_j]\}$ израчунавају се вредности грешке апроксимације [154], [155].

$$\varepsilon_l = [p_j(x_{jl}) - y_{jl}] \quad (6.28)$$

Где је:

ε_l - грешка апроксимације емпиријске вредности y_{jl} вредношћу функције $p_l(x_{jl})$ за l -ти емпиријски податак

$p_j(x_{jl})$ - вредност теоријске функције за l -ти емпиријски податак

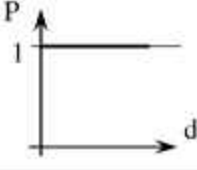
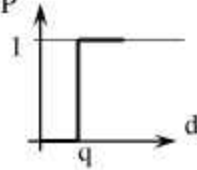
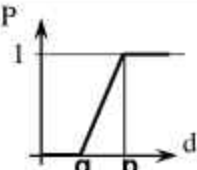
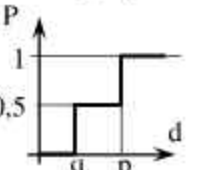
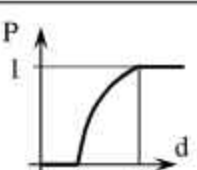
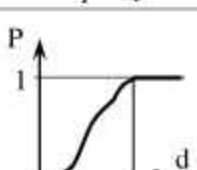
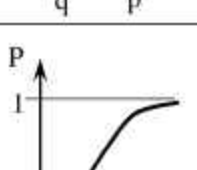
y_{jl} - вредност емпиријске преферентне функције за l -ти податак

l - комбинација алтернатива a_i и a_k за које је $(d_{ik})_j = f_j(a_i) - f_j(a_k) > 0$

Од свих генерализованих критеријумских функција за дати скуп тачака $\{(d_{ik})_j, P_{jik}[(d_{ik})_j]\}$ бира се функција која је најбоља, она чија је сума квадрата најмања.

$$S = \sum_{l=1}^S \varepsilon_l^2 = \sum_{l=1}^S [p_j(x_{jl}) - y_{jl}]^2 \quad (6.29)$$

Табела 6.8. Типови генерализованих критеријума [154], [155]

ТИП ГЕНЕРАЛИЗОВАНОГ КРИТЕРИЈУМА			Параметри	$P_j(x)$
Тип	Назив	Изглед		
I	Обичан критеријум		-	$P_j(x) = 1$
II	Квази критеријум		q	$P_j(x) = \begin{cases} 0, & d < q \\ 1, & d \geq q \end{cases}$
III	Критеријум са линеарном преферентно шћу		q, p b_0 , b_1	$P_j(x) = \begin{cases} 0, & d < q \\ b_0 + b_1 x, & q \leq d < p \\ 1, & d \geq p \end{cases}$
IV	Степенести критеријум		q, p	$P_j(x) = \begin{cases} 0, & d < q \\ 0.5, & q \leq d < p \\ 1, & d \geq p \end{cases}$
V	Квадратни критеријум		q, p b_0 , b_1 , b_2	$P_j(x) = \begin{cases} 0, & d < q \\ b_0 + b_1 x + b_2 x^2, & q \leq d < p \\ 1, & d \geq p \end{cases}$
VI	Кубни критеријум		q, p b_0 , b_1 , b_2 , b_3	$P_j(x) = \begin{cases} 0, & d < q \\ b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + b_3 x^3, & q \leq d < p \\ 1, & d \geq p \end{cases}$
VII	Гаусов критеријум		σ	$P_j(x) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, & d > 0 \end{cases}$

Избором типа генерализованог критеријума се решава и проблем нормализације критеријумских вредности, јер се преференције по појединачним критеријумима налазе у интервалу $[0,1]$. Овде постоји могућност анализе утицаја промене тежинских коефицијената на коначно решење. Ако промене тежинских коефицијената немају значајнији утицај на коначно решење разматраног проблема, то значи да је решење „стабилно“. Такође, трансформација средњих вредности чистог тока ϕ даје могућност решавања сложенијих проблема, где постоје и поткритеријумске функције [151], [154], [155].

6.2.11 Рангирање алтернатива

MODIPROM метода се спроводи у неколико корака [151], [152]:

- 1) Дефинисање матрице одлучивања у коју се уносе вредности критеријума за одређене алтернативе.
- 2) Избор функције преференције
- 3) Израчунавање индекса преференције за сваки пар алтернатива
- 4) Израчунавање вредности тока
- 5) Генерисање коначног ранга алтернатива и
- 6) Анализа ефеката промене тежинских коефицијената

Дефинисање матрице одлучивања се изводи на следећи начин:

Ако је вредност f_{ij} сваког разматраног критеријума f_j за сваку од могућих алтернатива a_i :

$$f_{ij} = f_j(a_i) = C_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (6.30)$$

Тада се алтернативе и критеријуми могу представити помоћу матрице:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1j} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2j} & \dots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ C_{i1} & C_{i2} & \dots & C_{ij} & \dots & C_{in} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ C_{m1} & C_{m2} & \dots & C_{mj} & \dots & C_{mn} \end{bmatrix} \quad (6.31)$$

Ако постоје критеријуми са захтевом за минимизацију, потребно је извршити њихову трансформацију у тип критеријума за максимизацију.

$$C'_{ij} = \begin{cases} C_{ij}, & \text{за } K_j \rightarrow \max \\ \max C_{ij} - C_{ij}, & \text{за } K_j \rightarrow \min \end{cases} \quad (6.32)$$

Након тога треба израчунати стандардну девијацију за сваки критеријум K_j , помоћу израза:

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^m (C_{ij} - \bar{C}_j)^2} \quad (6.33)$$

Након дефинисања матрице одлучивања, приступа се следећем кораку, а то је избор функције преференције. Сваком критеријуму за који се упоређују две алтернативе додељује се функција преференције $P_j(a_i, a_k)$. На основу функција преференције, бира се тип генерализоване критеријумске функције која има вредност између 0 и 1. Потребно је да се направе табеле разлика $(d_{ik})_j = f_j(a_i) - f_j(a_k)$ и серија позитивних разлика $(d_{ik})_j > 0$, и затим их рангирати према величини, где је $l = 1, \dots, s$.

$$\begin{bmatrix} \min(d_{ik})_j \\ \vdots \\ \max(d_{ik})_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{j1} \\ \vdots \\ x_{js} \end{bmatrix} \quad (6.34)$$

Праг индиферентности p и праг строге преферентности q се одређују помоћу израза:

$$q_j = \frac{1}{3} d_j \max \quad (6.35)$$

$$p_j = \frac{2}{3} d_j \max \quad (6.36)$$

И формирају емпиријске вредности функције преференције y_{jl} , где је $0 < y_{jl} < 1$ и може се записати у облику:

$$\begin{bmatrix} y_{j1} \\ \vdots \\ y_{jl} \\ \vdots \\ y_{js} \end{bmatrix} \quad (6.37)$$

За све вредности $(d_{ik})_j$ израчунавају се вредности грешке апроксимације ε_l и бира се функција са најмањом сумом квадрата, према обрасцима и поступку који су већ наведени у претходном тексту.

Следећи корак је израчунавање индекса преферентности за сваки пар алтернатива, а то се изводи помоћу следећег израза:

$$\prod(a_i, a_k) = \frac{\sum_{j=1}^n \omega_j \cdot P_j(a_i, a_k)}{\sum_{j=1}^n \omega_j}, j = 1, \dots, n \quad (6.38)$$

Где је сваком критеријуму додељена одређена тежина (тежински коефицијент) ω_j , $j = 1, \dots, n$

У наредном кораку се израчунава вредност тока за сваку алтернативу. Обрасци и поступак анализе су већ наведени у претходном тексту.

Коначно рангирање алтернатива се спроводи у складу са методама PROMETHEE I, II и III, тако што се формира табела парцијалног поретка алтернатива према методи PROMETHEE I, табела потпуног поретка алтернатива према методи PROMETHEE II и табела интервалног поретка алтернатива према методи PROMETHEE III. Упоредном анализом резултата сва три рангирања се бира оптимална варијанта.

6.2.12 Анализа осетљивости

Последњи корак у спровођењу MODIPROM методе је анализа ефеката промене тежинских коефицијената.

При решавању реалних проблема доносилац одлуке најчешће субјективно дефинише значај појединачних критеријума преко тежинских коефицијената који се додељују сваком критеријуму. Да би се елиминисала ова слабост MODIPROM методе, за прорачин тежинских коефицијената, уведена је FAHP метода код које је фазификација *Saty*-јеве скале извршена применом троугластог *fuzzy* броја са променљивим интервалом поверења.

С обзиром на то да тежински коефицијенти могу имати изузетно велики, па чак и одлучујући утицај на коначно решење проблема, остављена је могућност да се спроведе анализа осетљивости пре коначног усвајања најбоље алтернативе. Тиме се смањује утицај субјективне процене доносиоца одлуке.

6.2.13 Избор најбоље алтернативе

Уколико се покаже да промене тежинских коефицијената у анализи осетљивости немају битан утицај на коначни резултат, може се рећи да је одабрано решење стабилно.

ПОГЛАВЉЕ
7

ВЕРИФИКАЦИЈА РАЗВИЈЕНОГ МОДЕЛА

7.1 Верификација модела

Главни задатак верификације модела је да одговори на питање „да ли је модел направљен исправно?“ [156], односно „да провери да ли он садржи све потребне компоненте и да ли ради како је предвиђено“ [157].

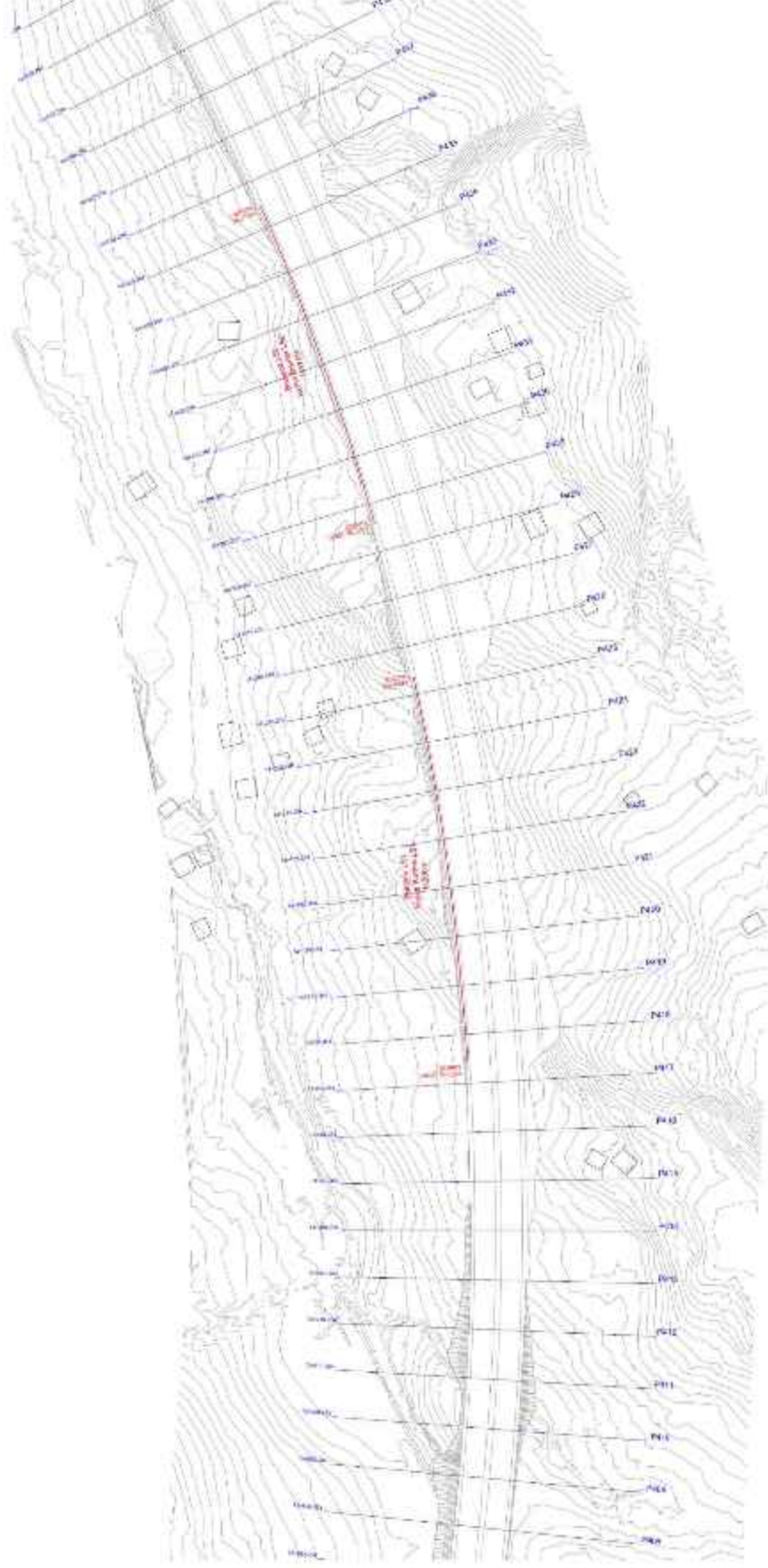
За верификацију развијеног модела је одабран сегмент из пројекта аутопута Медаково-Озимица LOT 2 од km 0-300,00 до km 20+812,26 [158]. Пројекат заштите од буке је реализован у три фазе:

- Фаза 1: Анализа утицаја саобраћаја на загађење околине од буке у оквиру које су истражене потенцијалне мере ублажавања буке на људе који живе и раде у објектима лоцираним у непосредној близини извора буке,
- Фаза 2: Архитектура у којој су архитекти одабрали материјал и визуелно обликовали баријере за заштиту од буке, и
- Фаза 3: Конструкција у којој су конструкциони инжењери испитали статичку носивост, утицај ветра, динамичко оптерећење од чишћења снега и друге утицаје на предложену баријеру.

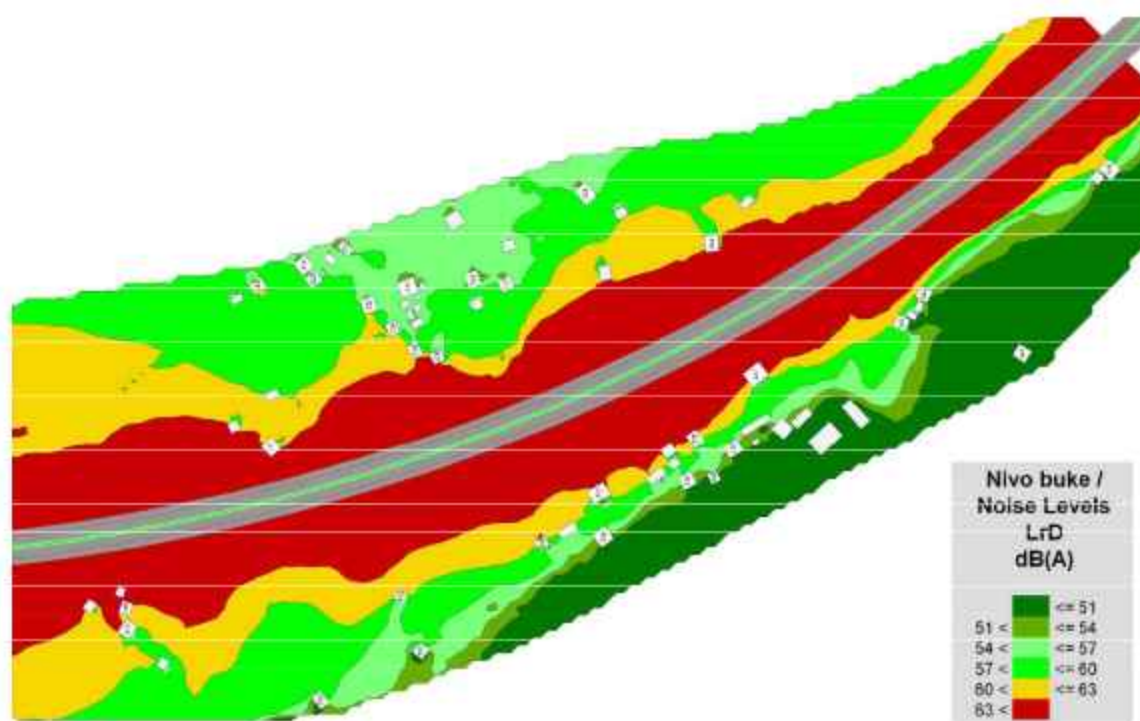
У оквиру прве фазе је анализиран појас ширине 400m (200m лево и 200m десно од осе аутопута) а прорачун је урађен за два сценарија: без мера заштите од буке (референтна вредност нивоа буке) и са препорученим мерама заштите (коначне вредности нивоа буке). Прорачун је урађен у складу са немачким Смерницама за заштиту од буке изазване друмским саобраћајем **RLS-90** (*Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen*) и стандардом **DIN 18005**. За прорачун нивоа буке је коришћен софтверски пакет **SoundPLAN 6.4**, а резултати су приказани табеларно и графички.

Одабрани сегмент аутопута се односи на локалитет СТРУПИНА (km 12+920 до km 14+900). На овом локалитету је предвиђена изградња две баријере са леве стране аутопута L51 дужине 200m и L52 дужине 170m (слика 7.1). На анализираном локалитету, на дужини од 1980m, идентификовано је 40 стамбених објеката од којих је на 23 објекта идентификовано прекорачење обе граничне вредности нивоа буке, и дневна и ноћна.

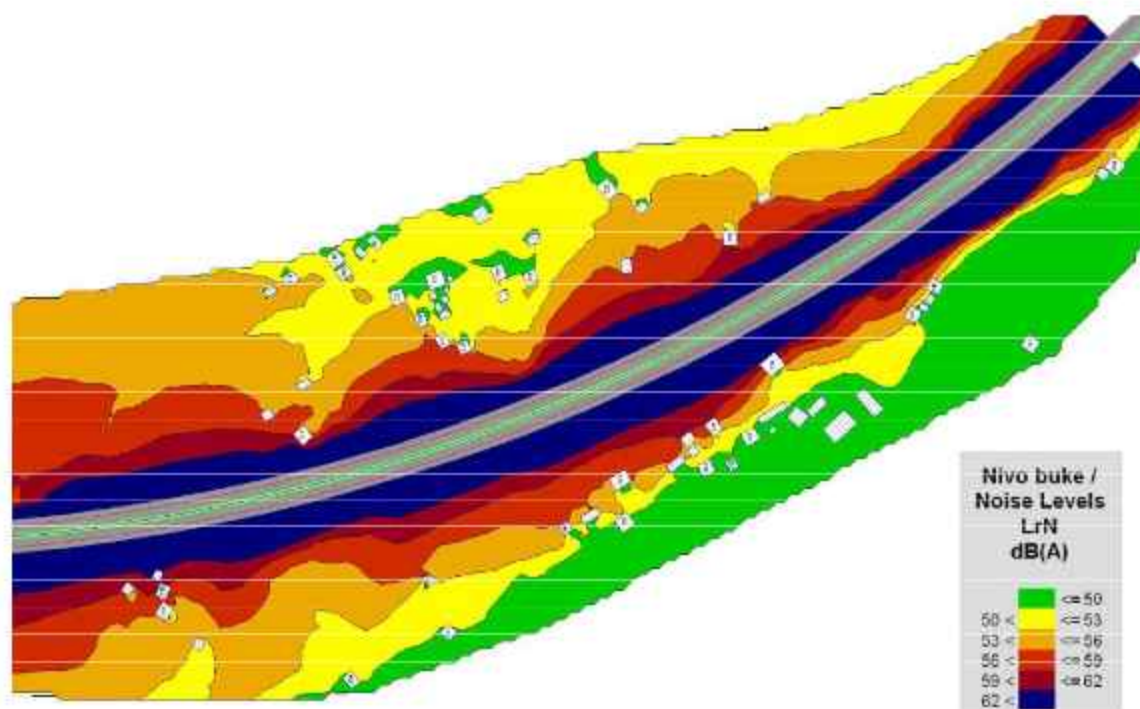
Изглед карата буке је приказан на сликама 7.2 до 7.7.



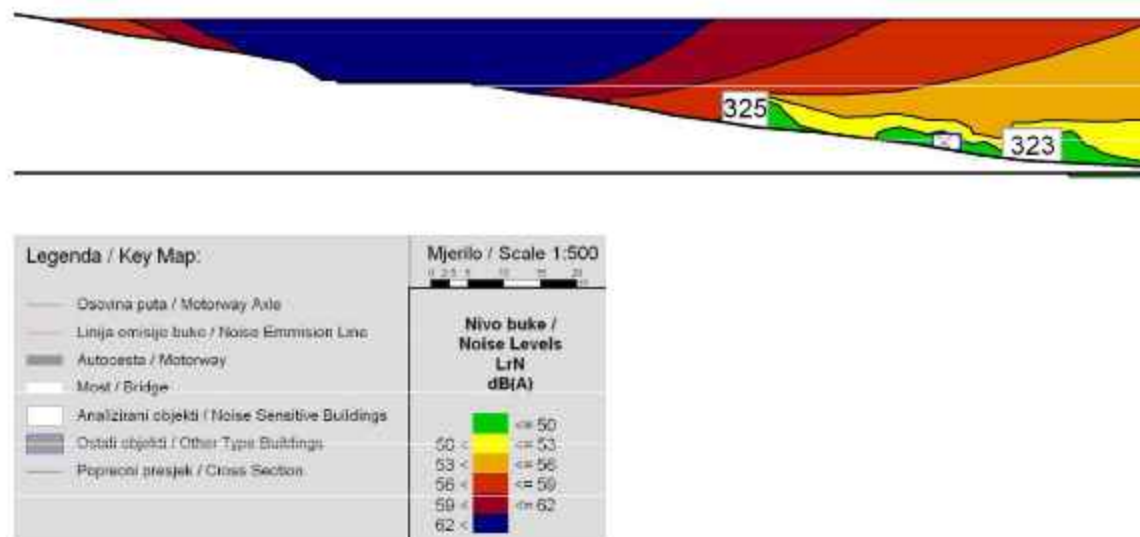
Слика 7.1. Локалитет СТРУПИНА - ситуација аутопута са уцртаним баријерама L51 и L52 [158]



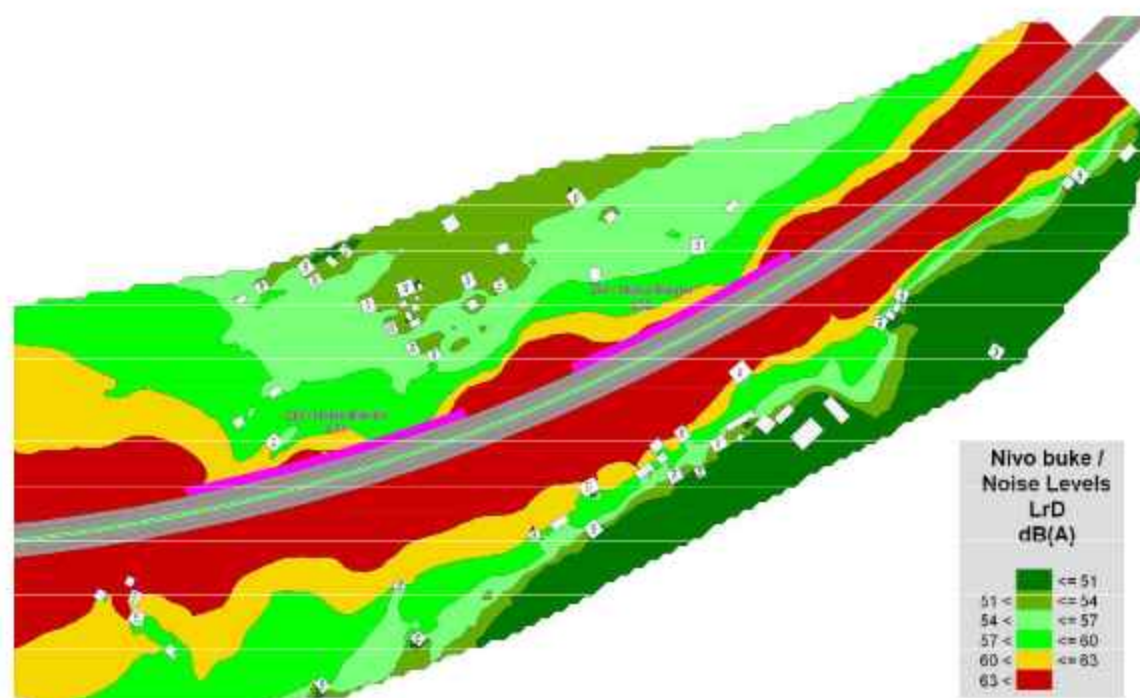
Слика 7.2. Локалитет СТРУПИНА - Карта буке дању, референтно стање [158]



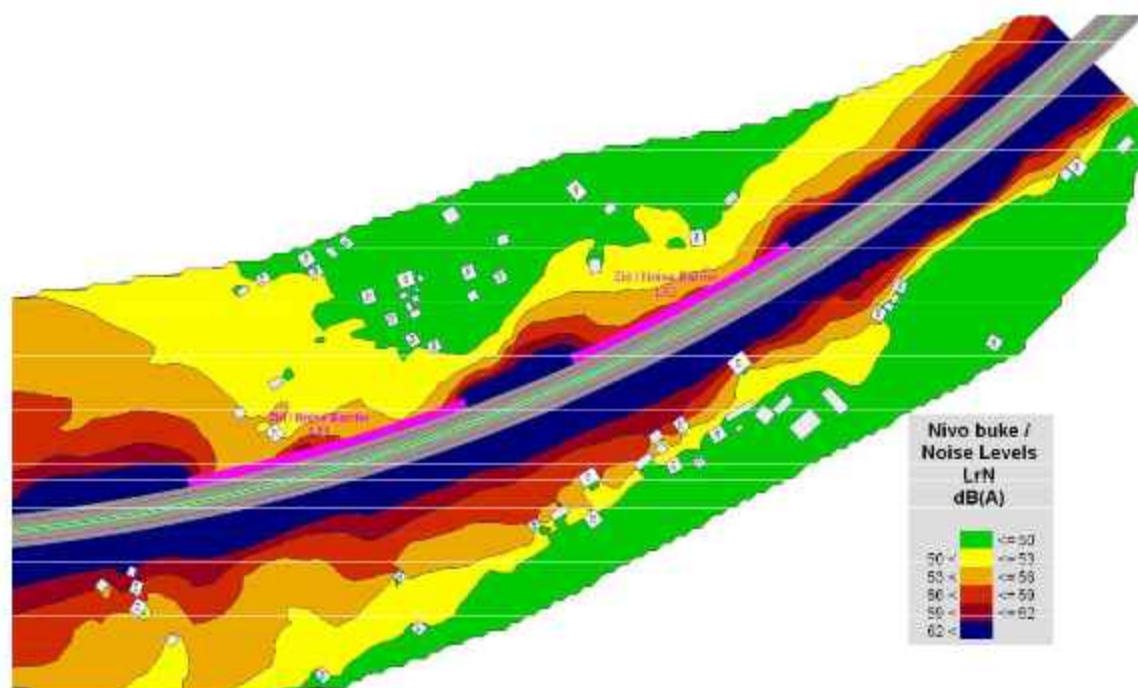
Слика 7.3. Локалитет СТРУПИНА - Карта буке ноћу, референтно стање [158]



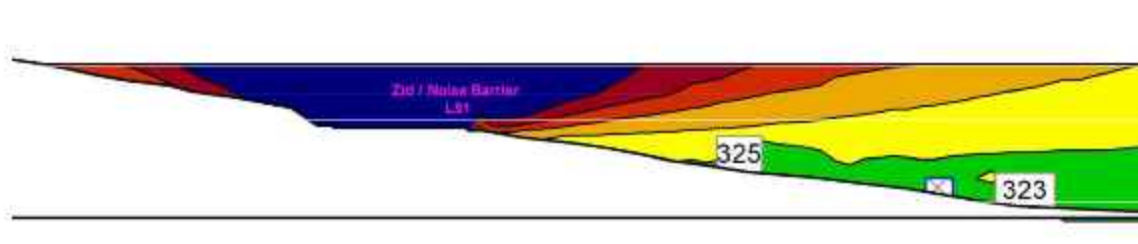
Слика 7.4. Локалитет СТРУПИНА - Карта буке ноћу, референтно стање (попречни пресек) [158]



Слика 7.5. Локалитет СТРУПИНА - Карта буке дању, коначно стање [158]

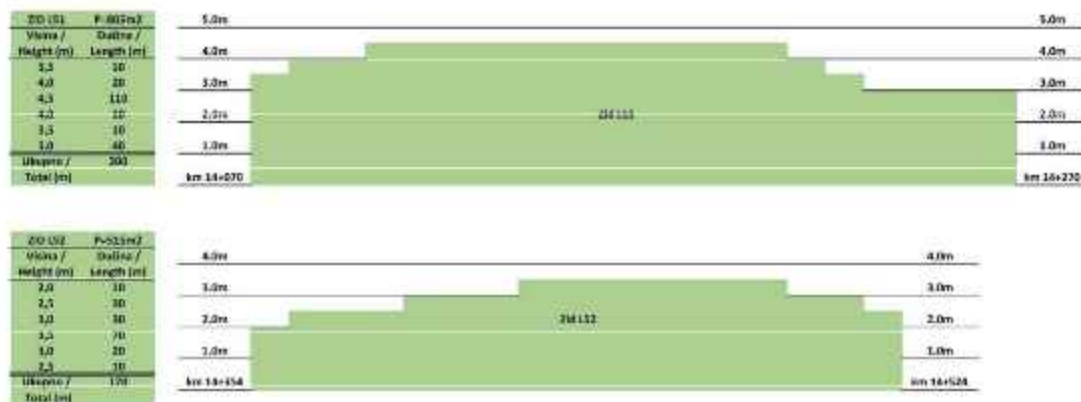


Слика 7.6. Локалитет СТРУПИНА - Карта буке ноћу, коначно стање [158]



Слика 7.7. Локалитет СТРУПИНА - Карта буке ноћу, коначно стање (попречни пресек) [158]

Заштитним баријерама L51 и L52 укупне површине 3280 m² и дужине 580m заштићено је 14 објеката. Шематски приказ акустичких баријера (Зид L51 и Зид L52) је дат на слици 7.8.



Слика 7.8. Шематски приказ акустичке баријере (Зид L51 и Зид L52) [158]

У архитектонској и конструкционој фази је дефинисана конструкција акустичке баријере која је састављена од конструкционих елемената (темељ и носећи стубови) и елемената за заштиту од буке. Статички прорачун конструкционих елемената је урађен у складу са стандардом EN 1794-1 и за постојећу локацију је узет у обзир прорачун утицаја ветра на конструкцију и утицај услед чишћења снега.

Архитектонски део пројекта је дефинисао дизајн и техничко решење баријере на основу [158]:

- општих услова природног окружења,
- специфичних услова терена,
- задовољења потребних стандарда и техничких прописа по питању нивоа звучне изолације и апсорпције, и
- могућности задовољења естетски прихватљивих решења (уклапање у околину, стварање еколошког амбијента, обезбеђење визуелног континуитета и сл.)

За зидове за заштиту од буке су дефинисани техничке спецификације и технологија израде за:

- темељење баријере,
- АБ монтажне префабриковане панеле,
- носиве челичне стубове, и
- панеле за заштиту од буке.

Панели за заштиту од буке треба да буду апсорпциони и треба да задовољавају следеће техничке спецификације [158]:

- Апсорпција звука: Категорија А3 min. 10dB према DIN EN 1793-1
- Изолација звука: Категорија Б3 min. 25dB према DIN EN 1793-2
- Отпорност на ветар и стално оптерећење: min. 1,4kN/m² према DIN EN 1794-1
- Отпорност на динамичко оптерећење од чишћења снега: min. 15kN/m² (2x2m) према DIN EN 1794-1
- Оптерећење на удар камења испуњено према DIN EN 1794-1
- Отпорност на пожар: Класа 1, 2 или 3 према DIN EN 1794-2.

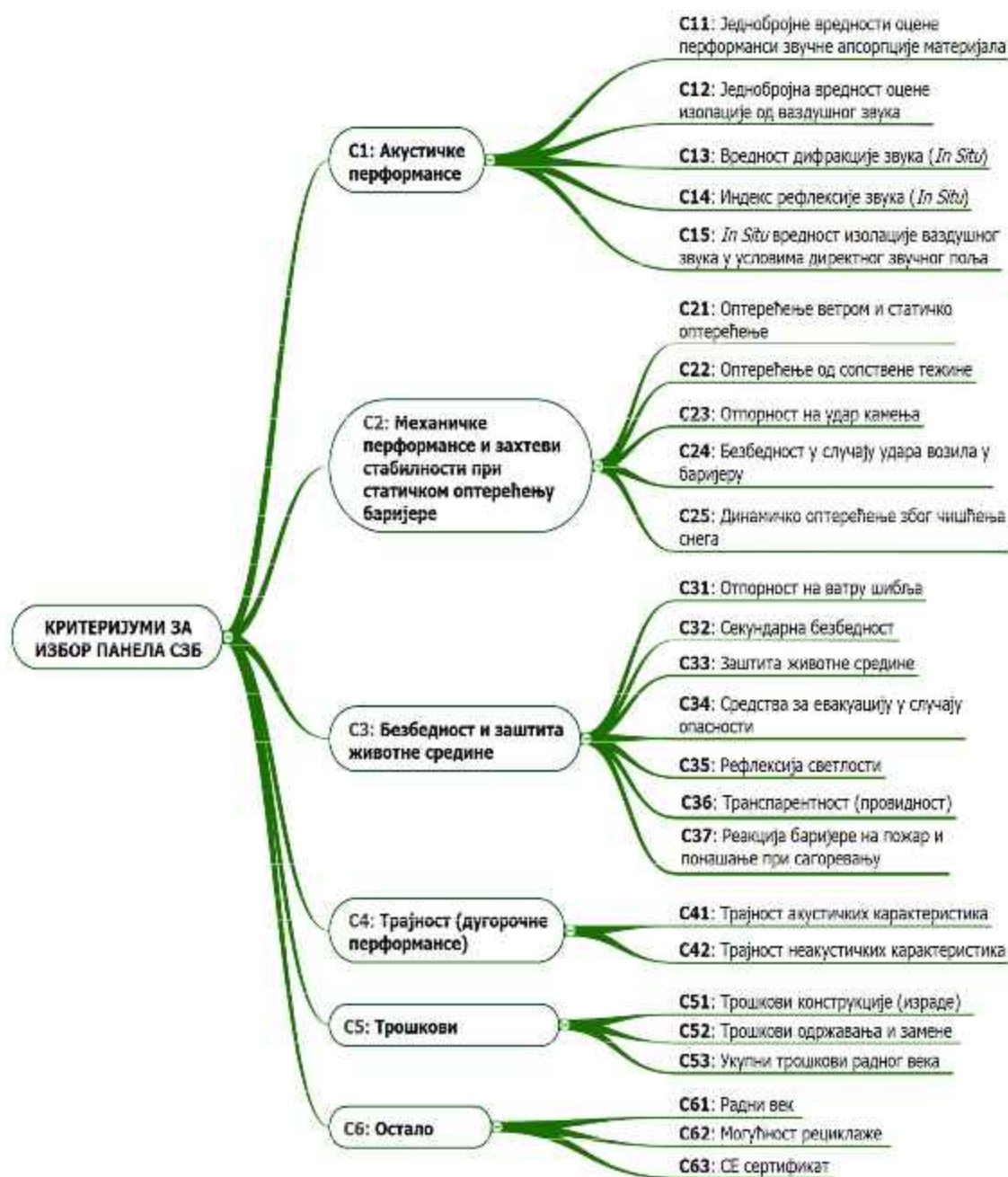
Испуњење техничких услова се доказује достављањем документације у складу са хармонизованим европским стандардом EN 14388:2005.

7.2 Дефинисање проблема и циља одлучивања

За Зид L51 и Зид L52 акустичке баријере на локацији СТРУПИНА је потребно из расположивог фонда апсорпционих панела одабрати панел који најбоље задовољава техничке услове прописане пројектом за одабрану деоницу пута.

7.3 Дефинисање критеријума одлучивања

Други корак у изградњи ГАНР модела лежи у одређивању критеријума који ће се користити. Усвојено је 25 критеријума груписаних у шест категорија. Структура усвојених критеријума и поткритеријума је приказана у на слици 7.9.

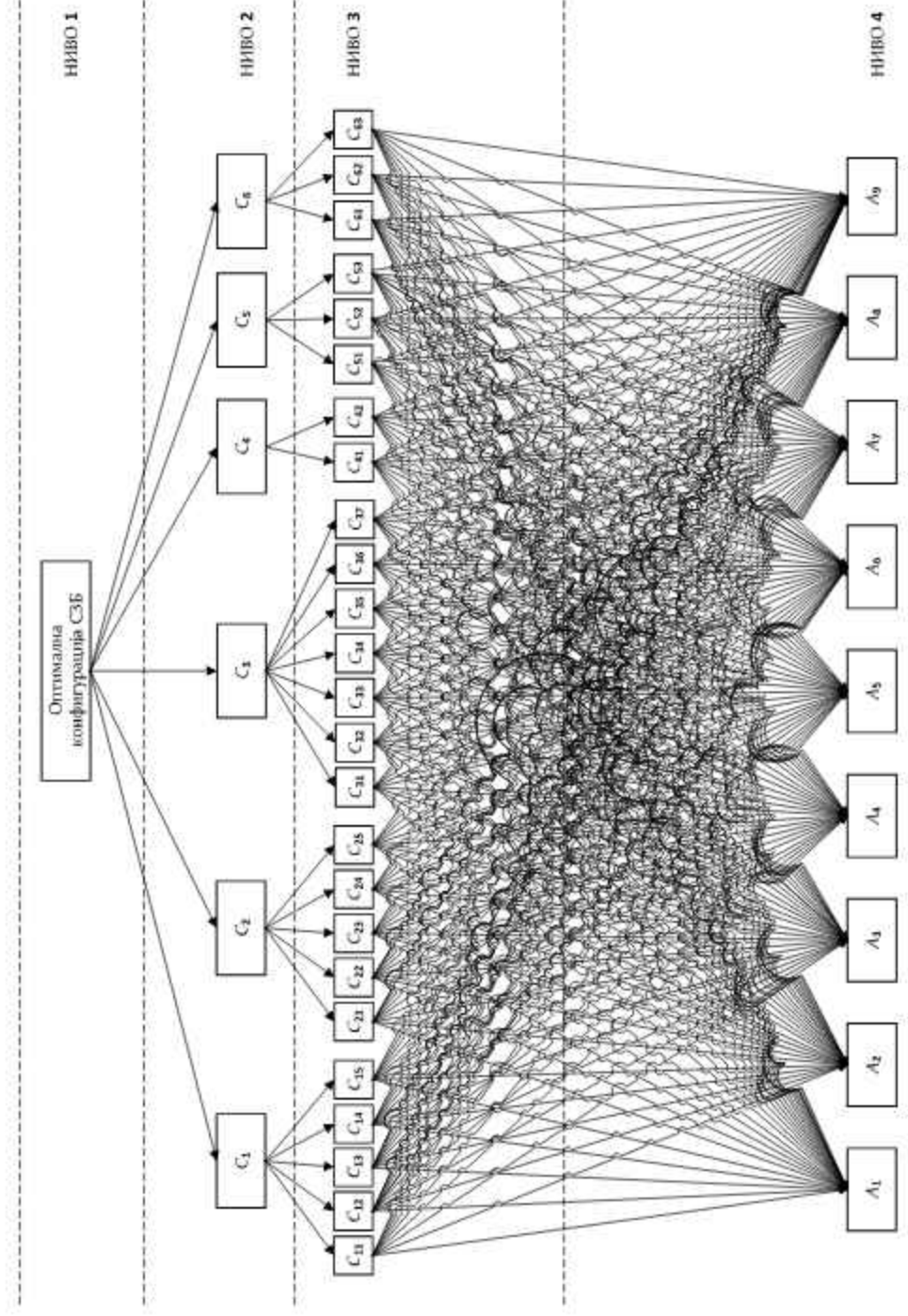


Слика 7.9. Класификација критеријума за избор панела C3B

Скале за квантификацију дефинисаних критеријума су усвојене према табели 6.2.

7.4 Структурирање проблема одлучивања

Према предложеном моделу (поглавље 6) проблем је структуриран на четири хијерархијска нивоа (слика 7.10).



Слика 7.10. Структурирање (декомпозиција) проблема одлучивања

7.5 Прорачун тежинских коефицијената критеријума

За потребе прорачуна тежинских коефицијената развијена је апликација *Fuzzy Analytic Hierarchy Process Excel Spreadsheet* (слика 7.11) заснована на фазификацији Saaty-јеве скале применом fuzzy бројева са променљивим интервалом поверења. У апликацији је могуће дефинисати степен уверености γ у интервалу $[0,1]$ за сваки пар који се пореди чиме се обезбеђује да интервал поверења сваког fuzzy броја буде различит у зависности од степена уверености доносиоца одлуке у тачност поређења сваког пара. Апликација дозвољава поређење десет критеријума.

Fuzzy Analytic Hierarchy Process Excel Spreadsheet

Decision Support System

University of Kragujevac, Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kraljevo
Department of Production Engineering

Version 1.1

Saaty's scale for comparison in pairs

Judgments of the pairwise comparison (presude u uporedivanju parova)

Factor	More important than									Equal	Less important than									Factor
	9	8	7	6	5	4	3	2	1		2	3	4	5	6	7	8	9		
value	9	8	7	6	5	4	3	2	1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8	1/9	value		

If the judgment value is on the right side of 1, we put the reciprocal value
If the judgment value is on the right side of 1, we put the reciprocal value

Number of Criteria **6** $0 < \gamma < 1$

Comparison matrix (Matrica proredjenja kriterijuma)

		Criteria																			
		1		2		3		4		5		6		7		8		9		10	
		C1	γ_1	C2	γ_2	C3	γ_3	C4	γ_4	C5	γ_5	C6	γ_6	C7	γ_7	C8	γ_8	C9	γ_9	C10	γ_{10}
1	C1	1	1	3.00	0.67	4.00	0.75	5.00	0.75	2.00	0.50	9.00	0.70								
2	C2			1	1	2.00	0.50	3.00	0.50	0.50	0.50	4.00	0.67								
3	C3					1	1	2.00	0.55	0.50	0.67	4.00	0.67								
4	C4							1	1	0.33	0.60	2.00	0.50								
5	C5									1	1	5.00	0.67								
6	C6											1	1								
7	C7													1	1						
8	C8															1	1				
9	C9																	1	1		
10	C10																			1	1

Слика 7.11. Апликација *Fuzzy Analytic Hierarchy Process Excel Spreadsheet*

Евалуација почиње одређивањем релативних тежина групе почетних критеријума (слика 7.12.)



Слика 7.12. Почетна група критеријума

Матрица поређења са унетим процењеним вредностима из *Saaty*-јеве скале и степенима уверености γ за сваки пар критеријума је приказана на слици 7.13. а прорачунате вредности *fuzzy* бројева су приказане у табели 7.1.

		Criteria																			
		1		2		3		4		5		6		7		8		9		10	
		C1	γ_1	C2	γ_2	C3	γ_3	C4	γ_4	C5	γ_5	C6	γ_6	C7	γ_7	C8	γ_8	C9	γ_9	C10	γ_{10}
1	C1	1	1	3.00	0.67	4.00	0.75	5.00	0.75	2.00	0.50	9.00	0.70								
2	C2			1	1	2.00	0.50	3.00	0.50	0.50	0.50	4.00	0.67								
3	C3					1	1	2.00	0.55	0.50	0.67	4.00	0.67								
4	C4							1	1	0.33	0.60	2.00	0.50								
5	C5									1	1	5.00	0.67								
6	C6											1	1								
7	C7													1	1						
8	C8															1	1				
9	C9																	1	1		
10	C10																			1	1

Слика 7.13. Процењене вредности и степен уверености γ за сваки пар критеријумаТабела 7.1 *Fuzzy* матрица поређења критеријума са прорачунатим *fuzzy* бројевима

	C1			C2			C3			C4			C5			C6		
C1	1	1	1	2.01	3.00	3.99	3.00	4.00	5.00	3.75	5.00	6.25	1.00	2.00	3.00	6.30	9.00	9.00
C2	0.25	0.33	0.50	1	1	1	1.00	2.00	3.00	1.50	3.00	4.50	0.33	0.50	1.00	2.68	4.00	5.32
C3	0.20	0.25	0.33	0.33	0.50	1.00	1	1	1	1.10	2.00	2.90	0.38	0.50	0.75	2.68	4.00	5.32
C4	0.16	0.20	0.27	0.22	0.33	0.67	0.34	0.50	0.91	1	1	1	0.24	0.33	0.56	1.00	2.00	3.00
C5	0.33	0.50	1.00	1.00	2.00	3.00	1.34	2.00	2.66	1.80	3.00	4.20	1	1	1	3.35	5.00	6.65
C6	0.11	0.11	0.16	0.19	0.25	0.37	0.19	0.25	0.37	0.33	0.50	1.00	0.15	0.20	0.30	1	1	1

Израчунате вредности релативних тежина за групу критеријума су приказане на слици 7.14. а прорачун коефицијента конзистенције у табели 7.2.



Слика 7.14. Приказ важности критеријума у моделу

Табела 7.2 Анализа конзистентности

Ci	Wi	Svi	C.M.
C1	0.382	2.4736	6.467
C2	0.164	1.0476	6.390
C3	0.116	0.7423	6.407
C4	0.072	0.4514	6.284
C5	0.226	1.4354	6.359
C6	0.040	0.2571	6.401
SUM	1.000	$\lambda_{max}=$	6.385
		CI=	0.077
		RI=	1.236
		C.R=	0.062

Највећа карактеристична вредност матрице износи $\lambda_{max}=6,358$, вредност индекса конзистенције је $CI=0,077$, индекса случајне конзистенције $RI=1,236$ а коефицијент конзистенције је $CR=0,062$. То значи да је неконзистентност процене 6,2% те се прорачунате вредности релативних тежина критеријума могу сматрати прихватљивим јер је испуњен услов да је $CR \leq 0,10$.

7.6 Прорачун локалних тежинских коефицијената за поткритеријумске функције

Прорачун локалних тежинских коефицијената за поткритеријумске функције се спроводи на исти начин као и за главне критеријуме.

Прорачун локалних тежинских коефицијената критеријума C1

Матрица поређења са унетим процењеним вредностима из Saaty-јеве скале и степенима уверености γ за сваки пар поткритеријума у оквиру критеријума C1 (Акустичке перформансе) је приказана у табели 7.3. а прорачунате вредности fuzzy бројева су приказане у табели 7.4.

Добијене вредности тежинских коефицијената и анализа конзистентности су приказани на слици 7.15 и у табели 7.5.



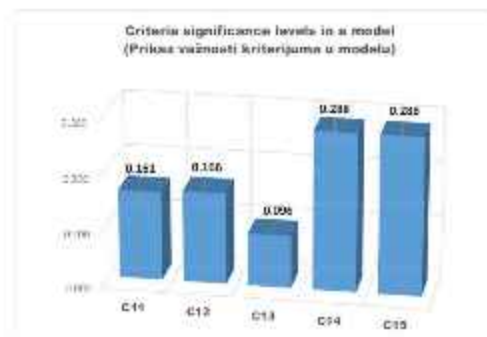
Слика 7.15. Поткритеријумске функције критеријума C1

Табела 7.3 Матрица поређења поткритеријума C1j

	C11	γ_1	C12	γ_2	C13	γ_3	C14	γ_4	C15	γ_5
C11	1	1	1.00	0.67	2.00	0.60	0.50	0.50	0.50	0.67
C12			1	1	2.00	0.30	0.50	0.50	0.50	0.50
C13					1	1	0.33	0.67	0.33	0.67
C14							1	1	1.00	0.67
C15									1	1

Табела 7.4 Fuzzy матрица поређења критеријума C_1 са прорачунатим fuzzy бројевима

	C11			C12			C13			C14			C15		
C11	1	1	1	1.00	1.00	1.00	1.20	2.00	2.80	0.33	0.50	1.00	0.38	0.50	0.75
C12	1.00	1.00	1.00	1	1	1	1.00	2.00	3.00	0.33	0.50	1.00	0.33	0.50	1.00
C13	0.36	0.50	0.83	0.33	0.50	1.00	1	1	1	0.25	0.33	0.49	0.25	0.33	0.49
C14	1.00	2.00	3.00	1.00	2.00	3.00	2.01	3.00	3.99	1	1	1	1.00	1.00	1.00
C15	1.34	2.00	2.66	1.00	2.00	3.00	2.01	3.00	3.99	1.00	1.00	1.00	1	1	1



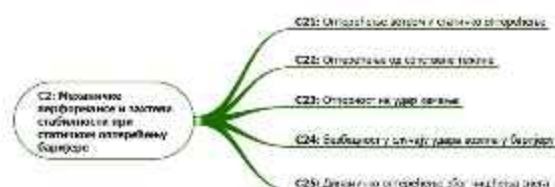
Слика 7.16. Приказ важности критеријума у моделу

Табела 7.5 Анализа конзистентности

Cij	W _i	Sv _i	C.M.
C11	0.161	0.8517	5.275
C12	0.166	0.8720	5.247
C13	0.096	0.4964	5.167
C14	0.288	1.5198	5.268
C15	0.288	1.5198	5.281
Σ	1.000	λ _{max} =	5.247
		CI=	0.062
		Ri=	1.116
		C.R=	0.055

Прорачун локалних тежинских коефицијената критеријума C_2

Прорачун локалних тежинских коефицијената критеријума C_2 и анализа конзистентности су приказани на сликама 7.17-7.18 и у табелама 7.6.-7.8.

Слика 7.17. Поткритеријумске функције критеријума C_2 Табела 7.6 Матрица поређења поткритеријума C_{2j}

	C21	γ ₁	C22	γ ₂	C23	γ ₃	C24	γ ₄	C25	γ ₅
C21	1	1	3.00	0.67	2.00	0.75	1.00	0.75	2.00	0.60
C22			1	1	0.50	0.50	0.33	0.50	0.50	0.50
C23					1	1	0.50	0.67	1.00	0.67
C24							1	1	2.00	0.60
C25									1	1

Табела 7.7 Fuzzy матрица поређења критеријума C_2 са прорачунатим fuzzy бројевима

	C21			C22			C23			C24			C25		
C21	1	1	1	2.01	3.00	3.99	1.50	2.00	2.50	1.00	1.00	1.00	1.20	2.00	2.80
C22	0.25	0.33	0.50	1	1	1	0.33	0.50	1.00	0.22	0.33	0.67	0.33	0.50	1.00
C23	0.40	0.50	0.67	1.00	2.00	3.00	1	1	1	0.38	0.50	0.75	1.00	1.00	1.00
C24	1.00	1.00	1.00	1.50	3.00	4.50	1.34	2.00	2.66	1	1	1	1.20	2.00	2.80
C25	0.36	0.50	0.83	1.00	2.00	3.00	1.00	1.00	1.00	0.36	0.50	0.83	1	1	1



Слика 7.18. Приказ важности критеријума у моделу

Табела 7.8 Анализа конзистентности

Cij	W _i	Sv _i	C.M.
C21	0.290	1.5215	5.255
C22	0.101	0.5188	5.120
C23	0.157	0.8297	5.280
C24	0.290	1.5215	5.240
C25	0.162	0.8482	5.248
SUM	1.000	$\lambda_{\max}=$	5.228
		CI=	0.057
		Ri=	1.1159
		C.R=	0.051

Прорачун локалних тежинских коефицијената критеријума C3

Прорачун локалних тежинских коефицијената критеријума C3 и анализа конзистентности су приказани на сликама 7.19-7.20 и у табелама 7.9.-7.11.



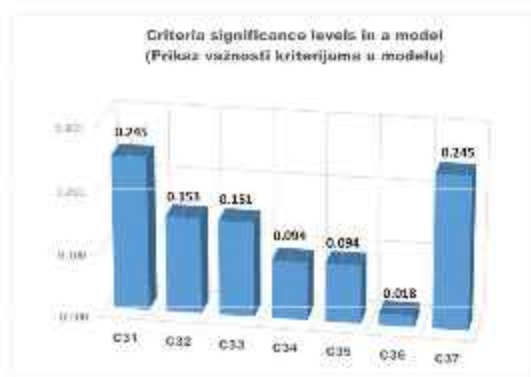
Слика 7.19. Поткритеријумске функције критеријума C3

Табела 7.9 Матрица поређења поткритеријума C_{3j}

	C31	γ_1	C32	γ_2	C33	γ_3	C34	γ_4	C35	γ_5	C36	γ_6	C37	γ_7
C31	1	1	2.00	0.67	2.00	0.75	3.00	0.75	3.00	0.67	9.00	0.83	1.00	1.00
C32			1	1	1.00	0.50	2.00	0.50	2.00	0.50	9.00	0.67	0.50	0.50
C33					1	1	2.00	0.67	2.00	0.67	9.00	0.67	0.50	0.50
C34							1	1	1.00	0.67	9.00	0.80	0.33	0.65
C35									1	1	9.00	0.67	0.33	0.65
C36											1	1	0.11	0.50
C37													1	1

Табела 7.10 Fuzzy матрица поређења критеријума C_{3j} са прорачунатим fuzzy бројевима

	C31			C32			C33			C34			C35			C36			C37		
C31	1	1	1	1.34	2.00	2.66	1.50	2.00	2.50	2.25	3.00	3.75	2.01	3.00	3.99	7.47	9.00	9.00	1.00	1.00	1.00
C32	0.38	0.50	0.75	1	1	1	1.00	1.00	1.00	1.00	2.00	3.00	1.00	2.00	3.00	6.03	9.00	9.00	0.33	0.50	1.00
C33	0.40	0.50	0.67	1.00	1.00	1.00	1	1	1	1.34	2.00	2.66	1.34	2.00	2.66	6.03	9.00	9.00	0.33	0.50	1.00
C34	0.27	0.33	0.44	0.33	0.50	1.00	0.38	0.50	0.75	1	1	1	1.00	1.00	1.00	7.20	9.00	9.00	0.25	0.33	0.51
C35	0.25	0.33	0.50	0.33	0.50	1.00	0.38	0.50	0.75	1.00	1.00	1.00	1	1	1	6.03	9.00	9.00	0.25	0.33	0.51
C36	0.11	0.11	0.13	0.11	0.11	0.17	0.11	0.11	0.17	0.11	0.11	0.14	0.11	0.11	0.17	1	1	1	0.11	0.11	0.17
C37	1.00	1.00	1.00	1.00	2.00	3.00	1.00	2.00	3.00	1.95	3.00	4.05	1.95	3.00	4.05	6.00	9.00	9.00	1	1	1



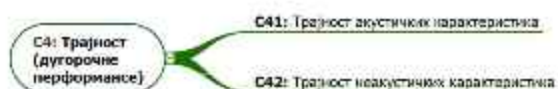
Слика 7.20. Приказ важности критеријума у моделу

Табела 7.11 Анализа конзистентности

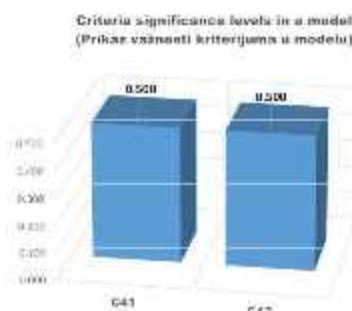
Cij	W _i	Sv _i	C.M.
C31	0.245	1.8163	7.407
C32	0.153	1.1081	7.248
C33	0.151	1.1036	7.286
C34	0.094	0.6914	7.394
C35	0.094	0.6873	7.337
C36	0.018	0.1420	7.729
C37	0.245	1.8073	7.380
SUM	1.000	$\lambda_{max}=$	7.397
		CI=	0.066
		Ri=	1.3322
		C.R=	0.050

Прорачун локалних тежинских коефицијената критеријума C4

Како критеријум C4 има само два поткритеријума (слика 7.21) и како су процењене вредности локалних тежинских коефицијената исте, то није потребно проверавати конзистентност усвојених вредности. Вредности локалних тежинских коефицијената су приказане на слици 7.22.



Слика 7.21. Поткритеријумске функције критеријума C4



Слика 7.22. Приказ важности критеријума у моделу

Прорачун локалних тежинских коефицијената критеријума C5

Прорачун локалних тежинских коефицијената критеријума C5 и анализа конзистентности су приказани на сликама 7.23-7.24 и у табелама 7.12.-7.14.



Слика 7.23. Поткритеријумске функције критеријума C5

Табела 7.12 Матрица поређења поткритеријума C_{5j}

	C51	γ_1	C52	γ_2	C53	γ_3
C51	1	1	1.00	0.67	0.33	0.70
C52			1	1	0.33	0.65
C53					1	1

Табела 7.13 Fuzzy матрица поређења критеријума C_{5j} са прорачунатим fuzzy бројевима

	C51			C52			C53		
C51	1	1	1	1.00	1.00	1.00	0.26	0.33	0.48
C52	1.00	1.00	1.00	1	1	1	0.25	0.33	0.51
C53	2.10	3.00	3.90	1.95	3.00	4.05	1	1	1



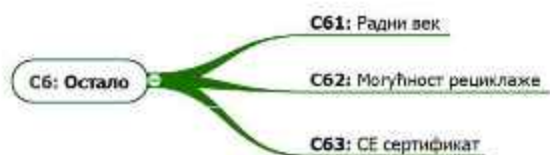
Слика 7.24. Приказ важности критеријума у моделу

Табела 7.14 Анализа конзистентности

Cij	W _i	Sv _i	C.M.
C51	0.201	0.6152	3.064
C52	0.202	0.6206	3.067
C53	0.597	1.8061	3.026
SUM	1.000	$\lambda_{max}=$	3.052
		CI=	0.026
		RI=	0.580
		C.R.=	0.045

Прорачун локалних тежинских коефицијената критеријума C6

Прорачун локалних тежинских коефицијената критеријума C6 и анализа конзистентности су приказани на сликама 7.25-7.26 и у табелама 7.15.-7.17.



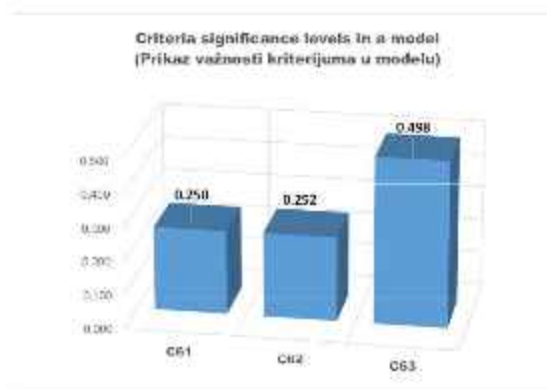
Слика 7.25. Поткритеријумске функције критеријума C6

Табела 7.15 Матрица поређења поткритеријума C_{6j}

	C61	γ_1	C62	γ_2	C63	γ_3
C61	1	1	1.00	0.67	0.50	0.75
C62			1	1	0.50	0.70
C63					1	1

Табела 7.16 Fuzzy матрица поређења критеријума C_{ij} са прорачунатим fuzzy бројевима

	C61			C62			C63		
C61	1	1	1	1.00	1.00	1.00	0.40	0.50	0.67
C62	1.00	1.00	1.00	1	1	1	0.38	0.50	0.71
C63	1.50	2.00	2.50	1.40	2.00	2.60	1	1	1



Слика 7.26. Приказ важности критеријума у моделу

Табела 7.17 Анализа конзистентности

Cij	W _i	Sv _i	C.M.
C61	0.250	0.7622	3.044
C62	0.252	0.7676	3.047
C63	0.498	1.5024	3.019
SUM	1.000	$\lambda_{max}=$	3.037
		CI=	0.018
		RI=	0.579
		C.R=	0.031

7.7 Прорачун глобалних тежинских коефицијената за поткритеријумске функције

Глобалне тежине за поткритеријумске функције се рачунају тако што се локални тежински коефицијенти поткритеријумске функције множе са тежинским коефицијентима критеријумске функције $W_{ij} = w_i w_{ij}$, ($i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, k_i$). Израчунате вредности су приказане у табели 7.18.

Табела 7.18 Прорачун глобалних тежинских коефицијената

CI	w _i	w _{ij}	C _{ij}	W _{ij}
C1	0.382	0.161	K11	0.062
		0.166	K12	0.064
		0.096	K13	0.037
		0.288	K14	0.110
		0.288	K15	0.110
C2	0.164	0.290	K21	0.047
		0.101	K22	0.017
		0.157	K23	0.026
		0.290	K24	0.048
		0.162	K25	0.026
C3	0.116	0.245	K31	0.028
		0.153	K32	0.018
		0.151	K33	0.018
		0.094	K34	0.011
		0.094	K35	0.011
		0.018	K36	0.002
		0.245	K37	0.028

C4	0.072	0.500	K41	0.036
		0.500	K42	0.036
C5	0.226	0.201	K51	0.045
		0.202	K52	0.046
		0.597	K53	0.135
C6	0.040	0.250	K61	0.010
		0.252	K62	0.010
		0.498	K63	0.020
SUM				1

7.8 Избор могућих алтернатива

На основу техничких спецификација које су задате пројектом за Локалитет СТРУПИНА неопходно је одабрати апсорпционе панеле за заштиту од буке.

Компанија *Унипромет д.о.о* -Чачак је регионални лидер за производњу, испоруку и уградњу опреме за заштиту на путевима, панела за заштиту од буке и челичних цеви. Преко 55% производње извози на тржиште 30 земаља – од Немачке, Швајцарске, Италије, земаља региона (Румуније, Бугарске и земаља бивше СФРЈ), преко Русије и Турске до Сенегала и Либије.

Компанија производи све врсте панела за заштиту од буке: рефлектујуће, апсорпционе и транспарентне. Поред панела за заштиту од буке који су развијени у властитом развојном центру, производи и уграђује панеле немачке компаније *KOHLHAUER* (www.kohlhauer.com) која је међу лидерима у Европи по производњи баријера за заштиту од буке.

Панели за заштиту од буке који испуњавају захтеване услове су:

- **A1:** Magnum AC
- **A2:** Magnum AL12
- **A3:** UniCon A
- **A4:** UniCon R
- **A5:** KOHLHAUER ALUMNA
- **A6:** KOHLHAUER LIGNA
- **A7:** KOHLHAUER LIGNA 2
- **A8:** KOHLHAUER ALUFERA
- **A9:** KOHLHAUER PLANTA

И означени су као алтернативе **A1** до **A9**.

7.10 Оцена и рангирање алтернатива

За потребе рангирања алтернатива и избор оптималне варијанте развијена је апликација *Method MODIPROM v. 1.2*. За унос података се користи улазна маска приказана на слици 7.27. Подаци који се уносе су: број алтернатива, број критеријума, вредности критеријумских функција за сваку алтернативу, вредности релативних тежина критеријумских функција и остали подаци о пројекту. Осим тога, за сваку функцију се бира опција оптимизације (*min* или *max*). Апликација дозвољава рангирање 10 алтернатива на основу 25 функција циља.

Method MODIPROM Version 1.2
Decision Support System
University of Kragujevac, Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kragujevac
Department of Production Engineering

Project Title: Замена барјауре
Date: 04.05.2024.
Signature: М. Моторевић

DESCRIPTION:
Избор оптималне варијанте за изградњу новог барјауре

Alternatives: 5
Criteria: 25
 $\alpha = 0.15$

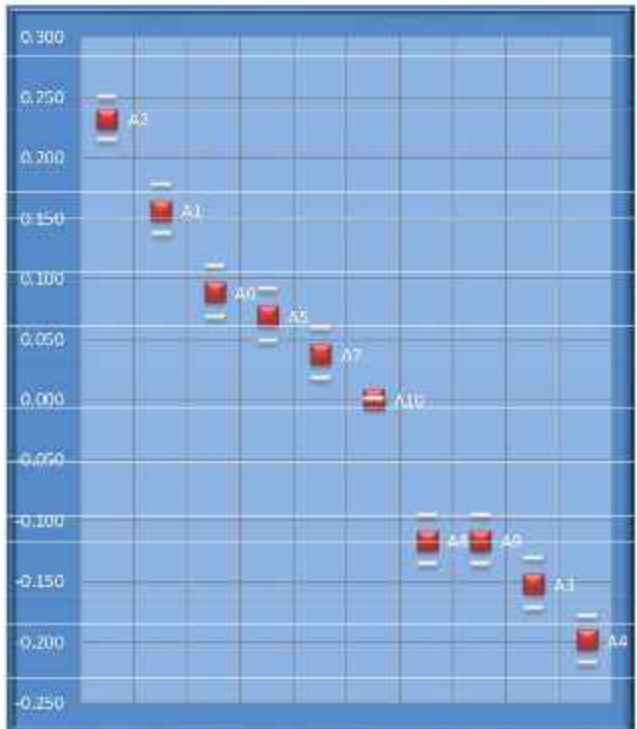
		Alternatives										Weight	min/max
		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	Wj	
Criteria	C1	5	0	4	0	4	4	4	4	4	4	0.0518	max
	C2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	0.0536	max
	C3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0367	max
	C4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1103	max
	C5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1101	max
	C6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.0475	max
	C7	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0.0166	max
	C8	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0.0758	max
	C9	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0.0476	max
	C10	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0.0265	max
	C11	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0.0284	max
	C12	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0.0177	max
	C13	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0.0175	max
	C14	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0.0108	max
	C15	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0.0109	max
	C16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0021	max
	C17	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0.0284	max
	C18	20	20	20	20	20	15	15	15	15	15	0.0359	max
	C19	20	20	20	20	20	15	15	15	15	15	0.0359	max
	C20	100	150	215	215	215	205	205	160	160	160	0.0153	min
	C21	100	100	120	120	120	115	115	150	150	150	0.0457	min
	C22	315	345	515	515	515	360	360	450	450	450	0.1347	min
	C23	25	30	30	30	30	20	20	15	15	15	0.0101	max
	C24	100	100	100	100	100	30	30	100	100	100	0.0101	max
	C25	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0.0700	max

START

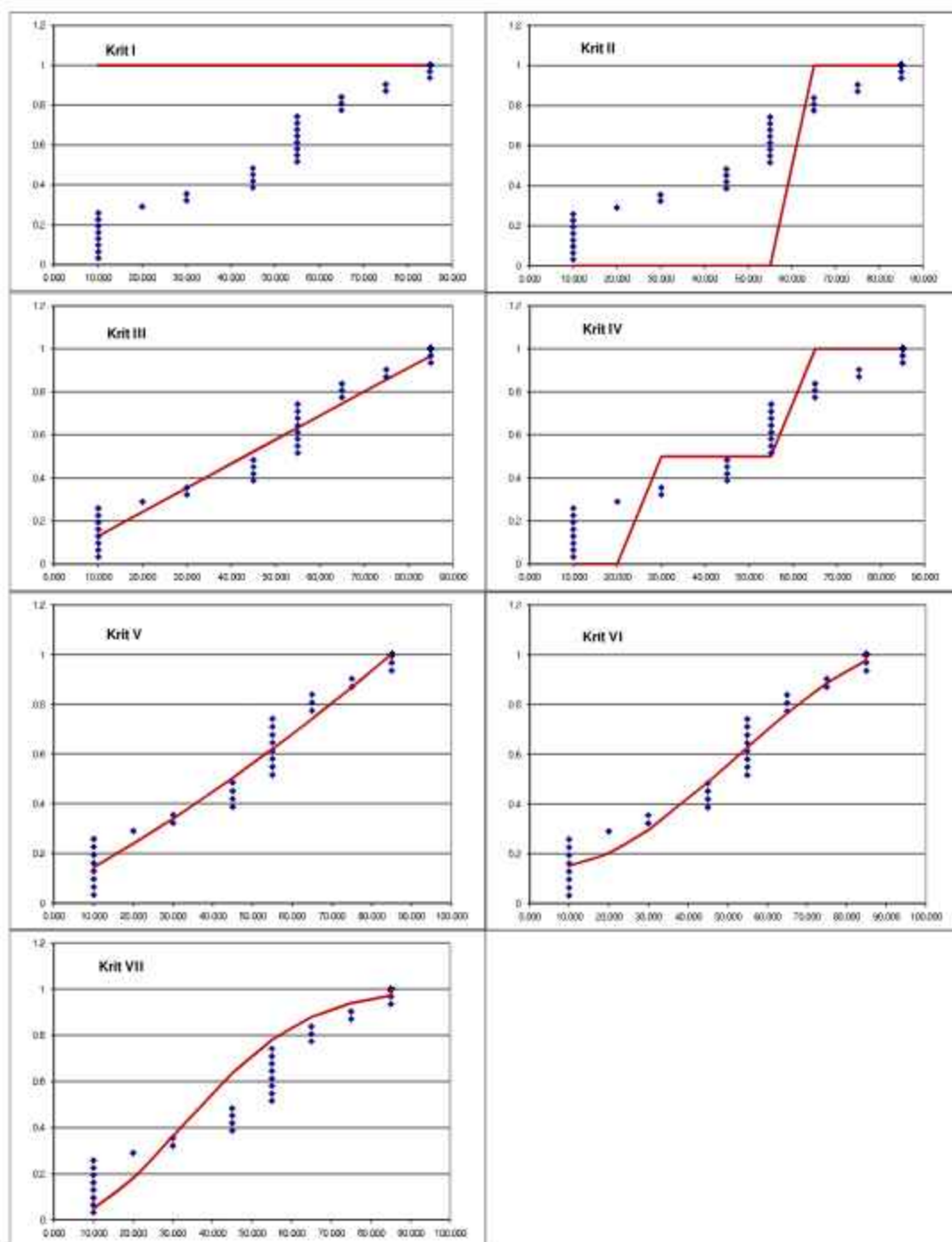
Слика 7.27. Интерфејс програма MODIPROM

Резултати вишекритеријумске анализе се приказују у виду извештаја на коме се даје коначан редослед алтернатива по методама PROMETHEE I, PROMETHEE II и PROMETHEE III и графички приказ интервалног поретка алтернатива (слика 7.28.). Као најбоља алтернатива по све три методе је предложена алтернатива **A2** тј. панел **Magnum AL12**.

Програм MODIPROM омогућује да се за сваку критеријумску функцију виде облици генерализованих критеријумских функција и њихов положај у односу на диференције $d(a,b)$ за сваки пар алтернатива „a“ и „b“ на графу некритеијалне функције преференције (слика 7.29)

	Method MODIPROM Version 1.2 Decision Support System University of Kragujevac, Faculty of Mechanical and Civil Engineering in Kraljevo Department of Production Engineering	 ФМГ КРАЉЕВО УНИВЕРЗИТЕТ У КРАГУЈЕВЦУ																																																																		
Назив пројекта: Баријере Опис: Избор оптималног панела за саобраћајну заштитну баријеру																																																																				
РАНГИРАЊЕ АЛТЕРНАТИВА																																																																				
PROMETHEE I <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><th>Ранг</th><th></th></tr> <tr><td>8</td><td>A2</td></tr> <tr><td>7</td><td>A1</td></tr> <tr><td>6</td><td>A6</td></tr> <tr><td>5</td><td>A5</td></tr> <tr><td>4</td><td>A7</td></tr> <tr><td>2</td><td>A8</td></tr> <tr><td>2</td><td>A9</td></tr> <tr><td>1</td><td>A3</td></tr> <tr><td>0</td><td>A4</td></tr> <tr><td>0</td><td>A10</td></tr> </table>	Ранг		8	A2	7	A1	6	A6	5	A5	4	A7	2	A8	2	A9	1	A3	0	A4	0	A10	PROMETHEE II <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><th>Ранг</th><th></th></tr> <tr><td>8</td><td>A2</td></tr> <tr><td>7</td><td>A1</td></tr> <tr><td>6</td><td>A6</td></tr> <tr><td>5</td><td>A5</td></tr> <tr><td>4</td><td>A7</td></tr> <tr><td>2</td><td>A8</td></tr> <tr><td>2</td><td>A9</td></tr> <tr><td>1</td><td>A3</td></tr> <tr><td>0</td><td>A4</td></tr> <tr><td>0</td><td>A10</td></tr> </table>	Ранг		8	A2	7	A1	6	A6	5	A5	4	A7	2	A8	2	A9	1	A3	0	A4	0	A10	PROMETHEE III <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><th>Ранг</th><th></th></tr> <tr><td>8</td><td>A2</td></tr> <tr><td>7</td><td>A1</td></tr> <tr><td>5</td><td>A6</td></tr> <tr><td>4</td><td>A5</td></tr> <tr><td>4</td><td>A7</td></tr> <tr><td>1</td><td>A3</td></tr> <tr><td>1</td><td>A8</td></tr> <tr><td>1</td><td>A9</td></tr> <tr><td>0</td><td>A4</td></tr> <tr><td>0</td><td>A10</td></tr> </table>	Ранг		8	A2	7	A1	5	A6	4	A5	4	A7	1	A3	1	A8	1	A9	0	A4	0	A10
Ранг																																																																				
8	A2																																																																			
7	A1																																																																			
6	A6																																																																			
5	A5																																																																			
4	A7																																																																			
2	A8																																																																			
2	A9																																																																			
1	A3																																																																			
0	A4																																																																			
0	A10																																																																			
Ранг																																																																				
8	A2																																																																			
7	A1																																																																			
6	A6																																																																			
5	A5																																																																			
4	A7																																																																			
2	A8																																																																			
2	A9																																																																			
1	A3																																																																			
0	A4																																																																			
0	A10																																																																			
Ранг																																																																				
8	A2																																																																			
7	A1																																																																			
5	A6																																																																			
4	A5																																																																			
4	A7																																																																			
1	A3																																																																			
1	A8																																																																			
1	A9																																																																			
0	A4																																																																			
0	A10																																																																			
Бр. Алтернатива: 9 Бр. Критеријума: 25 $\alpha =$ 0.15																																																																				
		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><th colspan="2">Подаци за даљу анализу</th></tr> <tr><th>Ai</th><th>Cij</th></tr> <tr><td>1</td><td>A1</td><td>0.82442</td></tr> <tr><td>2</td><td>A2</td><td>1.00000</td></tr> <tr><td>3</td><td>A3</td><td>0.10718</td></tr> <tr><td>4</td><td>A4</td><td>0.00000</td></tr> <tr><td>5</td><td>A5</td><td>0.62168</td></tr> <tr><td>6</td><td>A6</td><td>0.66668</td></tr> <tr><td>7</td><td>A7</td><td>0.54872</td></tr> <tr><td>8</td><td>A8</td><td>0.19060</td></tr> <tr><td>9</td><td>A9</td><td>0.19060</td></tr> <tr><td>10</td><td>A10</td><td>*</td></tr> </table>	Подаци за даљу анализу		Ai	Cij	1	A1	0.82442	2	A2	1.00000	3	A3	0.10718	4	A4	0.00000	5	A5	0.62168	6	A6	0.66668	7	A7	0.54872	8	A8	0.19060	9	A9	0.19060	10	A10	*																																
Подаци за даљу анализу																																																																				
Ai	Cij																																																																			
1	A1	0.82442																																																																		
2	A2	1.00000																																																																		
3	A3	0.10718																																																																		
4	A4	0.00000																																																																		
5	A5	0.62168																																																																		
6	A6	0.66668																																																																		
7	A7	0.54872																																																																		
8	A8	0.19060																																																																		
9	A9	0.19060																																																																		
10	A10	*																																																																		
Датум: 04.05.2024.	Урадио: М. Коларевић	Напомена:																																																																		

Слика 7.28. Извештај са резултатима вишекритеријумске анализе



Слика 7.29. Облици генерализованих критеријумских функција и њихов положај у односу на диференције $d(a,b)$ за сваки пар алтернатива „a” и „b” (критеријум C20)

7.11 Анализа осетљивости

Програм MODIPROM има могућност спровођења анализе осетљивости. Ефекти утицаја тежинских коефицијената на коначан редослед алтернатива се могу видети на дијаграму „Покретних тежина” (слика 7.30) што знатно олакшава

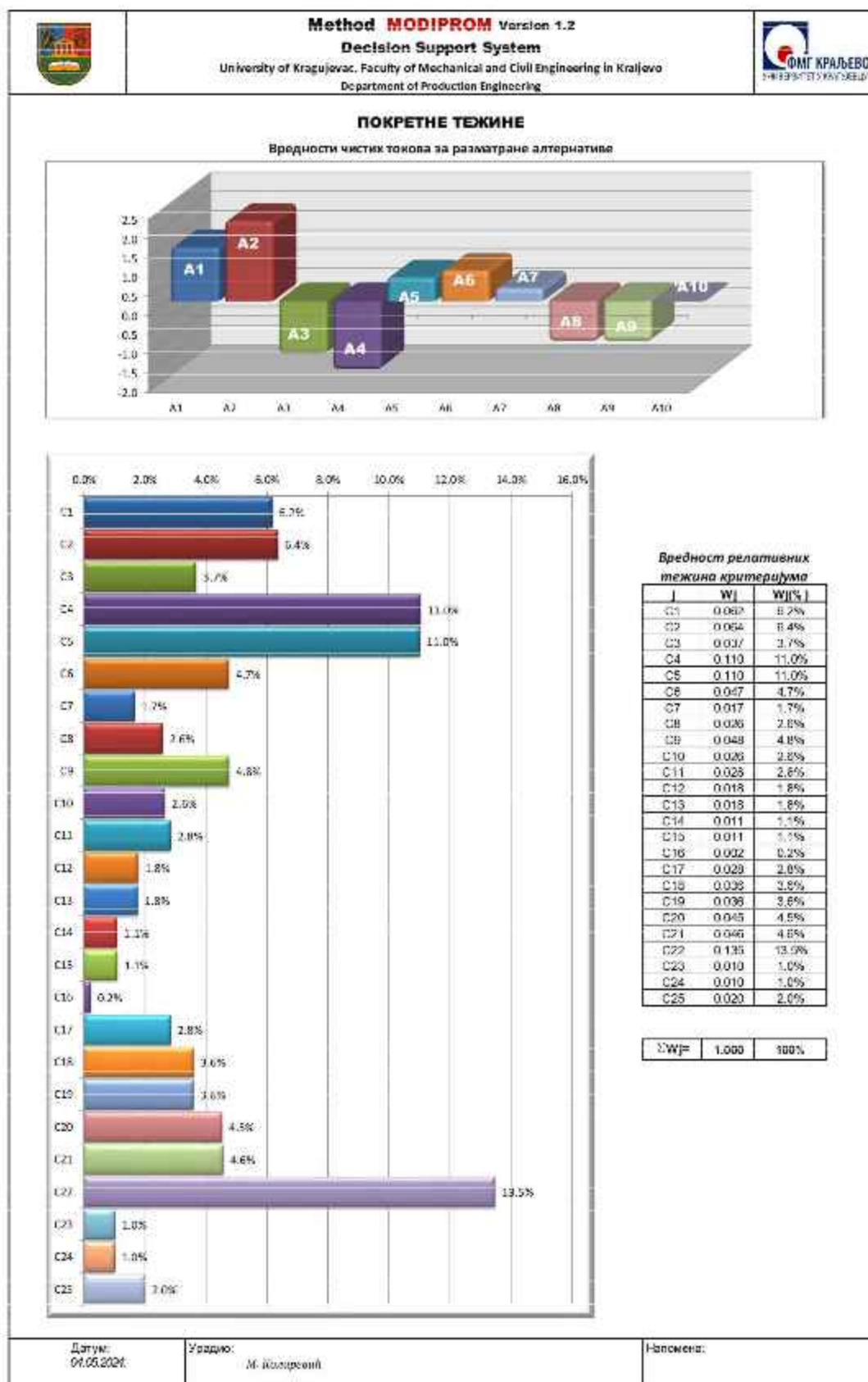
доношење коначне одлуке при избору најбоље алтернативе. Са слике се види да алтернатива **A2** доминира над осталим алтернативама.

За развијени модел су урађене три анализе осетљивости у којима је тестиран ефекат промене релативних тежина најзначајнијих критеријума. Најутичајнији критеријум C22 чија је вредност помоћу FАHP методе процењена на 13,5% је вариран у интервалу од 5,5% до 23,5%, критеријум C4 у интервалу од 6-16%, критеријум C4 у интервалу од 6-14%, критеријум C2 у интервалу 3,4-6,4% и критеријум C1 у интервалу 4,2-6,2%. Процентуална вредност утицаја осталих критеријумских функција је мала тако да утицај њихове промене није анализиран. Вредности релативних тежина у % по тестираним варијантама: v.0 (почетна варијанта), v.1, v.2 и v.3 су приказане у табели 7.20.

Табела 7.20. Релативне тежине за анализу осетљивости

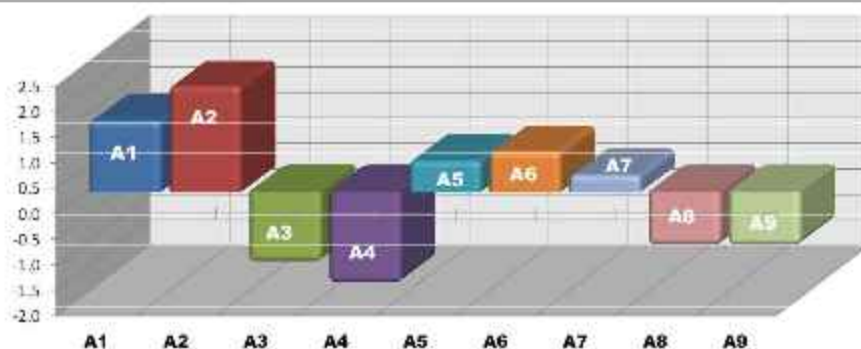
Критеријуми	Вредности релативних тежина			
	v.0	v.1	v.2	v.3
C1	6.2%	6.2%	6.2%	4.2%
C2	6.4%	6.4%	6.4%	3.4%
C3	3.7%	3.7%	3.7%	3.7%
C4	11.0%	16.0%	6.0%	16.0%
C5	11.0%	14.0%	6.0%	6.0%
C6	4.7%	4.7%	4.7%	4.7%
C7	1.7%	1.7%	1.7%	1.7%
C8	2.6%	2.6%	2.6%	2.6%
C9	4.8%	4.8%	4.8%	4.8%
C10	2.6%	2.6%	2.6%	2.6%
C11	2.8%	2.8%	2.8%	2.8%
C12	1.8%	1.8%	1.8%	1.8%
C13	1.8%	1.8%	1.8%	1.8%
C14	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%
C15	1.1%	1.1%	1.1%	1.1%
C16	0.2%	0.2%	0.2%	0.2%
C17	2.8%	2.8%	2.8%	2.8%
C18	3.6%	3.6%	3.6%	3.6%
C19	3.6%	3.6%	3.6%	3.6%
C20	4.5%	4.5%	4.5%	4.5%
C21	4.6%	4.6%	4.6%	4.6%
C22	13.5%	5.5%	23.5%	18.5%
C23	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%
C24	1.0%	1.0%	1.0%	1.0%
C25	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%

Дијаграми „покретних тежина“ тј. вредности чистих токова за разматране алтернативе по тестираним варијантама у анализи осетљивости су приказани на слици 7.31. Може се закључити да алтернатива A2 у свим варијантама доминира над осталим алтернативама и да редослед алтернатива остаје исти тако да се може закључити да је одабрано решење стабилно.

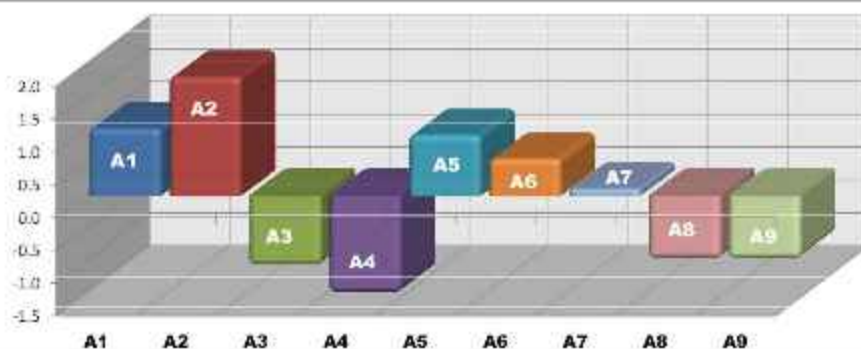


Слика 7.30. Анализа утицаја релативних тежина на резултате ВКА

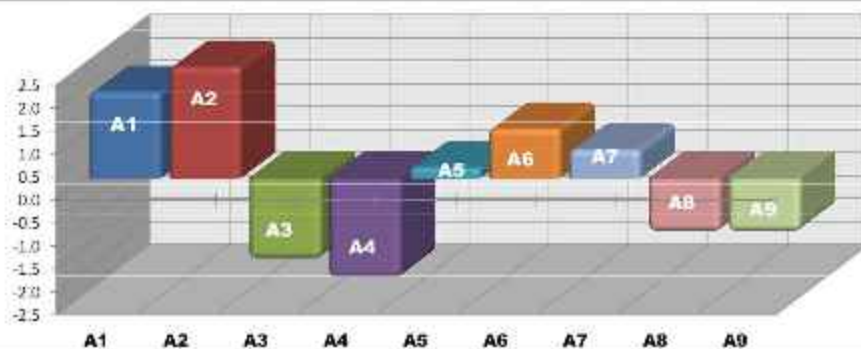
v.0)



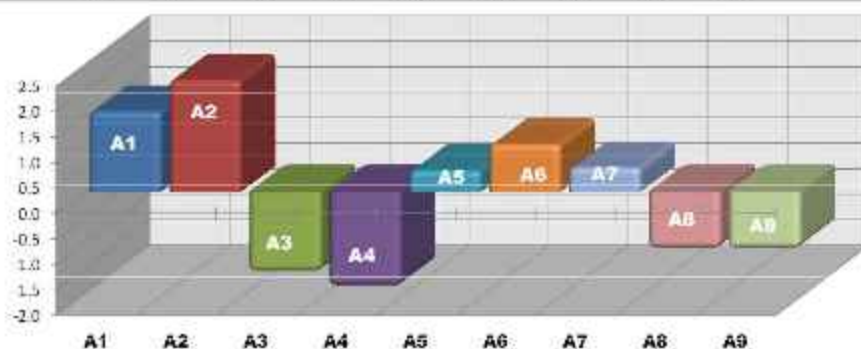
v.1)



v.2)



v.3)



Слика 7.31. Анализа осетљивости: дијаграми „покретних тежина“ тј. вредности чистих токова за разматране алтернативе по тестираним варијантама

7.12 Избор најбоље алтернативе

На основу спроведене свеобухватне вишекритеријумске анализе и анализе осетљивости одабрана је алтернатива A2 односно панел **Magnum AL12** компаније Унипромет д.о.о. -Чачак.

ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

8.1 Анализа остварених резултата

Свака СЗБ представља нов производ који је потребно пројектовати у складу са акустичким и неакустичким захтевима, конфигурацијом терена и уклопити је да буде компатибилна са локалним окружењем. При том, треба имати у виду да су конкрентни услови који владају на појединим деоницама пута често веома различити (јаки удари ветра, велике снежне падавине, могућност пожара и сл.) због чега је различита и важност одређених критеријума за сваку деоницу. То са друге стране захтева и различите конфигурације СЗБ које се односе, пре свега, на захтеве које треба да испуни зид баријере односно, панели од којих се они формирају.

Проблем се може решити применом модуларних СЗБ које се формирају комбинацијом расположивих модула и компоненти. Што је већи број различитих модула, а посебно панела за заштиту од буке, који имају различите акустичке и неакустичке перформансе, могуће је формирати и већи број конфигурација СЗБ како би се за сваку деоницу пута понудила варијанта којом се најбоље задовољавају тражени захтеви.

У циљу решавања наведеног проблема, фокус дисертације је био на развоју теоријског модела за подршку одлучивању у процесу избора оптималне конфигурације модуларне баријере за заштиту од буке друмског саобраћаја. У складу са тим, истраживање је спроведено у неколико фаза:

- анализа стања и савремених трендова у домену развоја баријера за заштиту од саобраћајне буке кроз преглед и анализу доступне литературе;
- развој вишекритеријумског модела за подршку одлучивању за избор оптималне конфигурације СЗБ који је научно заснован и погодан за практичну примену;
- верификација модела на практичном примеру и уз развијену софтверску подршку.

Предложени приступ је веома значајан јер омогућава да се за задате услове аутоматски добије оптимална конфигурација при чему се субјективност у доношењу одлука своди на минимум.

Током истраживања, дошло се до резултата који имају значај и у научном и у практичном смислу.

Главни научни доприноси се огледају у следећем:

- Преглед стања и систематизација резултата досадашњих истраживања у области конфигурисања саобраћајних звучних баријера и сагледавање ограничења и недостатака појединих приступа;
- развијен је *Модел за подршку одлучивању*, заснован на примени вишекритеријумске анализе, помоћу којег је могуће, за сваку деоницу пута за коју се пројектује звучна баријера, дефинисати критеријуме и њихове тежинске вредности у зависности од специфичности дате деонице;
- предложени модел одлучивања представља оригинални научни допринос који је по први пут реализован у овој области и представља ефикасан алат који произвођачима баријера за заштиту од саобраћајне буке омогућује да из фонда расположивих модула предложи конфигурацију која најбоље

задовољава задате критеријуме, а инвеститору да из фонда понуђених конфигурација различитих понуђача изабере понуђача који нуди оптималну конфигурацију и тиме унапреди ваљаност инвестиционог пројекта;

- извршена је верификација модела кроз студију случаја избора оптималне конфигурације заштитних баријера L51 и L52 укупне површине 3280 m² и дужине 580m аутопута Медаково-Озимица LOT 2;
- проширивање знања и формирање значајне основе за даља истраживања у области конфигурисања СЗБ као и других комплексних конфигурабилних производа.

Практичне импликације истраживања су:

- развијени модел је научно заснован и погодан за коришћење у пракси;
- с обзиром на јавну доступност дисертације и планирану дисеминацију резултата, окружење ће бити упознато са досадашњим резултатима истраживања у овој области и могућностима примене предложеног модела;
- *пројектанти заштите од буке* на саобраћајницама добијају алат на основу кога могу за сваку деоницу пута прописати посебне услове које треба да испуни СЗБ у складу са условима те деонице пута;
- *инвеститор* добија једноставан и разумљив модел на основу кога може из мноштва понуђених варијанти изабрати оптималну конфигурацију СЗБ;
- *за произвођача*, предложени концепт конфигурисања модуларне СЗБ:
 - представља ефикасан начин структурисања производа од стандардизованих делова и модула који се заснива на: дефинисаној платформи производа, детаљно разрађеним и класификованим модулима и јасно дефинисаним поступком конфигурисања,
 - спаја предност коју даје серијска индустријска производња по питању ефикасности и занатска производња по питању прилагођавања производа индивидуалним захтевима купца,
 - омогућује да развије, прошири и унапреди производни програм и понуди најбоље варијанте производа које задовољавају захтеве тржишта;
 - омогућује конкурентност на тржишту кроз: смањење времена и трошкова пројектовања, повећање продуктивности производње и монтаже, уштеде у процесу производње, монтаже и одржавања, скраћење времена испоруке производа, повећање животног века производа и могућност рециклаже производа по истеку рока коришћења,
 - процес конфигурисања се може потпуно аутоматизовати применом напредних CAD система заснованих на знању,
- произвођачи добијају јасно дефинисане критеријуме и методологију избора понуђача на тендерима;
- резултате истраживања је могуће применити у процесу пројектовања заштите од буке на саобраћајницама као и у предузећима која се баве производњом и уградњом опреме за заштиту од саобраћајне буке;

- модел за конфигурисање модуларних СЗБ је превасходно намењен произвођачима баријера, али се са одређеним прилагођавањима може користити и за конфигурисање других производа.

Примена ове методологије треба да доведе до унапређења средстава за заштиту урбане средине од саобраћајне буке чиме се остварује друштвени смисао, а то је *унапређење заштите животне средине*.

8.2 Закључци

Докторска дисертација је резултат вишегодишњег научно – истраживачког рада у актуелној области која се односи на развој конфигурабилних баријера за заштиту од буке друмског саобраћаја и развој модела одлучивања заснованог на вишекритеријумској оптимизацији у циљу избора оптималне конфигурације СЗБ.

Верификацијом развијеног модела доказана је основна хипотеза докторске дисертације **H₀** да је *могуће развити модел за подршку одлучивању, заснован на примени метода вишекритеријумске анализе, помоћу кога је могуће, за конкретне услове сваке деонице пута, изабрати оптималну конфигурацију модуларне баријере за заштиту од буке друмског саобраћаја, која на оптималан начин задовољава акустичке и неакустичке захтеве и која се уклапа у постојеће окружење*.

За потребе прорачуна тежинских коефицијената критеријумских функција развијена је апликација *Fuzzy Analytic Hierarchy Process Excel Spreadsheet* заснована на фазификацији *Saaty*-јеве скале применом *fuzzy* бројева са променљивим интервалом поверења, а за потребе рангирања алтернатива и избор оптималне варијанте унапређена је апликација *Method MODIPROM v. 1.2*, посебно у делу који се односи на анализу осетљивости. Тиме је потврђена и допунска хипотеза **H₁** да је *могуће аутоматизовати модел одлучивања помоћу апликативних софтвера које треба развити*.

Анализом могућих захтева које треба да испуни баријера за заштиту од буке моделом је дефинисано 27 релевантних критеријума који су класификовани у 6 група и који су јасно структурирани. За сваки критеријум су дефинисани индикатори са јасно дефинисаним скалама за квантификацију. Предложени модел за подршку одлучивању ће инвеститору олакшати формирање тендерске документације и избор понуђача на основу предложене конфигурације модула за заштиту од буке за све деонице пута на којима је дефинисана заштита од буке помоћу СЗБ. Јасно дефинисани критеријуми и методологија избора ће бити од користи и произвођачима приликом учешћа на тендерима чиме је потврђена и допунска хипотеза **H₂** да ће *предложена методологија произвођачима баријера обезбедити јасна правила на основу којих могу градити своју конкурентност на тржишту СЗБ*.

8.3 Правци даљег истраживања

Ограничења и недостаци истраживања који су резултат објективних околности се укратко могу сажети у следећем:

- област истраживања је обимна и комплексна и захтева мултидисциплинарни приступ и учешће великог броја стручњака из различитих области,

- немогућност валидације добијених резултата и
- ограничено време трајања истраживања.

Зато ће правци даљег истраживања у овој области бити усмерени на:

- истраживање нових могућности и граница примене представљеног концепта кроз конкретну примену развијеног модела на великом броју практичних примера и кроз интензивну сарадњу са пројектантама заштите од буке на саобраћајницама и са привредним друштвима која се баве производњом СЗБ,
- побољшање и унапређење модела кроз побољшање алгоритамских структура и метода вишекритеријумске оптимизације и укључење нових критеријумских функција;
- проширење истраживања на области конфигурабилности баријера за заштиту од буке железничког и авионског саобраћаја;
- даља експериментална и теоријска истраживања у циљу развоја интелигентног система за конфигурисање саобраћајних звучних баријера и примене метода вештачке интелигенције, и
- континуалну верификацију и валидацију модела.

Литература

- [1] D. Praščević, M., Cvetković, *Environmental Noise*. University of Niš, Fakultet zaštite na radu, 2005.
- [2] I. I. a. d. Beograd, "Studija izvodljivosti tehničkih mera smanjenja štetnog uticaja buke od drumskog saobraćaja na odabranim deonicama državnih puteva br. 4154/10".
- [3] Official Journal of the European Communities L 189, "Directive 2002/49/EC of The European Parliament and The Council of The European Union of 25 June 2002 relating to the assessment and management of environmental noise," 2002.
- [4] "SRPS U.J6.001:2000, Osnovni termini i definicije".
- [5] "Zakon o zaštiti od buke u životnoj sredini," *Službeni Glas. RS* 96, 2021.
- [6] "СРПС ИСО 1996-1:2019 Акустика - Описивање, мерење и оцењивање буке у животnoj средини – Део 1: Основне величине и процедуре оцењивања".
- [7] "Стратегија одрживог урбаног развоја Републике Србије до 2030. године," *Службени гласник РС бр. 47 од 28. јуна 2019.*, 2019.
- [8] "Regulation on noise indicators, limiting values and methods for estimation of noise indicators, annoyance and detrimental effects of noise," *Off. Gaz. Repub. Serbia, No. 75/2010*, 2010.
- [9] "Guidelines on methodology for determination of acoustical zones," *Off. Gaz. Repub. Serbia, No. 72/2010*, 2010.
- [10] "Guidelines on methodology for design of action plans," *Off. Gaz. Repub. Serbia, No. 72/2010*, 2010.
- [11] "Guidelines on contents and methods of strategic noise mapping and their public presentation," *Off. Gaz. Repub. Serbia, No. 80/2010*, 2010.
- [12] "Guidelines on conditions and documentation for expert organization for noise measurements," *Off. Gaz. Repub. Serbia, No. 72/2010*, 2010.
- [13] "Serbian standard ISO 1996-1,2," *Off. Gaz. Repub. Serbia, No. 72/2010*, 2010.
- [14] са сарадницима мр Борислав Б. Будисављевић, дипл.инж., "Подлоге за прописе о комуналној буци – II део," *ТЕЛФОР 2010*, 2010.
- [15] са сарадницима мр Борислав Б. Будисављевић, дипл.инж., "Подлоге за прописе о комуналној буци – I део," *ТЕЛФОР 2010*, 2010.
- [16] "СРПС У.Ј6.205:2007, Акустичко зонирање простора".
- [17] "Правилник о дозвољеном нивоу буке у животnoj средини," *Службени гласник РС, бр. 54/92*.
- [18] D. Mihajlov, D., Praščević, M., Cvetković, "An analysis of the environmental noise levels on the territory of the city of Niš," *23th Natl. Conf. 4th Int. Conf. Noise Vib. Niš*, 2012.
- [19] S. Bogdanović, G., Trajković, "The problem communal noise in city of Vranje," *J. Process Manag. – New Technol. Int.*, vol. Vol. 4, no. No. 4, 2016.

- [20] G. Jakovljević, B., Belojević, *Saobraćajna buka i mentalno zdravlje, Medicinski fakultet, Univerzitet u Beogradu, 1998.* 1998.
- [21] B. & Kjær, "Lecture notes. Retrieved from the course material presented by Svend Gade at the training course in Advanced Acoustics. Brüel & Kjær University, Nærum Denmark. 17-18 November, 2008.," 2008.
- [22] T. D. Rossing, *The Science of Sound. Second Edition. Addison-Wesley Publishing Company.* 1990.
- [23] M. Grković, V., Kolarević, M., Petrović, Z., Vukićević, "Morphology of Modular Traffic Noise Barriers.," *Proc. 4th Int. Conf. "Noise Vib. Niš, 2012*, pp. 89–94, 2012.
- [24] B. K. and C. English, *Environmental Noise Barriers, A guide to their acoustic and visual design, Second edition, Taylor & Francis e-Library, London and New York.* 2009.
- [25] "NZ Transport Agency, FHWA Highway Noise Barrier Design Handbook," 2010, [Online]. Available: ISBN 978-0-478-36479-8 (Online)
- [26] Z. Maekawa, "Noise reduction by Screens," *Appl. Acoust.* 1968, 1157-173, 1968.
- [27] U. J. Kurze and G. S. Anderson, "Sound attenuation by barriers," *Appl. Acoust.*, vol. 4, no. 1, pp. 35–53, Jan. 1971, doi: 10.1016/0003-682X(71)90024-7.
- [28] J. B. Keller, "Geometrical Theory of Diffraction," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 52, pp. 116–130, 1962.
- [29] S. W. Redfearn, "XX. Some acoustical source-observer problems," *London, Edinburgh, Dublin Philos. Mag. J. Sci.*, vol. 30, no. 200, pp. 223–236, Sep. 1940, doi: 10.1080/14786444008520712.
- [30] R. B. Tatge, "Barrier-wall attenuation with a finite-sized source," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 53, no. 5, pp. 1317–1319, May 1973, doi: 10.1121/1.1913472.
- [31] "ISO 9613-2:1996. Acoustics—Attenuation of Sound during Propagation Outdoors—Part 2: General Method of Calculation; International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 1996.," 1996.
- [32] P. Menounou, "A correction to Maekawa's curve for the insertion loss behind barriers," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 110, no. 4, pp. 1828–1838, Oct. 2001, doi: 10.1121/1.1398050.
- [33] Z. Hu and R. L. M. Wong, "Barrier Insertion Loss Versus Fresnel Number and Secondary Parameters," *Noise Control Eng. J.*, vol. 20, no. 1, p. 31, 1983, doi: 10.3397/1.2827601.
- [34] J. A. Barry, T. M., Reagan, "FHWA Highway Traffic Noise Prediction Model. Report No. FHWA-RD-77-108. Washington, DC: Federal Highway Administration, December 1978.," 1978.
- [35] J. Bowlby, W., Higgins, J., Reagan, "Noise Barrier Cost Procedure – STAMINA 2.0/OPTIMA: User's Manual. Report No. FHWA-DP-58-1. Washington, DC: Federal Highway Administration, April 1982.," 1982.
- [36] W. D. Hendriks, R. W., "Sound 32. Sacramento, CA: California Department of Transportation, Division of New Technology," *Mater. Res.*, 1991.
- [37] "TrafficNoiseCAD Version 2.0 - User's Guide. Brentwood, TN: Bowlby and

- Associates, Inc., April 1994.,” Bowlby, W., Li, J., Patton, C., 1994.
- [38] U.S. Department of Transportation, FHWA Highway Noise Barrier Design Handbook, Federal Highway Administration, FHWA-EP-00-005 DOT-VNTSC-FHWA-00-01, 2000. 2000.
- [39] G. A. Daigle, “Report by the International Institute of Noise Control Engineering Working Party on the Effectiveness of Noise Walls, Noise/News International,” *Noise/News Int.*, vol. 6, no. 1.
- [40] M. Ozturk, T., Ozturk, Z., Calis, “A case study on acoustic performance and construction costs of noise barriers. Scientific Research and Essays,” *Sci. Res. Essays*, vol. 7, no. 50, pp. 4213–4229, 2012, doi: 10.5897/SRE10.1134.
- [41] “OECD, Road Transport Research. Roadside noise abatement. Report prepared by an OECD Scientific Expert Group. Organization for economic co-operation and development. France,” 1995.
- [42] “Ontario Ministry of Transportation, Environmental guide for noise,” 2006.
- [43] “Guidelines On Design And Installation Of Noise Barriers For Roads, Indian Roads Congress Kama Koti Marg, Sector-6, R.K. Puram, New Delhi-110 022, 2020,” 2020.
- [44] “CEDR Technical Report 2017-02 Noise Barriers”.
- [45] “Forster; [Electronic Resorse], <https://forster.at/en/noise-control/rail/sound-resonator> (accessed: 22.05.2023.)”.
- [46] “Forster; [Electronic Resorse], <https://forster.at/en/noise-control/silent-solar> (accessed: 23.05.2023.)”.
- [47] “Battleiroig; [Electronic Resorse], <https://www.battleiroig.com/en/projectes/mota-acustica/> (accessed: 23.05.2023.)”.
- [48] “Weldon; [Electronic Resorse], <https://www.weldon.eu/noise-barriers.html> (accessed: 25.05.2023.)”.
- [49] “SwindonAdvertiser; [Electronic Resorse], <https://www.swindonadvertiser.co.uk/news/10501864.solar-barrier-plan-to-cut-a419-noise/> (accessed: 25.05.2023.)”.
- [50] “Millennium Release; [Electronic Resorse], <https://mrsb-roadsafety.com/solar-noise-barrier-system/> (accessed: 25.05.2023.)”.
- [51] “iStock; [Electronic Resorse], <https://www.istockphoto.com/search/2/image?page=2&phrase=sound%20barrier%20natural%20phenomenon> (accessed: 09.06.2023.)”.
- [52] “Hong Kong Noise Barrier Competition, [Electronic Resorse], <https://www.slab-a.net/hong-kong-noise-barrier> (accessed: 27.05.2023.)”.
- [53] “De Ingenieur; [Electronic Resorse], <https://www.deingenieur.nl/artikel/geluidsscherm-voegt-zich-naar-verkeersgeluid> (accessed: 27.05.2023.)”.
- [54] “CIR Ambiente; [Electronic Resorse], <https://www.cir-ambiente.it/> (accessed: 04.06.2023.)”.

- [55] "Ketek Group; [Electronic Resorse], <https://ketek.ca/product/sound-barriers/> (accessed: 04.06.2023.)".
- [56] "Sound Fighter Systems; [Electronic Resorse], <https://www.soundfighter.com/> (accessed: 04.06.2023.)".
- [57] "Siderise; [Electronic Resorse], <https://www.siderise.com/> (accessed: 04.06.2023.)".
- [58] "OTW Safety; [Electronic Resorse], <https://otwsafety.com/blog/traffic-barriers/> (accessed: 04.06.2023.)".
- [59] "Ecotone; [Electronic Resorse], <https://www.ecotone.in/mobile-noise-barrier/> (accessed: 04.06.2023.)".
- [60] K. Yamamoto, "Japanese experience to reduce road traffic noise by barriers with noise reducing devices, Kobayasi Institute of Physical Research, Tokyo, Japan, EuroNoise 2015, Maastricht," 2015.
- [61] K. Y. Y. Shono, Y. Yoshida, "Development of noise abatement devices applied at the top of highway noise barriers, Journal of JSCE, No. 504/VI-25, 1994 (in Japanese)," 1994.
- [62] "Trimo; [Electronic Resorse], www.trimo.si (accessed: 05.06.2023.)".
- [63] "Forster; [Electronic Resorse], <https://forster.at/en/noise-control/road/accessories> (accessed: 05.06.2023.)".
- [64] J. C. J. Oostveen, "Gaps Beneath, Noise Screens - Acoustically Permissible? DWW wijzer, ISSN 0926-8618. Delft, Netherlands: Rijkswaterstaat, Road and Hydraulic Engineering Division, 1989," 1989.
- [65] G. S. F. Leccese, F. Fantozzi, "Analysis of in situ acoustical performance of concrete noise barriers, Acoustics 2012, University of Pisa, Dept. of Energy and System Engineer (DESE), Largo L. Lazzarino, 56122, Pisa, Italy," 2012.
- [66] "Insametal; [Electronic Resorse], <https://insametal.com/concrete-acoustic-panel/> (accessed: 05.06.2023.)".
- [67] "Wieser Concrete; [Electronic Resorse], <https://wieserconcrete.com/product/noise-abatement-walls-posts-highway/> (accessed: 05.06.2023.)".
- [68] "Houseopedia; [Electronic Resorse], <https://www.houseopedia.com/hush-sound-barriers-home> (accessed: 05.06.2023.)".
- [69] "Insametal; [Electronic Resorse], <https://insametal.com/wooden-acoustic-panel/> (accessed: 05.06.2023.)".
- [70] "Ramo; [Electronic Resorse], <https://ramo.eco/murs-antibruit/> (accessed: 05.06.2023.)".
- [71] "External Works; [Electronic Resorse], <https://www.externalworksindex.co.uk/company/25113/Gramm-Barrier-Systems/> (accessed: 05.06.2023.)".
- [72] "Panacor; [Electronic Resorse], <https://www.panacor2000.com/> (accessed: 05.06.2023.)".
- [73] K. Monkova, M. Vasina, P. P. Monka, J. Vanca, and D. Kozak, "Effect of 3D-Printed PLA Structure on Sound Reflection Properties," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 3, p.

- 413, Jan. 2022, doi: 10.3390/polym14030413.
- [74] S. M. Lakušić S., Bjegović D., *Primjena reciklirane gume na prometnicama, Prometnice – nove tehnologije i materijali, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zavod za prometnice, Zagreb.* 2010.
- [75] "Ruconbar; [Electronic Resorse], <http://www.ruconbar.com/> (accessed: 05.06.2023.)."
- [76] "Echo Barrier; [Electronic Resorse], <https://blog.echobarrier.com/> (accessed: 06.06.2023.)."
- [77] "Jacksons Fencing; [Electronic Resorse], www.jacksons-fencing.co.uk (accessed: 06.06.2023.)."
- [78] "Kohlhauer; [Electronic Resorse], <https://www.kohlhauer.com/en/ligna-2/> (accessed: 06.06.2023.)."
- [79] "CIR Ambiente; [Electronic Resorse], <https://www.cir-ambiente.it/cir-habitat/pannelli-fonoassorbenti-legno/> (accessed: 06.06.2023.)."
- [80] "Multivario; [Electronic Resorse], <https://www.multivario.co.uk/> (accessed: 06.06.2023.)."
- [81] "Приручник за пројектовање путева у Републици Србији, 1.0 Планска, техничка и инвестициона документација, Јавно предузеће Путеви Србије, Београд, 2012.," 2012.
- [82] "Закон о планирању и изградњи, Сл. Гласник РС, бр. 72/2009, 81/2009 -испр., 64/2010 -одлука УС, 24/2011, 121/2012, 42/2013 – одлука УС, 50/2013 – одлука УС, 98/2013– одлука УС, 132/2014, 145/2014, 83/2018, 31/2019, 37/2019 – др.закон, 9/2020, 52/2021 и 62/".
- [83] "Приручник за пројектовање путева у Републици Србији, 7. Пут и животна средина, 7.1 Заштита од буке, Јавно предузеће Путеви Србије, Београд, 2012.," 2012.
- [84] "Студија изводљивости техничких мера смањења штетног утицаја буке од друмског саобраћаја на одабраним деоницама државних путева, бр. 4154//10, Институт ИМС а.д., Београд, Јун 2010."
- [85] "Извештај о реализацији G2G пројекта за Србију G2G09/SB/5/5, „Смањење саобраћајне буке у Србији“, Vka.08hi10.11r100, VANKEULEN advies bv, Novembar 2011.," 2011.
- [86] W. van K. et All., "REDUCING TRAFFIC NOISE IN SERBIA; GUIDELINES LOW-NOISE, Vka.08hi10.11r100, VANKEULEN advies bv, Novembar 2011. https://www.researchgate.net/publication/289308333_Reducing_Traffic_Noise_in_Serbia," 2011.
- [87] E. C. Kotzen B., *Environmental Noise Barriers, A guide to their acoustic and visual design, second edition, CRC Press, London, 2014., eBook ISBN9780429153440.* 2014.
- [88] O. N. Grković V., Kolarević M., "Konfigurisanje modularnih trezorskih prostora," in *Konferencija sa međunarodnim učešćem Primena novih tehnologija i ideja u školskom inženjerskom obrazovanju, Požega, Srbija*, pp. 165–174.
- [89] B. M. Kolarević M., Grković V., Vukićević M., "Configuration of Modular Noise

- Barriers," in *International Conference Noise and Vibration 2012, Proceeding, Niš*, pp. 95–100. [Online]. Available: ISBN 978-86-6093-042-4
- [90] K. J. V., "A Review of Noise Policy, and Noise Barrier Design & Construction, I-390 / I-490 INTERCHANGE IMPROVEMENTS PROJECT, June 25, 2018., chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://www.adc40.org/presentations/Summer2018/VankerhoveTRB18.pdf".
- [91] I. B.-V. Richard E. Klingner, Michael T. McNerney, "Design Guide for Highway Noise Barriers, Texas Department of Transportation, US Department of Transportation – Federal Highway Administration, 2003., 2003.
- [92] *Guidelines on Design of Noise Barriers, Environmental Protection Department, Highways Department, Government of the Hong Kong SAR, Second Issue, January 2003.* 2003.
- [93] S. P. Gregg G. Fleming, Harvey S. Knauer, Cynthia S. Y. Lee, *Noise Barrier Design Handbook, US Department of Transportation – Federal Highway Administration.*
- [94] N. Stamenčić, "Definisanje kriterijuma za projektovanje zvučnih barijera, Diplomski rad, Mašinski fakultet u Kraljevu, Univerzitet u Kragujevcu, Kraljevo, 2012., 2012.
- [95] *EN1317 European Road Restraint Systems.*
- [96] F. H. Administration, *Manual for Assessing Safety Hardware (MASH) Transition.*
- [97] H. R. Program, *National Cooperative Highway Research Program: NCHRP Report 350, Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features, NATIONAL ACADEMY PRESS, Washington, D.C. 1993.* 1993.
- [98] *AS/NZS 3845.1:2015, Road safety barrier systems and devices, Part 1: Road safety barrier systems.*
- [99] *BS EN 13501-1:2007: Fire Classification Of Construction Products And Building Elements. Classification Using Data From Reaction To Fire Tests (British Standard).*
- [100] "United Nations, 1987. Report of the World Commission on Environment and Development, General Assembly Resolution 42/187, 11 December 1987, retrieved 1 April 2007," 2007.
- [101] "Law on environmental noise protection of Republic of Serbia, Official Gazette of Republic of Serbia, No. 36/2009; „Zakon o zaštiti od buke u životnoj sredini", Sl. glasnik RS 36, 2009," *Off. Gaz. Repub. Serbia, No. 36/2009*, 2009.
- [102] "УРЕДБА о индикаторима буке, граничним вредностима, методама за оцењивање индикатора буке, узнемиравања и штетних ефеката буке у животној средини, "Службени гласник РС, број 75 од 20. октобра 2010. (Regulation on noise indicators, limiting values and metho," *Службени гласник РС, број 75*, 2010.
- [103] "Правилник о садржини и методама израде стратешких карата буке и начину њиховог приказивања јавности, 'Сл. гласник РС', бр. 80/2010 (Guidelines on contents and methods of strategic noise mapping and their public presentation, Official Gazette of Republic o," *"Сл. гласник РС", бр. 80/2010*, 2010.
- [104] "Правилник о методологији за израду акционих планова, „Службени гласник РС", број 72 од 8. октобра 2010. (Guidelines on methodology for design of action

- plans, Official Gazette of Republic of Serbia, No. 72/2010), „Службени гласник РС”, број 72, 2010.
- [105] “Правилник о методологији за одређивање акустичких зона, „Службени гласник РС”, број 72 од 8. октобра 2010. (Guidelines on methodology for determination of acoustical zones, Official Gazette of Republic of Serbia, No. 72/2010), „Службени гласник РС”, број 72, 2010.
- [106] “Правилник о методама мерења буке, садржини и обиму извештаја о мерењу буке у животној средини, „Службени гласник РС”, број 139 од 16. децембра 2022., „Службени гласник РС”, број 139, 2022.
- [107] “Правилник о условима које мора да испуњава стручна организација за мерење буке у животној средини, потребној документацији, поступку овлашћивања, садржини решења о овлашћивању, као и о садржини, обиму и року важења извештаја о мерењу буке, „Службени гласни, „Службени гласник РС”, број 139, 2022.
- [108] *Noise reducing devices*, <https://standards.iteh.ai/catalog/tc/cen/70120d40-23bf-449e-9b6b-903b7b17d477/cen-tc-226>.
- [109] M. G. Jean-Pierre Clairbois, “Noise barriers and standards for mitigating noise, [Electronic Resorse], <https://dokumen.tips/download/link/noise-barriers-and-standards-for-mitigating-noise-on-airnoouploads4-nois>,” in *CEDR Conference on Road Traffic Noise, Hamburg*.
- [110] et al. Clairbois, J.P., *QUIESST Guidebook to Noise Reducing Devices optimization, FP7-SST-2008-RTD-1, Quiesst.eu*, 2012. <https://repository.tno.nl/islandora/object/uuid:16f7a829-5f5c-4523-ab35-1d6cce015cb1> (accessed: 15.06.2023.). 2012.
- [111] D. P. Morgan, *Developments in standards for noise barriers, Senior Consultant, TRL, Convener, CEN/TC226/WG6/TG1*, <https://www.scribd.com/document/488977913/2-7-Developments-in-Standards-for-Noise-Barriers-P-Morgan#> (accessed: 15.06.2023.).
- [112] G. Parker, “Effective Noise Barrier Design and Specification, Christchurch, New Zealand,” in *Proceedings of ACOUSTICS 2006*.
- [113] M. G. Jean-Pierre Clairbois, “The European standards for roads and railways noise barriers: state of the art 2015, EuroNoise 2015, 31 May - 3 June, Maastricht,” in *EuroNoise 2015*.
- [114] G. Brero, “Noise Barriers European Standards – CE Marking, <https://enbf.org/wp-content/uploads/2016/08/enbf-brero-sarajevo.pdf> (accessed: 15.06.2023.)”.
- [115] “iStock, [Electronic Resorse], <https://www.istockphoto.com/search/2/image?page=2&phrase=sound%20barrier%20natural%20phenomenon> (accessed: 16.06.2023.)”.
- [116] *DESIGN MANUAL FOR ROADS AND BRIDGES, VOLUME 10 ENVIRONMENTAL, DESIGN AND MANAGEMENT, SECTION 5 ENVIRONMENTAL BARRIERS, PART 2, HA 66/95, ENVIRONMENTAL BARRIERS: TECHNICAL REQUIREMENTS, February 2001*, <https://pdf4pro.com/download/ha-66-95-standards-for-hig>, 2001.
- [117] М. Чупић, М., Сукновић, *Одлучивање, Факултет организационих наука, Београд, Србија, 2010. 2010.*

- [118] М. Милановић, Д. Д., Мисита, *Информациони системи подршке управљању и одлучивању*, Машински факултет, Београд, Србија. 2008.
- [119] М. Радојичић, М., Жижовић, *Примена метода вишекритеријумске анализе у пословном одлучивању*, Факултет техничких наука, Чачак, Србија. 1998.
- [120] М. Чупић, *Увод у теорију одлучивања*, Научна књига, Београд, Србија. 1987.
- [121] T. L. Saaty, *The analytic hierarchy process*, McGraw-Hill, New York. 1980.
- [122] T. L. Saaty and L. G. Vargas, *Models, Methods, Concepts & Applications of the Analytic Hierarchy Process*, vol. 34. Boston, MA: Springer US, 2001. doi: 10.1007/978-1-4615-1665-1.
- [123] D. Pamucar, D. Bozanic, and D. Kurtov, "Fuzzification of the Saaty's scale and a presentation of the hybrid fuzzy AHP-TOPSIS model: An example of the selection of a brigade artillery group firing position in a defensive operation," *Vojnoteh. Glas.*, vol. 64, no. 4, pp. 966–986, 2016, doi: 10.5937/vojtehg64-9262.
- [124] D. Božanić, D., Karović, S., Pamučar, "Fazifikacija Saaty-jeve skale primenom trouglastog fuzzy broja sa promenljivim intervalom poverenja," in *SYM-OP-IS 2015: XLII Simpozijum o operacionim istraživanjima*, 2015.
- [125] D. Božanić, D. Pamučar, and D. Bojanić, "Modification of the analytic hierarchy process (AHP) method using fuzzy logic: Fuzzy AHP approach as a support to the decision making process concerning engagement of the group for additional hindering," *Serbian J. Manag.*, vol. 10, no. 2, pp. 151–171, 2015, doi: 10.5937/sjm10-7223.
- [126] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Inf. Control*, no. 8, pp. 338–356, 1965.
- [127] L. Rezaei, J., Fahim, P.B.M., Tavasszy, "Supplier selection in the airline retail industry using a funnel methodology: Conjunctive screening method and fuzzy AHP," *Expert Syst. Appl.*, no. 41, pp. 8165–8179, 2014.
- [128] T. Yeap, J.A.L., Ignatius, J., Ramayah, "Determining consumers' most preferred eWOM platform for movie reviews: A fuzzy analytic hierarchy process approach," *Comput. Human Behav.*, no. 31, pp. 250–258, 2014.
- [129] R. John, A., Paraskevadakis, D., Bury, A., Yang, Z., Riahi, "An integrated fuzzy risk assessment for seaport operations," *Saf. Sci.*, no. 68, pp. 180–194, 2014.
- [130] A. Kamvysi, K., Gotzamani, K., Andronikidis, "Capturing and prioritizing students' requirements for course design by embedding Fuzzy-AHP and linear programming in QFD," *Eur. J. Oper. Res.*, no. 237, pp. 1083–1094, 2014.
- [131] L. Janjić, A., Stanković, M., Velimirović, "Smart Grid Strategy Assessment Using the Fuzzy AHP, Zbornik radova," in *ICT FORUM*, 2014, pp. 13–18.
- [132] M. S. Janacković, G.L., Savić, S.M., Stanković, "Selection and ranking of occupational safety indicators based on fuzzy AHP: a case study in road construction companies," *South African J. Ind. Eng.*, vol. 24, no. 3, pp. 175–189, 2013.
- [133] G.-F. M., "Multicriteria optimization in a fuzzy environment: the fuzzy Analytic hierarchy process," *Yugosl. J. Oper. Res.*, vol. 20, no. 1, pp. 71–85, 2010.
- [134] J. J. Buckley, "Fuzzy hierarchical analysis," *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 17, no. 3, pp. 233–247, Dec. 1985, doi: 10.1016/0165-0114(85)90090-9.

- [135] L. M. Seiford, "Data envelopment analysis: The evolution of the state of the art (1978-1995)," *J. Product. Anal.*, vol. 7, no. 2-3, pp. 99-137, 1996.
- [136] J.-P. Brans and B. Mareschal, "Promethee Methods," in *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, New York: Springer-Verlag, pp. 163-186. doi: 10.1007/0-387-23081-5_5.
- [137] P. Brans, J. P., Mareschal, B., Vincke, "PROMETHEE: a new family of outranking methods in MCDM, in Brans, J. P. (Eds.) *Operational Research'84*," in *Proceedings of the Tenth IFORS International Conference on Operational Research, Washington, USA*, pp. 477-490.
- [138] J. P. Brans and P. Vincke, "Note—A Preference Ranking Organisation Method," *Manage. Sci.*, vol. 31, no. 6, pp. 647-656, Jun. 1985, doi: 10.1287/mnsc.31.6.647.
- [139] B. Brans, J. P., Mareschal, *How to Decide with Promethee, ULB and VUB Brussels Free Universities*, <http://smg.ulb.ac.be>.
- [140] M. Goumas and V. Lygerou, "An extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 123, no. 3, pp. 606-613, Jun. 2000, doi: 10.1016/S0377-2217(99)00093-4.
- [141] R. O. Parreiras, J. H. R. D. Maciel, and J. A. Vasconcelos, "The a posteriori decision in multiobjective optimization problems with smarts, promethee II, and a fuzzy algorithm," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 4, pp. 1139-1142, Apr. 2006, doi: 10.1109/TMAG.2006.871986.
- [142] M. . Vilke, S., Krpan, Lj., Milković, "Application of the Multi-Criteria Analysis in the Process of Road Route Evaluation," *Teh. Vjesn. - Tech. Gaz.*, vol. 25, no. 6, Dec. 2018, doi: 10.17559/TV-20170530085451.
- [143] R. Z. Farahani and N. Asgari, "Combination of MCDM and covering techniques in a hierarchical model for facility location: A case study," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 176, no. 3, pp. 1839-1858, Feb. 2007, doi: 10.1016/j.ejor.2005.10.039.
- [144] M. Behzadian, R. B. Kazemzadeh, A. Albadvi, and M. Aghdasi, "PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications," *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 200, no. 1, pp. 198-215, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.ejor.2009.01.021.
- [145] C. A. V. Cavalcante and A. T. de Almeida, "A multi-criteria decision-aiding model using PROMETHEE III for preventive maintenance planning under uncertain conditions," *J. Qual. Maint. Eng.*, vol. 13, no. 4, pp. 385-397, Oct. 2007, doi: 10.1108/13552510710829470.
- [146] M. Kovačić, "Selecting the Location of a Nautical Tourism Port by Applying PROMETHEE And GAIA Methods Case Study – Croatian Northern Adriatic," *PROMET - Traffic&Transportation*, vol. 22, no. 5, pp. 341-351, Mar. 2012, doi: 10.7307/ptt.v22i5.199.
- [147] W. Li and B. Li, "An extension of the Promethee II method based on generalized fuzzy numbers," *Expert Syst. Appl.*, vol. 37, no. 7, pp. 5314-5319, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.eswa.2010.01.004.
- [148] A. Roozbahani, B. Zahraie, and M. Tabesh, "PROMETHEE with Precedence Order in the Criteria (PPOC) as a New Group Decision Making Aid: An Application in Urban Water Supply Management," *Water Resour. Manag.*, vol. 26, no. 12, pp. 3581-3599,

- Sep. 2012, doi: 10.1007/s11269-012-0091-4.
- [149] S. Corrente, S. Greco, and R. Słowiński, "Multiple Criteria Hierarchy Process with ELECTRE and PROMETHEE," *Omega*, vol. 41, no. 5, pp. 820–846, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.omega.2012.10.009.
- [150] S.-F. Liu, Jian, Z., Hong, K., Zhao-Bin, Liu, "Decision process in MCDM with large number of criteria and heterogeneous risk preferences," *Oper. Res. Perspect.*, no. 4, pp. 106–112, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.orp.2017.07.00>.
- [151] G. Marković, M. Gašić, M. Kolarević, M. Savković, and Z. Marinković, "Application of the MODIPROM method to the final solution of logistics centre location," *Transport*, vol. 28, no. 4, pp. 341–351, Dec. 2013, doi: 10.3846/16484142.2013.864328.
- [152] G. Marković, N. Zdravković, M. Karakašić, M. Kolarević, "Modified PROMETHEE Approach for Solving Multi-Criteria Location Problems with Complex Criteria Functions," *Teh. Vjesn. - Tech. Gaz.*, vol. 27, no. 1, Feb. 2020, doi: 10.17559/TV-20190225151515.
- [153] J. Tzeng, H., Huang, *Multiple attribute decision making methods and applications*, CRC Press Taylor & Francis Group, LLC, 2011. 2011.
- [154] M. Kolarević, *Istraživanje i identifikacija međuzavisnosti parametara relevantnih za ubrzanu izradu prototipa, doktorska disertacija, Univerzitet u Kragujevcu, Mašinski fakultet u Kraljevu, Kraljevo, 2003.* 2003.
- [155] M. Kolarević, *Brzi razvoj proizvoda, Zadužbina Andrejević, Beograd.* 2004.
- [156] C. C.A., *Simulation Modelling Handbook: A Practical Approach*, CRC Press, Boca Raton, Florida. 2004.
- [157] В. Грковић, "Развој модела за интеграцију система одлучивања у процес конфигурације сложених производа, докторска дисертација, Универзитет у Крагујевцу, Факултет за машинство и грађевинарство у Краљеву, Краљево," 2020.
- [158] *Glavni projekat autoceste dionice Medakovo-Ozimica, Knjiga II020 PROJEKAT ZAŠTITE OD BUKE, LOT 2 od km 0-300,00 do km20+813,26, Broj projekta: 20-8682, KONZORCIJ: DIVEL d.o.o. Sarajevo, IPSA INSTITUT d.o.o. Sarajevo, INTEGRA d.o.o. Mostar, DESIGN & QC d.o.*

Биографија кандидата

Виолета Ђорђевић је рођена 17.09.1975. године у Крушевцу. Основну и средњу школу је завршила у Трстенику, као носилац Вукове дипломе, образовни профил машински техничар.

1997. године завршава Вишу Техничку Машинску школу у Трстенику, смер Производно машинство, са просечном оценом 9.25, као најбољи студент у генерацији.

Од 1997. до 2009. године радила је у Кочној Техници - Прва Петолетка Трстеник, као технолог нових програма.

Након завршене ВТМШ у Трстенику, са просечном оценом 9.42, уписује Факултет за машинство и грађевинарство (тада Машински факултет) у Краљеву, смер Машинско инжењерство – Производне технологије, где завршава основне академске студије 2012. године, са просечном оценом 9.03 и мастер академске студије 2014. године, са просечном оценом 9.90, као најбољи студент који је стекао звање мастер инжењер машинства. На истом факултету уписује докторске студије 2014. године. Положила је све испите према наставном плану са просечном оценом 10.

Од 2016. године ради на ВТМШСС у Трстенику (сада Академија струковних студија Шумадија, одсек Трстеник). Од 2016. до 2018. године ради као сарадник у настави, а од 2018. у звању асистента струковних студија за ужу стручну област Производно машинство на Катедри за машинско и индустријско инжењерство.

2018. године је ангажована на пројекту „Јачање трансверзалних компетенција струковних инжењера машинства/ЈАКСИМ“, финансиран од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја у оквиру програмске активности „Развој високог образовања“, бр. пројекта 451-02-02716/2018-06.

Од 2021. године обавља функцију секретара Катедре за машинско и индустријско инжењерство.

Као аутор и коаутор објавила је 2 рада у међународним часописима са SCI листе и преко 75 радова на домаћим и међународним конференцијама и часописима.

ИЗЈАВА АУТОРА О ОРИГИНАЛНОСТИ ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

Изјављујем да докторска дисертација под насловом:

Развој модела одлучивања у процесу конфигурисања модуларних звучних баријера

представља *оригинално ауторско дело* настало као резултат *сопственог истраживачког рада*.

Овом Изјавом такође потврђујем:

- да сам *једини аутор* наведене докторске дисертације,
- да у наведеној докторској дисертацији *нисам извршио/ла повреду* ауторског нити другог права интелектуалне својине других лица,

У Краљеву, 14.10.2024. године,


потпис аутора

***ИЗЈАВА АУТОРА О ИСТОВЕТНОСТИ ШТАМПАНЕ И ЕЛЕКТРОНСКЕ ВЕРЗИЈЕ
ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ***

Изјављујем да су штампана и електронска верзија докторске дисертације под насловом:

**Развој модела одлучивања у процесу конфигурисања модуларних звучних
баријера**

истоветне.

У Краљеву, 14.10.2024. године,



потпис аутора

ИЗЈАВА АУТОРА О ИСКОРИШЋАВАЊУ ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Ја, Виолета Ђорђевић,

☒ дозвољавам

☐ не дозвољавам

Универзитетској библиотеци у Крагујевцу да начини два трајна умножена примерка у електронској форми докторске дисертације под насловом:

Развој модела одлучивања у процесу конфигурисања модуларних звучних баријера

и то у целини, као и да по један примерак тако умножене докторске дисертације учини трајно доступним јавности путем дигиталног репозиторијума Универзитета у Крагујевцу и централног репозиторијума надлежног министарства, тако да припадници јавности могу начинити трајне умножене примерке у електронској форми наведене докторске дисертације путем *преузимања*.

Овом Изјавом такође

☒ дозвољавам

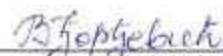
☐ не дозвољавам¹

припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од следећих *Creative Commons* лиценци:

¹ Уколико аутор изабере да не дозволи припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци, то не искључује право припадника јавности да наведену докторску дисертацију користе у складу са одредбама Закона о ауторском и сродним правима.

- 1) Ауторство
- 2) Ауторство - делити под истим условима
- ③ Ауторство - без прерада
- 4) Ауторство - некомерцијално
- 5) Ауторство - некомерцијално - делити под истим условима
- 6) Ауторство - некомерцијално - без прерада²

У Краљеву, 14.10.2024. године,


потпис аутора

² Молимо ауторе који су изабрали да дозволе припадницима јавности да тако доступну докторску дисертацију користе под условима утврђеним једном од *Creative Commons* лиценци да заокруже једну од понуђених лиценци. Детаљан садржај наведених лиценци доступан је на: <http://creativecommons.org.rs/>