

А Г Р А Р Е Н У Н И В Е Р С И Т Е Т - П л о в д и в
Л о з а р о – Г Р А Д И Н А Р С К И Ф А К У Л Т Е Т

К а т е д р а Г Р А Д И Н А Р С Т В О

МАРИЯ ПЕТКОВА ГРОЗЕВА

**Типология и методи за шумозащита чрез използването на зелени
насаждения в градска среда**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за присъждане на образователната и научна степен “Доктор”

Научна специалност: Декоративни растения

НАУЧНИ РЪКОВОДИТЕЛИ:

ПРОФ. д-р Валерия Иванова
Доц. д-р Димка Хайтова

ПЛОВДИВ, 2026 г.

Дисертационният труд е написан на 210 страници и съдържа 29 таблици и 30 фигури. В списъка на цитираната литература са посочени 157 източника, от които 35 на кирилица и 122 на латиница.

Експерименталната работа по темата е изведена на територията на агломерация София (обхващаща 19 системни постоянни контролни точки и допълнителни специализирани локации в рамките на проектните казуси) през периода на докторантурата

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от катедреният съвет на катедра „Градинарство“, Лозаро - градинарски факултет при Аграрен Университет – Пловдив.

Защитата на дисертацията ще се състои на**2026**г. от часа в зала на лозаро-градинарския факултет на АУ - Пловдив на заседание на Специализираното научно жури, назначено от Ректора на Аграрния университет със **Заповед №2026** г., в състав:

Рецензии от:

.....
.....

Становища от:

.....
.....
.....

Благодарности

С искрена признателност към научните ми ръководители

ПРОФ. д-р Валерия Иванова
Доц. д-р Димка Хайтова

Благодаря на колектива на катедра “Градинарство” за съветите, подкрепата, помощта и добронамереното отношение, които високо ценя.

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се на сайта на Аграрния университет – Пловдив – www.au-plovdiv.bg

УВОД И АКТУАЛНОСТ НА ПРОБЛЕМА

Устойчивото развитие на съвременния град е изключително сложна, многопластова задача, която отдавна надхвърли рамките на традиционното инженерно планиране. Неговата висша цел е да съхрани екологичния баланс в местата, които обитаваме, и да защити правото на гражданите на благоприятна и здравословна жизнена среда. Стремехът към интензивен икономически растеж, застрояване и мобилност в големите агломерации обаче генерира един от най-агресивните и всепроникващи замърсители на съвременното общество – антропогенния транспортен шум.

Акустичният дискомфорт в урбанизираните територии отдавна е престанал да бъде просто досадно неудобство или локален естетически проблем. Според категоричните данни на Световната здравна организация (WHO) и редица епидемиологични проучвания, шумът функционира като мощен хроничен стресов фактор – „невидим враг“, който нанася трайни, кумулативни поражения върху физическото и психическото здраве на населението, увеличавайки риска от сърдечно-съдови заболявания, когнитивни дефицити и нарушения на съня.

Традиционното градоустройство разчита предимно на конвенционални „твърди“ инженерни мерки – изграждат се масивни бетонови или поликарбонатни шумозащитни стени. Тези съоръжения притежават доказана акустична ефективност, но често действат като чужди тела в градската тъкан, разкъсват визуалните оси, нарушават естествената аерация и създават усещане за социална изолация на прилежащите територии. В този контекст се разкрива огромният, но все още недостатъчно проучен и систематизиран потенциал на екологичната инфраструктура и по-конкретно на зелените шумозащитни фитоекрани.

За разлика от изкуствените инженерни бариери, растителният пояс не просто отразява звуковата вълна. Той представлява сложна биологична система, която трансформира звуковата енергия чрез синергия от физични процеси – абсорбция от порестата структура на биомасата и почвата, дифракция около короните и многократно вътрешно разсейване. Едновременно с това фитоекраните осигуряват незаменими екосистемни ползи – пречистват въздушните маси от фини прахови частици (ФПЧ) и газови емисии, регулират градския топлинен остров и обогатяват ландшафтната среда. В България и в частност за условията на Софийската агломерация обаче липсва цялостен, научно валидиран приложен инструментариум, който да обвърже дендрологичния състав и пространствената архитектура на насажденията с конкретни количествени изчисления на затихващия ефект. Настоящият дисертационен труд е насочен към запълването на тази сериозна научно-приложна празнина.

2. ЦЕЛ, ЗАДАЧИ И РАБОТНА ХИПОТЕЗА

Цел на изследването:

Целта на настоящия дисертационен труд е да се разработи научно обоснована концепция, обхващаща пространствено-функционални типологични модели и методически указания за изграждане на високоефективни зелени шумозащитни екрани, както и да се количествено изрази фитоакустичният потенциал на специфичен референтен асортимент от дървесно-храстови видове в реалните екологични условия на агломерация София.

Задачи

на

изследването:

1. Систематизиране и детайлен анализ на физико-биологичните механизми на разпространение, поглъщане и разсейване на звуковите вълни през растителни масиви.
2. Провеждане на системен инструментален мониторинг **in situ** в избрани контролни точки по главната улична мрежа на гр. София.

3. Експериментално установяване и количествено измерване на влиянието на сезонния фактор (фенологичните фази на облистване и покой) върху изолационния капацитет на широколистните и иглолистните пояси.
4. Извършване на многокритериален дендрологичен анализ и оценка на екологичната пластичност и газоустойчивост на приоритетни видове в условия на антропогенен стрес.
5. Разработване на цифрови фитоакустични модели и създаване на оригинална Конструктивна типология на фитоекраните (Тип 1, Тип 2 и Тип 3) за практическо приложение.

Работна хипотеза:

Изследването се базира на научната хипотеза, че акустичната ефективност на растителните прегради не е проста линейна функция на общата количество биомаса, а се намира в нелинейна зависимост от вътрешната структурна организация на насаждението (етажност, гъстота, микроморфология), неговото отстояние от източника и сезонната фенологична динамика. Допуска се, че правилно конструирани многоетажни фитоекрани могат да осигурят акустична защита, напълно съпоставима с класическите технически съоръжения.

3. ОБЕКТ, ПРЕДМЕТ И МЕТОДИКА НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

3.1. Обект и предмет на изследването

Обект на изследването е градската среда на агломерация София. Експериментално-аналитичната база на дисертационния труд обхваща два паралелни потока от емпирични данни:

1. **Системна мониторингова мрежа:** Включва 19 постоянни контролни точки, ситуирани по протежение на главната улична мрежа (градски магистрали и булеварди), които дефинират общия шумов климат на столичния град.
2. **Специфични проектни локации:** Обхващат конкретни експериментални и реално верифицирани обекти (линеен парк бул. „Македония“, бул. „Никола Вапцаров“, ЖК „Зелин“, Ботевград“ и Търговски комплекс „Технополис“), където са проведени специализирани серии от акустични измервания за нуждите на пространственото моделиране и отчитането на реалната ефективност на фитоекраните.

Предмет на изследването са нивата на антропогенно акустично натоварване, генерирано от автомобилния трафик, и структурно-морфологичните параметри на прилежащата дървесно-храстова растителност.

3.2. Материал на изследването и екологична селекция Изследваният материал обхваща съществуващата дървесно-храстова растителност, използвана за формиране на линейни защитни структури. В рамките на изследването изборът на целеви дендрологичен материал е строго съобразен със спецификите на умереноконтиненталния климат, локалните почвени условия и орографията на Софийската котловина (чести температурни инверсии, летни засушавания и високо ниво на антропогенно натоварване).

За да се гарантира дългосрочната ефективност на изгражданите защитни структури, видовете са класифицирани въз основа на тяхната екологична пластичност. (Табл.1)

- **Адаптивност към градски стрес:** Приоритизирани са таксони, способни да толерират тежко почвено запечатване, уплътняване и зимно засоляване (напр. *Robinia pseudoacacia* и *Acer negundo*).
- **Темпорална динамика на екранирането:** Интегрирани са бързорастящи пионерни видове (*Populus x canadensis*) за постигане на ранна защита в съкратени срокове (3-5 години), съчетани с дълголетни климаксови видове (*Quercus robur*) за формиране на устойчив скелет.

- **Фенологична динамика:** Времето на поява и опадване на листната маса е детерминиращ фактор. Задължително е включването на вечнозелени таксони (*Picea abies*, *Pinus nigra*), които изпълняват ролята на акустичен буфер през зимния период, когато поради температурните инверсии разпространението на звука е най-интензивно.

3.3. Показатели, критерии и методика на изследването За целите на настоящия дисертационен труд е разработена и приложена комплексна изследователска методика, която интегрира количествени (прецизни инструментални замервания) и качествени (експертно-аналитични) подходи. Основната концептуална рамка е проектирана като сравнителен сезонен анализ.

3.3.1. Инструментариум и техническа спецификация Инструменталният акустичен мониторинг *in situ* е осъществен посредством специализиран цифров шумомер модел SL300, съответстващ на изискванията на международния стандарт за електроакустика DIN EN 61672-1 (Клас 2). Изборът на този портативен уред е продиктуван от необходимостта за мобилност и издръжливост на прах и вибрации в тежка урбанизирана среда. Допустимата грешка от ± 1.4 dB(A) напълно удовлетворява изискванията за експертен мониторинг и сравнителен анализ. Работни параметри на измервателната система:

- **Честотен диапазон:** 31.5 Hz - 8 kHz. Обхваща пълноценно както нискочестотните емисии (от двигателите), така и височестотния аеродинамичен шум (от триенето на гумите).

- **Времеви константи:** Използван е режим **FAST (125ms)** за прецизно идентифициране на краткотрайни шумови транзienti от единични автомобили, и режим **SLOW (1s)** за изчисляване на стабилни еквивалентни нива на шума (LAeq) от общия транспортен поток.

3.3.2. Комбиниран метод на експертно оценяване Освен инструменталното регистриране, методиката интегрира мултикритериен анализ на биологичния фактор и физичната среда:

1. **Дендрологична експертиза:** Извършва се на терен и оценява биологичното състояние, архитектурата на короната (наличие на „акустични пролуки“ в подлеса) и структурния произход на насаждението.

2. **Оценка на условията на средата:** Включва инфраструктурен одит на пътната настилка и локалната топография (наличие на отразяващи фасади). Акустичните замервания се провеждат при строго контролиран абиотичен фактор: сухо пътно платно, липса на валежи, относителна влажност под 90% и скорост на вятъра под 5 m/s, за да се елиминира рефракцията на вълните.

3.3.3. Алгоритъм на теренните измервания Теренните измервания се провеждат по двустепенен линеен модел, който позволява директно изчисляване на реалния изолационен капацитет на бариерата, дефиниран като внасяна загуба (**IL – Insertion Loss**). Микрофонът се позиционира на височина 1.2 до 1.5 метра от терена.

- **Етап 1: Измерване при източника (Emission Point):** Извършва се на границата на пътното платно за установяване на „суровата“ емисия. Измерванията се правят в два времеви прозореца:

- **Сутрешен върхов час (08:00 – 08:30 ч.):** Отчитане на екстремното акустично натоварване.
- **Следобеден междупиков период (14:00 – 14:30 ч.):** Отчитане на базовия работен фон.

- **Етап 2: Измерване зад защитната бариера (Immission Point):** Извършва се на регламентирано отстояние от 15 метра спрямо източника, в геометричния център зад растителния пояс.

- **Сезонен индикатор:** Замерванията се повтарят при абсолютно идентични топологични условия през **лятото** (максимална листна маса) и през **зимата** (обезлистена структура), което позволява прецизно калкулиране на сезонната загуба на акустична ефективност.

Таблица 1.

Акустични и аерационни параметри на изследвания материал

Параметър на модела	Видове с високи показатели	Акустично и екологично влияние
Висока плътност на короната	<i>Picea abies, Thuja occidentalis, Acer platanoides</i>	Максимална абсорбция на високочестотния спектър на шума и интензивно прахозадържане.
Висока ажурност (Пропускливост)	<i>Betula pendula, Fraxinus excelsior, Gleditsia triacanthos</i>	Подобрява вертикалния пренос на въздушни маси, осигурява аерация и предотвратява газовата стагнация.
Развита коренова система	<i>Robinia pseudoacacia, Acer campestre</i>	Осигурява повишена механична стабилност; ключова за укрепване на крайпътни откоси.
Листна микроморфология (Власинки)	<i>Tilia tomentosa</i>	Оптимизира специфичната листна повърхност (SLA); власинките действат като микро-капани за улавяне на ФПЧ.
Сезонна перманентност (Вечнозелен хабитус)	× <i>Cupressocyparis leylandii, Taxus baccata</i>	Елиминира фенологичния срыв на екрана през зимата; осигурява постоянен акустичен импеданс.
Толерантност към формоване (Базална компактност)	<i>Ligustrum vulgare, Prunus laurocerasus</i>	Позволява изграждане на плътни структури в ограничени пространства; затваря „акустичните прозорци“.

3.3. Методика на изследването, показатели и критерии За осигуряване на висока научна достоверност е приложена комплексна методика, включваща инструментален акустичен мониторинг *in situ* чрез цифров прецизен шумомер модел SL300 (съответстващ на Клас 2 по стандартите IEC 61672), съчетан със сравнителен сезонен анализ (период на пълно облистване през лятото спрямо период на биологичен покой и обезлистване през зимните месеци). Инструментариумът работи в честотен диапазон 31.5 Hz - 8 kHz, обхващащ напълно както нискочестотните емисии, така и високочестотния аеродинамичен шум, с използване на времеви константи FAST (125ms) и SLOW (1s).

Подборът на 19-те измервателни локации е строго съобразен със степента на акустично натоварване (зони над 65–75 dB(A)), функционалното предназначение (Жк, Оо, Смф) и наличното дендрологично разнообразие на конкретните локации. (Табл.2., Табл.3)

Таблица 2

Географска локализация и обосновка на основните измервателни точки (Група А)

№ Точка	Местоположение (Обект)	Географски координати (N, E)	Мотиви за подбор и характеристики
1	Околовръстен път (Shell)	42.651203, 23.290368	Интензивен транзитен трафик, гладък асфалт
2	Околовръстен път (Бояна)	42.654899, 23.278044	Висока скорост на движение, представителна зона
3	Околовръстен път (Бояна)	42.654925, 23.278051	Контролна точка за акустична прецизност

4	Бул. „България“	42.657502, 23.285432	Смесен трафик (автомобилен и релсов)
5	Ул. „Ген. Стефан Тошев“	42.670417, 23.281283	Вътрешноквартална артерия с жилищни сгради
6	Ул. „Хенрик Ибсен“	42.661358, 23.304905	Зона с интензивно търговско застрояване
7	Бул. „Г. М. Димитров“	42.662453, 23.356160	Висока концентрация на обществени сгради
8	Бул. „Цар Борис III“	42.672955, 23.273727	Паркова среда, специфичен нискочестотен шум
9	Бул. „П. Дертлиев“	42.712889, 23.275320	Граница между жилищна зона и Западен парк
10	Бул. „Андрей Ляпчев“	42.649163, 23.373672	Свързваща артерия с висок дебит на трафика
11	Бул. „Ал. Малинов“ (39 СУ)	42.640256, 23.371611	Акустична защита на образователно заведение
12	Бул. „Ал. Малинов“	42.639650, 23.371455	Плътнo жилищно застрояване и пешеходни зони
13	Бул. „Ботевградско шосе“	42.707512, 23.408505	Входно-изходна магистрална артерия

Таблица 3

**Специализирани точки за линеен профил по бул. „Александър Малинов“
(Група Б)**

№ Точка	Описание на специфичния участък	Географски координати (N, E)	Характер на зоната
Т.М1	Южен участък (Младост 4)	42.627748, 23.372458	Вход от Южна дъга
Т.М2	Район метростанция „Бизнес парк“	42.633913, 23.372440	Офис и търговска зона
Т.М3	Централна част (Младост 3)	42.642097, 23.372618	Гъста жилищна структура
Т.М4	Бизнес зони и административни сгради	42.646052, 23.375084	Висока динамика на трафика
Т.М5	Участък Младост 2	42.650764, 23.378181	Жилищно-търговска зона
Т.М6	Северен участък (Цариградско шосе)	42.654652, 23.381688	Транспортен възел

Теренните измервания се провеждат по двустепенен линеен модел за определяне на внасяната загуба (Insertion Loss — IL):

- **Етап 1 (При източника):** Замерване на еквивалентното ниво на звука (L_{Aeq}) непосредствено на бордюра на пътното платно за отчитане на първичната шумова емисия.
- **Етап 2 (В защитената зона):** Паралелно замерване на отстояние 15 метра в геометричния център зад съществуващия растителен масив.

Всички измервания се извършват при стриктно спазване на метеорологичните изисквания (скорост на вятъра под 5 m/s, липса на валежи и суха настилка).

4. АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ТЕРЕННИТЕ ИЗСЛЕДВАНИЯ (Status quo и проектни казуси)

Емпиричната част на настоящия дисертационен труд се фокусира върху детайлния анализ на акустичната среда в агломерация София чрез провеждане на серии от прецизни инструментални *in situ* измервания. Инструменталните измервания в

Етап 1 (на границата на платното) потвърждават присъствието на устойчиво високоенергиен шумов фон. Средните еквивалентни нива (L_{Aeq}) варират от 72.4 dB(A) до 73.2 dB(A) в по-голямата част от локациите, което категорично надвишава критичния праг на акустичен комфорт, дефиниран в националната нормативна уредба (Наредба № 6).(Табл.4)

Таблица 9

Измервания на терен при шумовият източник /бул „Ал.Малинов“

Данни от измервания – Т.1			
Трафикопоток - Постоянен	Настилка - Гладък асфалт	Път - Двупосочен общо 4 ленти	Метеорологична обстановка - сухо, без вятър
Измерване			
Начален Час 8.00		Краен Час 8.30	Продължителност 30мин
Ниво на шума			
Средно dB(A) - 72,2		Най ниски нива dB(A) - 71,1	Най високи нива dB(A) – 73,3
Начален Час 14.00		Краен Час 14.30	Продължителност 30мин
Ниво на шума			
Средно dB(A) – 71,8		Най ниски нива dB(A) - 70.5	Най високи нива dB(A) – 73.1

Данни от измервания – Т.2			
Трафикопоток - Постоянен	Настилка - Гладък асфалт	Път - Двупосочен общо 4 ленти	Метеорологична обстановка - сухо, без вятър
Измерване			
Начален Час 8.00		Краен Час 8.30	Продължителност 30мин
Ниво на шума			
Средно dB(A) - 72,3	Средно dB(A) - 72,3	Най ниски нива dB(A) - 70,1	Най високи нива dB(A) – 73,3
Начален Час 14.00		Краен Час 14.30	Продължителност 30мин
Ниво на шума			
Средно dB(A) – 72,45	Средно dB(A) - 72,9	Най ниски нива dB(A) - 71,5	Най високи нива dB(A) – 73,4

Данни от измервания – Т.3			
Трафикопоток - Постоянен	Настилка - Гладък асфалт	Път - Двупосочен общо 4 ленти	Метеорологична обстановка - сухо, без вятър
Измерване			
Начален Час 8.00		Краен Час 8.30	Продължителност 30мин
Ниво на шума			
Средно dB(A) - 71,75		Най ниски нива dB(A) - 70,1	Най високи нива dB(A) – 73,4
Начален Час 14.00		Краен Час 14.30	Продължителност 30мин
Ниво на шума			
Средно dB(A) – 72,45		Най ниски нива dB(A) - 71,5	Най високи нива dB(A) – 73,4

Данни от измервания – Т.4			
----------------------------------	--	--	--

Трафикопоток Постоянен	-	Настилка - Гладък асфалт	Път - Двупосочен общо 4 ленти	Метеорологична обстановка - сухо, без вятър
Измерване				
Начален Час 8.00		Краен Час 8.30		Продължителност 30мин
Ниво на шума				
Средно dB(A) – 71,8		Най ниски нива dB(A) - 70,3		Най високи нива dB(A) – 73,3
Начален Час 1.00		Краен Час 12.30		Продължителност 30мин
Ниво на шума				
Средно dB(A) – 71,95		Най ниски нива dB(A) - 71,5		Най високи нива dB(A) – 72,4

Данни от измервания – Т.5				
Трафикопоток Постоянен	-	Настилка - Гладък асфалт	Път - Двупосочен общо 4 ленти	Метеорологична обстановка - сухо, без вятър
Измерване				
Начален Час 8.00		Краен Час 8.30		Продължителност 30мин
Ниво на шума				
Средно dB(A) – 71,05		Най ниски нива dB(A) – 69,8	Най високи нива dB(A) – 72,3	
Начален Час 12.00		Краен Час 12.30		Продължителност 30мин
Ниво на шума				
Средно dB(A) – 72.25		Най ниски нива dB(A) - 71.6	Най високи нива dB(A) – 72.9	

Данни от измервания – Т.6				
Трафикопоток - Постоянен		Настилка - Гладък асфалт	Път - Двупосочен общо 4 ленти	Метеорологична обстановка - сухо, без вятър
Измерване				
Начален Час 8.00		Краен Час 8.30		Продължителност 30мин
Ниво на шума				
Средно dB(A) – 71,15		Най ниски нива dB(A) - 70		Най високи нива dB(A) – 72,3
Начален Час 12.00		Краен Час 12.30		Продължителност 30мин
Ниво на шума				
Средно dB(A) - 73,2		Най ниски нива dB(A) - 71,5		Най високи нива dB(A) – 73,4

- Аномалия в междупиковия интервал: В локации Т.2 – Т.6 се наблюдава повишаване на еквивалентните нива в 14:00 ч. спрямо сутрешния върхов час (08:00 ч.). От научно-експертна гледна точка, този феномен се обяснява с динамиката на т. нар. „свободен поток“ (free-flow traffic). При намаляване на транспортната плътност и отсъствие на засилен трафик (задръствания), средната скорост на движение се покачва. Това води до експоненциално нарастване на високочестотния шум от триенето на гумите (*tire-pavement noise*), който при гладка асфалтова настилка започва да доминира над нискочестотния двигателен шум при скорости над 50 км/ч.

- Стабилност на емисията:**

Постоянният характер на транспортния поток, визуализиран чрез минималната амплитуда между L_{min} и L_{max} (от едва 2–3 dB(A)), дефинира източника като класически „линеен източник на шум“. Тази констатация е критична за ландшафтното проектиране, тъй като доказва необходимостта от изграждането на непрекъсната, линейна растителна бариера, без допускане на пространствени фрагментации (пролуки).

4.1. Диагностичен и аналитичен етап (Теренни изследвания и Status quo) Първият етап обхваща инструменталното измерване и комплексния анализ на съществуващото положение в урбанизираната среда. (Табл.5.) При анализа на данните от системната мрежа (напр. по протежение на интензивни магистрални профили като бул. „Александър Малинов“ и бул. „Ботевградско шосе“) се установи фундаментален структурен дефицит. Голяма част от линейните крайулични пояси са съставени от еднородни широколистни дървесни видове с високо вдигнати корони и изцяло оголени стъбла. При липсата на базален (храстов) етаж се формира т.нар. „акустичен тунел“ в приземния слой (от 0 до 2–3 метра височина).(Табл.6)

Таблица 5.

Измервания на терен - 15м от шумовият източник бул., ал. малинов“

N	ЗОНА СПОРЕД ОУП СО	ЧАС	РЕФ. СТОЙНОСТ И dB(A)	ПРЕДИ растителната бариера dB(A)	СЛЕД растителната бариера dB(A)	ВИД НАСАЖДЕНИЕ СПОРЕД СЪЗДАВА НЕТО МУ	СТРУКТУРА НА НАСАЖДЕНИЕТО	БРОЙ РЕДОВЕ растителност	ШИРОЧИНА (м.) на шумовата бариера	ВИДОВ СЪСТАВ НА РАСТИТЕЛНАТА БАРИЕРА
1	Тго - Терени на локални градини и озеленяване	8-8,30 ч	60	75,5	50,2	антропогенни	свободни	4	15	Fraxinus excelsior (I-величина), Acer campestre (I-величина), Robinia pseudoacacia (I-величина) - основен / Picea abies (I-величина), Prunus cerasifera (II-величина), Juglans regia (I-величина) - вторичен
	Тго - Терени на локални градини и озеленяване	14-14,30ч	60	76,1	51,4	антропогенни	свободни	4	15	Fraxinus excelsior (I-величина), Acer campestre (I-величина), Robinia pseudoacacia (I-величина) - основен / Picea abies (I-величина), Prunus cerasifera (II-величина), Juglans regia (I-величина) - вторичен
2	Жк - Жилищна зона с преобладаващо комплексно застрояване	8-8,30 ч	60	70,3	58,5	антропогенни	свободни	4	15	Fraxinus excelsior (I-величина), Acer campestre (I-величина), Populus alba (I-величина) - основен / Picea abies (I-величина), Betula pendula (I-величина) - вторичен
	Жк - Жилищна зона с преобладаващо комплексно застрояване	14-14,30ч	60	74,6	62,5	антропогенни	свободни			Fraxinus excelsior (I-величина), Acer campestre (I-величина), Populus alba (I-величина) - основен / Picea abies (I-величина), Betula pendula (I-величина) - вторичен
3	Жк - Жилищна зона с преобладаващо комплексно застрояване	8-8,30 ч	60	70,3	67,5	0	няма	0	0	0

N	ЗОНА СПОРЕД ОУП СО	ЧАС	РЕФ. СТОЙНОСТ И dB(A)	ПРЕДИ растителната бариера dB(A)	СЛЕД растителната бариера dB(A)	ВИД НАСАЖДЕНИЕ СПОРЕД СЪЗДАВА НЕТО МУ	СТРУКТУРА НА НАСАЖДЕНИЕТО	БРОЙ РЕДОВЕ растителност	ШИРОЧИНА (м.) на шумовата бариера	ВИДОВ СЪСТАВ НА РАСТИТЕЛНАТА БАРИЕРА
	Жк - Жилищна зона с преобладаващо комплексно застрояване	14-14,30ч	60	74,6	67,5	0	няма	0	0	0
4	Смф - Смесена многофункционална зона	8-8,30ч	60	72,4	60,5	антропогенни	редови	4	15	Fraxinus americana (I-величина), Tilia cordata (I-величина) - основен / Betula pendula (I-величина), Acer campestre (I-величина) - вторичен
	Смф - Смесена многофункционална зона	14-14,30ч	60	74,3	60,9	антропогенни	редови	4	15	Fraxinus americana (I-величина), Tilia cordata (I-величина) - основен / Betula pendula (I-величина), Acer campestre (I-величина) - вторичен
5	Смф - Смесена многофункционална зона	8-8,30ч	60	72,4	60,5	антропогенни	редови	4	15	Fraxinus americana (I-величина), Tilia cordata (I-величина) - основен / Betula pendula (I-величина), Acer campestre (I-величина) - вторичен
	Смф - Смесена многофункционална зона	14-14,30ч	60	74,3	60,9	антропогенни	редови	4	15	Fraxinus americana (I-величина), Tilia cordata (I-величина) - основен / Betula pendula (I-величина), Acer campestre (I-величина) - вторичен
6	Смф - Смесена многофункционална зона	8-8,30ч	60	72,4	60,5	антропогенни	редови	4	15	Fraxinus americana (I-величина), Tilia cordata (I-величина) - основен / Betula pendula (I-величина), Acer campestre (I-величина) - вторичен
	Смф - Смесена многофункционална зона	14-14,30ч	60	74,3	60,9	антропогенни	редови	4	15	Fraxinus americana (I-величина), Tilia cordata (I-величина) - основен / Betula pendula (I-величина), Acer campestre (I-величина) - вторичен

Таблица 6.

Извадка от измервания на терен при шумовия източник и в защитена зона (бул. „Ал. Малинов“)

Локация (Зона ОУП)	Средно ниво при източника dB(A)	Ниво зад бариерата (15м) dB(A)	Редукция (IL)	Структура на бариерата и видов състав
T.1 (Тро)	72.2	50.2	25.3	4 реда. <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Acer campestre</i> , <i>Robinia pseudoacacia</i> , <i>Picea abies</i> .
T.3 (Жк)	72.45	67.5	2.8	Контролна точка. Липсва растителност (само пространствена дивергенция).
T.4 (Смф)	71.8	60.5	11.9	4 реда. <i>Fraxinus americana</i> , <i>Tilia cordata</i> , <i>Betula pendula</i> , <i>Acer campestre</i> .

4.2. Сравнителен сезонен анализ (Лято – Зима) Анализирани са емпиричните данни от 13 стратегически измервателни точки, разположени на територията на гр. София, подбрани съобразно зона С1 - с шум над 65 dB(A) по ОУП на СО и с наличие на непрекъснат трафикопоток. Сравнителният сезонен анализ в този етап емпирично доказва феномена на „фенологичния срив“ при изцяло листопадните таксони (*Tilia*, *Acer*, *Fraxinus*). При тях шумозащитната способност през зимния период деградира драстично с 60-70%. (Табл.7 Табл.8)

Таблица 7.

**Измерване на шумов дискомфорт (Сезонна амплитуда)
Местоположение и акустични измервания и нивата на шум преди и след преминаване през растителността в различните часове на измерване – летен сезон**

Точка (N)	Местоположение	Час	Преди бариерата dB(A)	След бариерата dB(A)
1	Околовръстен път - Shell	11 ч.	80.2	57.6
1а	Околовръстен път - Shell	17 ч.	83.5	61
2	Околовръстен път - резид. Бояна	11 ч.	74.9	55.6
2а	Околовръстен път - резид. Бояна	17 ч.	75.9	55.8
3	Околовръстен път - резид. Бояна	11 ч.	74.9	70.5
3а	Околовръстен път - резид. Бояна	17 ч.	75.9	71.8
4	бул. България	11 ч.	76.7	60.5
4а	бул. България	17 ч.	78.2	61.3
5	ул. Дойран	11 ч.	75.8	59.7
5а	ул. Дойран	17 ч.	76	60
6	ул. Хенрих Ибсен	11 ч.	68.5	61.5
6а	ул. Хенрих Ибсен	17 ч.	71	64.8
7	бул. Г.М. Димитров	11 ч.	75.2	56.8
7а	бул. Г.М. Димитров	17 ч.	77 .8	57.6

Точка (N)	Местоположение	Час	Преди бариерата dB(A)	След бариерата dB(A)
8	бул. Цар Борис III - парк "Овча купел"	11 ч.	70.4	60.5
8a	бул. Цар Борис III - парк "Овча купел"	17 ч.	75.8	63.5
9	бул. Петър Дертлиев - Западен	11 ч.	70.5	59
9a	бул. Петър Дертлиев - Западен	17 ч.	74.2	60.2
10	бул. Андрей Ляпчев	11 ч.	72.1	50.2
10a	бул. Андрей Ляпчев	17 ч.	76.1	51.4
11	бул. Ал. Малинов	11 ч.	70.3	58.5
11a	бул. Ал. Малинов	17 ч.	74.6	62.5
12	бул. Ал. Малинов (контрола - без растителност)	11 ч.	70.3	67.5
12a	бул. Ал. Малинов (контрола - без растителност)	17 ч.	74.6	67.5
13	бул. Ботевградско шосе	11 ч.	72.4	60.5
13a	бул. Ботевградско шосе	17 ч.	74.3	60.9

Таблица 8.

Местоположение и акустични измервания и нивата на шум преди и след преминаване през растителността в различните часове на измерване – зимен сезон

Точка (N)	Местоположение	Час	Преди бариерата dB(A)	След бариерата dB(A)
1	Околовръстен път - Shell	11 ч.	80.2	70.2
1a	Околовръстен път - Shell	17 ч.	83.5	75.3
2	Околовръстен път - резид. Бояна	11 ч.	74.9	55.6
2a	Околовръстен път - резид. Бояна	17 ч.	75.9	55.8
3	Околовръстен път - резид. Бояна	11 ч.	74.9	70.5
3a	Околовръстен път - резид. Бояна	17 ч.	75.9	71.8
4	бул. България	11 ч.	76.7	65.8
4a	бул. България	17 ч.	78	66.4
5	ул. Дойран	11 ч.	75.8	69.5
5a	ул. Дойран	17 ч.	76	67.1
6	ул. Хенрих Ибсен	11 ч.	68.5	61.5
6a	ул. Хенрих Ибсен	17 ч.	71	64.8
7	бул. Г.М. Димитров	11 ч.	75	69.2
7a	бул. Г.М. Димитров	17 ч.	77.8	65.7
8	бул. Цар Борис III - парк "Овча купел"	11 ч.	70.4	63.1
8a	бул. Цар Борис III - парк "Овча купел"	17 ч.	75.8	68.6

Точка (N)	Местоположение	Час	Преди бариерата dB(A)	След бариерата dB(A)
9	бул. Петър Дертлиев - Западен	11 ч.	70.5	64
9a	бул. Петър Дертлиев - Западен	17 ч.	74.2	65.7
10	бул. Андрей Ляпчев	11 ч.	72.1	66
10a	бул. Андрей Ляпчев	17 ч.	76.1	66.9
11	бул. Ал. Малинов	11 ч.	70.3	62.4
11a	бул. Ал. Малинов	17 ч.	74.6	67.9
12	бул. Ал. Малинов (контрола - без растителност)	11 ч.	70.3	67.5
12a	бул. Ал. Малинов (контрола - без растителност)	17 ч.	74.6	67.7
13	бул. Ботевградско шосе	11 ч.	72.4	65.9
13a	бул. Ботевградско шосе	17 ч.	74.3	68

Тези резултати доказаха по безспорен начин необходимостта от задължително включване на минимум 30% до 50% вечнозелени таксони в състава на градските фитоекрани.

4.3. Експериментален етап: Проектни казуси с инструментални измервания Този етап надгражда общата диагностика чрез симулиране и прилагане на ландшафтно-устройствени решения върху реални, критични територии. За постигане на максимална представителност са разгледани обекти с различна функционална принадлежност и акустично натоварване:

1. Обект бул. „Н. Й. Вапцаров“ – кръстовище ул. „Ат. Дуков“ (Комбиниран нисък екран) Обектът попада в зона от първостепенната улична мрежа с интензивно автомобилно натоварване, достигащо до 1021 МПС/час в обедния пик и генериращо максимални нива на шум до 73.4 dB(A). Наситената подземна инженерна инфраструктура в участъка категорично изключва засаждането на дълбококоренови дървесни видове. Затова е разработен модел за плътен хетерогенен храстов масив с височина 1.5 – 2.0 м. Включени са вечнозелена *Thuja orientalis 'Aurea Nana'* (20 бр.) за зимен структурен акцент и полиантови рози сорт *'Imagine'*, *'Lili Marlene'*, *'Iceberg'* (общо 468 бр.). Този модел генерира акустична редукция (вносяна загуба) от ≤ 5 dB(A). Ефектът се постига чрез изключително гъстата бодлива биомаса, която действа едновременно като механичен филтър за фини прахови частици (ФПЧ) и като ефективен дифрактор, разсейващ средния честотен спектър на шума.

2. Обект бул. „Н. Й. Вапцаров“ (Проектна оптимизация на паркова среда) Изследването обхваща парков имот от 11.5 дка, изложен на агресивен трафик. Емисионната „Нулева точка“ регистрира 73.2 dB(A). Вътрешните измервания в 8 контролни точки показват пълна неефективност на съществуващия дървесен масив от 881 броя дървета. Във вътрешността на парка е отчетено ниво от 73.5 dB(A) (през лятото) и 74.0 dB(A) (през зимата). Разликата между сезоните е пренебрежимо малка поради доминацията на *Robinia pseudoacacia* – вид с ажурна корона, който не осигурява акустична сянка. Фитосанитарната експертиза категорично установява, че на терена няма дъбове, но са налични множество етиолирани екземпляри, създаващи огромни „акустични прозорци“ в

приземния етаж (0–3 м). Проектното решение предвижда отстраняване на точно 2 броя компрометирани дървета и мащабна интродукция на многоетажна храстова растителност за уплътняване на буфера. Детските зони са препозиционирани дълбоко във вътрешността, където фоновият шум спада до ~60 dB(A).

3. Обект Парк „Казичене“ (Приложение на шумозащитната типология)
Обектът (17.3 дка) служи като референтен пример за парк, обграден от три активни транспортни улици. За решаване на акустичния конфликт проектът интегрира два конструктивни модела. По външния контур е заложен периферен буфер (Конструкция Тип 1) за поемане на първичния звуков удар. За вътрешна защита на детските площадки е приложена Конструкция Тип 3 под формата на „лабиринт от жив плет“ с височина 1.60 м, действащ като локален екран и зона за Visual Masking. Миксиран подход е приложен във вътрешността на парка, като са следвани принципите за проектиране на паркови пространства с баланс между открити и закрити зони. Предвидена са алейки насаждения които подчертават рисунъка на алейната мрежа и играят не само слънцезащитна роля, но и акустично дифузионна. Дендрологичният състав включва 282 широколистни и 61 иглолистни дървета. Това стратегическо съотношение осигурява максимална листна площ (LAI) през лятото, като същевременно предотвратява „фенологичния срыв“ в акустичната защита през зимния период.

4. Обект ЖК „Ботевград“ (Интегрирана шумозащита в жилищна среда)
Анализиран е жилищен комплекс от 9 многофамилни сгради, разположен в Устройствена зона Жс. Поради строгите акустични норми е приложен модел на „Комбиниран екран“ (Тип 3), включващ и 360 линейни метра вертикално озеленяване по границите на имота. Структурата на „Зеления щит“ е строго ешелонирана: горният етаж се формира от 210 бр. едроразмерни широколистни дървета (вкл. *Platanus* и *Liquidambar*), служещи като дифузьор за аеродинамичния шум. Приземният етаж е напълно запечатан с масив от 2565 храста, доминиран от 1735 бр. вечнозелена лавровишна (*Prunus laurocerasus 'Novita'*). Този вечнозелен пояс гарантира целогодишно физическо блокиране на нискочестотния шум, генериран от контакта на автомобилните гуми с настилната.

5. Обект линеен парк бул. „Македония“ (Етап на апробация) Булевардът генерира екстремни нива на звуково налягане (пикове до 75.3 dB(A)) поради синергичното действие на автомобилния и релсовия транспорт в условията на "уличен каньон".

За прецизиране на акустичния модел е проведен локален мониторинг, отчитащ влиянието на постоянния двупосочен трафикопоток при стандартизирани метеорологични условия (гладък асфалт, сухо време, без вятър). (Табл. 9)

Таблица 9.

Акустичен профил на бул. „Македония“

Времеви интервал	Еквивалентно ниво, L_{eq} (ср.)	Минимално ниво, L_{min}	Максимално ниво, L_{max}	Интензивност на трафика	Средна скорост на потока ($V_{ср}$)
Сутрешен пик	73.7 dB(A)	70.1 dB(A)	75.3 dB(A)	652 МПС/ч	Леки: 20 km/h

(08:00 – 08:30 ч.)	(оср. от 74.7 и 72.7)				Тежки: 40 km/h
Обеден пик (12:00 – 12:30 ч.)	73.0 dB(A) (оср. от 73.6 и 72.4)	71.5 dB(A)	73.4 dB(A)	631 МПС/h	Леки: 20 km/h Тежки: 40 km/h

Анализ на данните: Резултатите доказват перманентно наднормено акустично натоварване, генерирано от синергичното действие на автомобилния и релсовия транспорт. Изключително високите еквивалентни нива (до 74.7 dB(A)) са следствие не само от интензивността на потока, но и от специфичния градоустройствен профил тип „уличен каньон“, който предизвиква многократна реверберация (отражение) на звуковите вълни от сградните фасади. Допълнителен дестабилизиращ фактор е нискочестотният шум и структурните вибрации, генерирани от контакта „колело-релса“ при трамвайното движение.

Проектът интегрира иновативната технология "Зелен трамвай" (тречно покритие върху релсите). Меката вегетативна повърхност променя изцяло акустичния импеданс на средата и редуцира нискочестотните вибрации с 3-5 dB(A) директно при източника. За допълнително прекъсване на звуковите вълни към локалните платна е интродуциран вегетативен двуреден жив плет от *Ligustrum ovalifolium* (височина 1.0 м), съчетан със запазване и допълване на историческото алеино насаждение от *Tilia tomentosa*.

6. Обект Търговски комплекс „Технополис “(Етап на апробация в смесена зона) Обектът е представителен за Смесена многофункционална зона (Смф) с интензивен трафик и голям открит асфалтов паркинг, действащ като акустичен резонатор. Изграден е масивен вечнозелен периметров буфер от 91 броя бързорастящ *Cupressus leylandii*. Във вътрешността на паркинга са оформени зелени острови с 168 широколистни дървета за разсейване на ехото и 430 броя *Prunus laurocerasus* за приземна изолация. За максимизиране на защитата са реализирани 512 линейни метра вертикално озеленяване с *Parthenocissus quinquefolia* по оградите. Листната маса покрива твърдите пана, абсорбира високочестотния спектър и успешно предотвратява реверберацията (многократните отражения) между сградата на комплекса и границите на имота.

Експерименталният проект за бул. „Македония“ доказва, че ревитализацията на урбанизирани територии с високо транспортно и акустично натоварване е постижима чрез мултидисциплинарен подход. Интегрирането на съвременни технологии като „Зелен трамвай“, съчетано с целесъобразно ландшафтно планиране (многоетажно екраниране и възстановяване на историческия дендрологичен състав), притежава доказан потенциал за редуциране на шумовите емисии, оптимизиране на микроклимата и възстановяване на рекреационните функции на градските комуникационни коридори.

Изводи от експерименталните казуси

В резултат на проведените измервания и анализи, се формулират следните изводи:

- **Технико-икономическа и екологична ефективност**

Растителността функционира като високоефективна биологична преграда, която предлага пространствена гъвкавост, икономическа рентабилност (ниски капиталови разходи спрямо бетонните стени) и мултифункционалност (абсорбция на газове и прах).

Влияние на широчината на екрана

Установена е линейна зависимост между широчината на пояса и снижението на шума (средно 0.5 dB(A)/m):

- **Тесни ивици (до 3 м):** Редукция 0.5-1.0 dB(A) (психологически ефект).
- **Средни ивици (до 5 м):** Редукция 1.0-2.0 dB(A) (минимален стандарт).
- **Широки ивици (над 5 м):** Редукция 2.0-3.5 dB(A) (най-висока ефективност).
- **Оптимум:** Максимално относително снижение от 3.5 dB(A)/m се регистрира при ивици с широчина 10–12 метра.

- **Влияние на терена и комбинираните конструкции**

Оптимално е ситуирането на защитавания обект в изкоп (нивелация) или използването на геопластика (земни насипи), които действат като пасивен усилвател на защитната функция.

- **Дендрологична оптимизация и сезонна устойчивост**

- **Смесени насаждения:** Най-ефективна е комбинацията от иглолистни и широколистни видове. Локации с вечнозелени видове запазват редукцията си (19.1 dB(A)) непроменена през зимата.
- **Критична роля на храстите:** Храстите са задължителен компонент за „запечатване“ на долния етаж (0–2 м), предотвратявайки акустичното изтичане.

Проведеният в настоящата глава комплексен анализ – обхващащ както инструментални измервания на акустичната среда, така и детайлен преглед на реални инвестиционни проекти – дава основание за формулирането на следните ключови изводи:

1. Потвърден акустичен дискомфорт: Резултатите от мониторинга в София (точките на бул. „Македония“, бул. „Вапцаров“ и др.) категорично потвърждават, че нивата на шум в зоните с интензивен трафик надвишават допустимите санитарни норми с 5 до 12 dB(A). Това превръща шумовото замърсяване от „дискомфорт“ в реален рисков фактор за общественото здраве, изискващ незабавни инженерно-екологични мерки.

2. Валидация чрез практиката (Зониране): Анализът на трите казуса – Парк „Казичене“ (Зона Оз), Комплекс „Ботевград“ (Зона Жс) и „Технополис“ (Зона Смф) – доказва, че универсално решение не съществува. Ефективната защита изисква строго диференциран подход:

- В паркова среда (Казичене) приоритет е вътрешното микро-зониране и защитата на ниския етаж (детски площадки) чрез живи плетове.
- В жилищна среда (Ботевград) критичен е „многоетажният зелен щит“ – комбинация от дървета и плътни храсти за пълна изолация на фасадите.
- В търговско-промишлена среда (Технополис) най-работещи са „твърдите“ зелени екрани – вертикално озеленяване и бързорастящи иглолистни пояси (*Cupressus leylandii*).

3. Роля на вечнозеления компонент: И в трите разгледани проекта присъствието на иглолистна и вечнозелена растителност (*Cupressus*, *Picea*, *Laurocerasus*) се явява ключов фактор за устойчивостта на шумозащитата.

Това потвърждава тезата на дисертацията, че без минимум 20-30% участие на вечнозелени видове, ефективността на бибариерите през зимния сезон спада под критичния минимум.

4. Вертикалното озеленяване като инженерно съоръжение: Практиката (особено казусът „Технополис“ с неговите 512 м озеленена ограда) показва, че вертикалното озеленяване вече не е просто декоративен елемент, а икономически ефективен заместител на скъпите шумозащитни екрани, осигуряващ необходимата площ за абсорбция на звука в силно урбанизирани терени.

5. Емпиричните данни от тази глава (какво е нивото на шума) и практическите наблюдения от казусите (как се проектира в момента) разкриват необходимостта от създаването на ясна, научно обоснована методика за проектиране. Именно тази „технология на зелената защита“ – систематизирана в типове конструкции и матрици за избор на растения – е предмет на разработката в следващата Т. 5.

4.4. Техничко-икономически анализ

В рамките на настоящия труд беше разработен сравнителен анализ на разходите за целия жизнен цикъл на два коренно различни типа шумозащитни съоръжения, изчислени за условен теренен участък с дължина 100 линейни метра. (Табл.10)

Вариант А: Конвенционална шумозащитна стена Това е класическото инженерно решение, при което се използват алуминиеви или полимерни панели с височина 3 метра, монтирани върху масивен стоманобетонов фундамент.

- **Капиталови разходи (CAPEX):** Те включват комплексно проектиране по няколко задължителни части (Архитектура, Геодезия и Вертикална планировка, Конструктивна, както и План за безопасност и здраве), сериозни изкопни работи, изливане на бетон, доставка на метални профили и специализиран монтаж. Средната пазарна стойност на такова изпълнение варира между 450 и 600 евро на линеен метър.

- **Експлоатационни разходи (OPEX):** През годините това съоръжение изисква постоянна поддръжка — почистване на графити, третиране на корозия и подмяна на увредени панели при пътнотранспортни произшествия. Самият материал неизбежно старее и активът се амортизира физически и финансово.

Вариант Б: Комбинирана растителна бариера (Тип 1) Този подход предвижда изграждането на триредов зелен пояс от дървесни и храстови видове с обща ширина между 6 и 8 метра.

- **Капиталови разходи (CAPEX):** Разходите тук покриват подготовката на почвения субстрат, закупуването на висококачествен едроразмерен посадъчен материал и самото засаждане. Средната пазарна цена възлиза на 100–150 евро на линеен метър, което представлява между три и четири пъти по-ниска първоначална инвестиция в сравнение с изкуствената стена.

- **Експлоатационни разходи (OPEX):** Растителността изисква по-интензивни грижи (редовно поливане, внасяне на хранителни вещества и санитарна резитба) основно през първите три години след засаждането. След петата година насаждението стабилизира фитосанитарния си статус и разходите по поддръжката стават минимални.

- **Добавена стойност:** За разлика от изкуствената стена, която с времето се руши и губи стойност, „живата стена“ развива своя потенциал в

дългосрочен план. С нарастването на дърветата техният акустичен капацитет се увеличава, а успоредно с това те започват да генерират незаменими екосистемни услуги — пречистване на въздушния басейн, засенчване и микроклиматично охлаждане, чиято реална стойност трудно може да бъде остойностена в чисти цифри.

Зелените бариери се доказват като безспорно по-изгодното и устойчиво решение за общинския бюджет в дългосрочен план, стига пространствените параметри на терена да позволяват тяхното разполагане. Разработените в този труд пространствени модели — от аеродинамичния зелен профил за периферни булеварди (Тип 1) до фините вертикални фитоструктури за централните градски части (Тип 3) — не са просто абстрактни теоретични разработки. Те представляват директен и напълно прагматичен отговор на тежките пространствени ограничения, наложени от гъстата и хетерогенна застройка на София и останалите големи български градове.

Чрез въвеждането на разработената Матрица за селекция на видовете напълно се елиминира фактора „случайност“ при ландшафтното проектиране по транспортните артерии. Растителността притежава пълния потенциал да бъде равностоен инженерен партньор на традиционните сиви съоръжения. Освен безспорните здравословни ползи, тя носи и сериозен естетически и визуален комфорт. Когато фитобариерата е разчетена и проектирана правилно — с необходимата плътност, етажност и строго индивидуален видов състав — тя престава да бъде обикновен „декоративен фон“ и се превръща в активна, работеща екологична инфраструктура.

Таблица 10.

Сравнителен анализ на жизнения цикъл на защитните съоръжения (CAPEX/OPEX)

Показател	Конвенционална акустична стена	Зелен шумозащитен пояс (Тип 1/Тип 2)
Капиталови разходи (CAPEX)	Много висока (450 – 600 евро/л.м.)	Ниска до средна (100–150 евро/л.м.)
Експлоатационни разходи (OPEX)	Средни (почистване на графити, ремонти)	Ниски (резитби, поливане само в ранни фази)
Ефективност във времето	Деградира (стареее на полимери/бетон)	Нараства експоненциално с биомасата

5. МЕТОДИКА ЗА ПРОЕКТИРАНЕ НА ШУМОЗАЩИТНИ ЕКРАНИ В ГРАДСКА СРЕДА

Разработената методика за проектиране систематизира строго последователен алгоритъм от 5 стъпки за изграждане на високоефективни биологични екрани. Този подход гарантира преминаването от чисто естетическо озеленяване към създаването на функционираща био-инженерна инфраструктура (Табл.11, Табл.12, Табл.13)

• **Стъпка 1: Градоустройствен и нормативен анализ** Този първоначален етап включва детайлно обследване на прилежащата територия и определяне на нейната функционална принадлежност съгласно Общия устройствен план (ОУП) (напр. жилищна, смесена, паркова или производствена зона). Идентифицират се транспортните профили и се дефинират целевите изисквания за акустичен комфорт според действащата нормативна уредба (Наредба № 6 за показателите за шум), за да се установи точният размер на "акустичния дефицит" за конкретната локация.

- **Стъпка 2: Локална екологична оценка и дендрологичен подбор**
Извършва се прецизен анализ на микроклиматичните и почвени условия, включително експозиция, ветрови режим и наличие на специфични антропогенни стресори (смог, запрашаване, зимно засоляване на платната). Въз основа на тези данни и чрез специализираната Матрица за селекция се подбират най-подходящите дървесно-храстови таксони, които гарантират едновременно висок акустичен капацитет и дълготрайна биологична устойчивост (екологична пластичност) в агресивната градска среда.

- **Стъпка 3: Инструментални акустични измервания (in situ)**
Провежда се системно теренно замерване на съществуващия шумов фон чрез използването на прецизна апаратура (шумомери от Клас 1 или 2). Измерванията задължително обхващат пиковите часове на транспортно натоварване (сутрешен и обеден/вечерен пик) и се реализират в рамките на двата контрастни фенофазни периода (пълно лятно облистване и зимен покой), за да се отчете реалната амплитуда на акустичното замърсяване и евентуалният „фенологичен срив“.

- **Стъпка 4: Пространствено-геометрично оразмеряване** В този етап се дефинират точните габарити на бъдещия фитоекран (широчина, височина и дължина на пояса) съобразно наличните пространствени и инфраструктурни ограничения на терена. Залагат се оптималните отстояния от шумовия източник до защитената зона, като основната цел е постигането на широчина на пояса над 5–10 метра (където е възможно), за генериране на реална акустична редукция (IL) надвишаваща 4.0 – 5.0 dB(A). (Табл.11)

Таблица 11.

Взаимовръзка на параметрите на зеления пояс

Широчина на пояса	Средна редукция на шума	Характеристика и приложение
Тесни ивици (до 3 м)	0.5-1.0 dB(A)	Основно психологически (маскиращ) ефект чрез прекъсване на визуалния контакт с трафика.
Средни ивици (3 – 5 м)	1.0-2.0 dB(A)	Частично ограничаване на високочестотния спектър; подходящи за вътрешноквартални улици.
Широки ивици (над 5 м)	2.0-3.5dB(A)	Осезаемо намаляване на звуковото налягане; приложими при големи градски артерии.
Оптимален пояс (10 – 12 м)	Над 4.0-5.0 dB(A)	Максимална инженерно-биологична ефективност; формира се устойчива миниекосистема.

- **Стъпка 5: Избор на конструктивен тип и фитоархитектурно моделиране** Във финалната фаза се определя точната пространствена архитектура на насаждението чрез прилагане на разработената Конструктивна типология (Тип 1 – Аеродинамичен профил, Тип 2 – Шахматен екран или Тип 3 – Комбинирана структура). Избраният модел се адаптира към конкретния релеф, като се гарантира задължителното

присъствие на плътен храстов подлес за блокиране на нискочестотния шум в приземния слой (от 0 до 2 метра височина).

Анализ на най-ефективния модел

Тип 3 (Комбинираната структура) притежава най-висока инженерна ефективност. Този модел осигурява пълна спектрална абсорбция. Плътният храстов масив в долния етаж (0-2 м) или съответната твърда бариера напълно блокират приземния шум от контактното петно на гумите и двигателите (където интензитетът е най-висок), докато короните на дърветата от първа величина над тях разсейват и абсорбират аеродинамичния шум от трафика.

За да бъде една биологична бариера максимално ефективна и устойчива във времето, проектното решение задължително трябва да отговоря на две ключови условия:

1. **Вертикална непрекъснатост (Многоетажност):** Структурата трябва да бъде хетерогенна и триетажна (ниска храстова, висока храстова и дървесна растителност). Това предотвратява появата на т.нар. „**акустични прозорци**“ — оголени пространства под короните на дърветата, през които звуковата вълна преминава безпрепятствено.

• **Вечнозелен компонент (Минимум 30%):** Включването на иглолистни или вечнозелени широколистни видове е задължително условие за компенсиране на сезонния срив в ефективността на екрана. При изцяло широколистни пояси, зимният листопад води до деградация на шумозащитната способност с **до 60–70%** поради драстичното намаляване на общата повърхностна площ на листата (LAI - Leaf Area Index).

Таблица 12.

Методика за проектиране на шумозащитни растителни екрани

Стъпка от процеса	Основни компоненти за анализ	Нормативен/ Технически ориентир
Стъпка 1: Градоустройствен анализ	- Идентификация на устройствената зона - Силует и профил на улицата	- Наредба № 6 (напр. Жилищна зона: 55dB(A)) - Дефиниране на площта за озеленяване
Стъпка 2: Екологична оценка	- Климатични и градски условия - Дендрологична селекция	- Смог, суша, инверсии, зимно засоляване - Подбор на растителност според екол.условията на средата
Стъпка 3: Акустични измервания	- Техническо замерване (<i>in situ</i>) - Пространствени точки - Сезонен обхват	- Шумомер Клас 1, сухо време, вятър < 5 m/s - Измерване: Емисия (бордюр) → Емисия (фасада) - Пиков трафик (Сутрин/Вечер) + Лято/Зима
Стъпка 4: Пространствен габарит	- Широчина до 3 метра - Широчина 3 – 5 метра - Широчина над 5 метра - Широчина 10 – 12 метра	0.5 - 1.0 dB(A) редукция (Психологически ефект) 1.0 - 2.0 dB(A) редукция (Частична защита) 2.0 - 3.5 dB(A) редукция (Сериозна защита) - ОПТИМУМ (Над 4.0 - 5.0 dB(A) защита)

Стъпка 5: Избор на структурен тип	• Тип 1: Градиран (Аеродинамичен) • Тип 2: Шахматен (Хомогенен) • Тип 3: Комбиниран (Хибриден)	• Дифракция (нагоре) —► за Магистрали • Дифузия
-----------------------------------	--	--

Таблица 13.

Взаимовръзка между широчината на зеления пояс и редукцията на шума

Широчина на пояса	Средна редукция на шума	Характеристика и приложение
Тесни ивици (до 3 м)	0.5 - 1.0 dB(A)	Психологически (маскиращ) ефект чрез прекъсване на визуалния контакт.
Средни ивици (3 – 5 м)	1.0 - 2.0 dB(A)	Частично ограничаване на високочестотния спектър; вътрешноквартални улици.
Широки ивици (над 5 м)	2.0 - 3.5 dB(A)	Осезаемо намаляване на звуковото налягане; градски артерии.
Оптимален пояс (10 – 12 м)	Над 4.0 - 5.0 dB(A)	Максимална инженерно-биологична ефективност.

6. ПРИЛОЖНИ МОДЕЛИ НА ЗЕЛЕНИ ШУМОЗАЩИТНИ ЕКРАНИ

6.1. Конструктивна типология на растителните екрани Финалният етап представлява концептуалното и математическо обобщение на резултатите. Като надгражда фундаментални световни постановки и ги адаптира към локалните градоустройствени и климатични специфики на агломерация София, настоящият дисертационен труд предлага като свой основен научно-приложен принос оригинална авторска конструктивна типология. Тя концептуализира пространствените решения в три базови модела, които са директно приложими в нашата градска среда

Изведена е „Обобщена конструктивна типология на шумозащитните пояси “ . (Табл.14, Фиг.2)

Тип 1: Аеродинамичен (градиран) профил

Пространствена структура с прогресивно нарастваща височина в дълбочина на имота (ниски храсти \ високи храсти \ ниски дървета \ дървета първа величина).

- **Механизъм:** Предизвиква **дифракция** на звуковата вълна, отклонявайки въздушния и звуковия поток нагоре над защитената зона.

- **Приложение:** Скоростни градски магистрали, околновръстни пътища, булеварди и широки разделителни ивици.

Тип 2: Хомогенен (шахматен) екран

Конфигурация от дървесни видове с еднакъв габирит, разположени зигзагообразно (шахматно) в няколко реда.

- **Механизъм:** Напълно елиминира правата акустична видимост. Звуковата вълна се разбива (дифузира) в множеството стъбла и клони, претърпявайки многократно отражение и затихване вътре в масива.

- **Приложение:** Булеварди, площади и пешеходни зони в централни градски части с ограничено пространство за широки пояси.

Тип 3: Комбиниран екран (вертикална хибридна структура)

Хибриден модел, интегриращ изкуствено изградена твърда преграда (шумозащитна стена, габиони или перголна конструкция) с плътна многоетажна растителност (високи дървета и непрекъснат храстов подлес).

- **Механизъм:** Твърдата конструкция отразява или абсорбира нискочестотния линеен шум в основата, докато растителността елиминира завихрянията и разсейва високочестотния аеродинамичен шум в горните етажи.

Оценка на ефективността и конструктивни императиви

Анализ на най-ефективния модел

Тип 3 (Комбинираната структура) притежава най-висока инженерна ефективност. Този модел осигурява пълна спектрална абсорбция. Плътният храстов масив в долния етаж (0-2 м) или съответната твърда бариера напълно блокират приземния шум от контактното петно на гумите и двигателите (където интензитетът е най-висок), докато короните на дърветата от първа величина над тях разсейват и абсорбират аеродинамичния шум от трафика.

За да бъде една биологична бариера максимално ефективна и устойчива във времето, проектното решение задължително трябва да отговоря на две ключови условия:

2. **Вертикална непрекъснатост (Многоетажност):** Структурата трябва да бъде хетерогенна и триетажна (ниска храстова, висока храстова и дървесна растителност). Това предотвратява появата на т.нар. „**акустични прозорци**“ — оголени пространства под короните на дърветата, през които звуковата вълна преминава безпрепятствено.

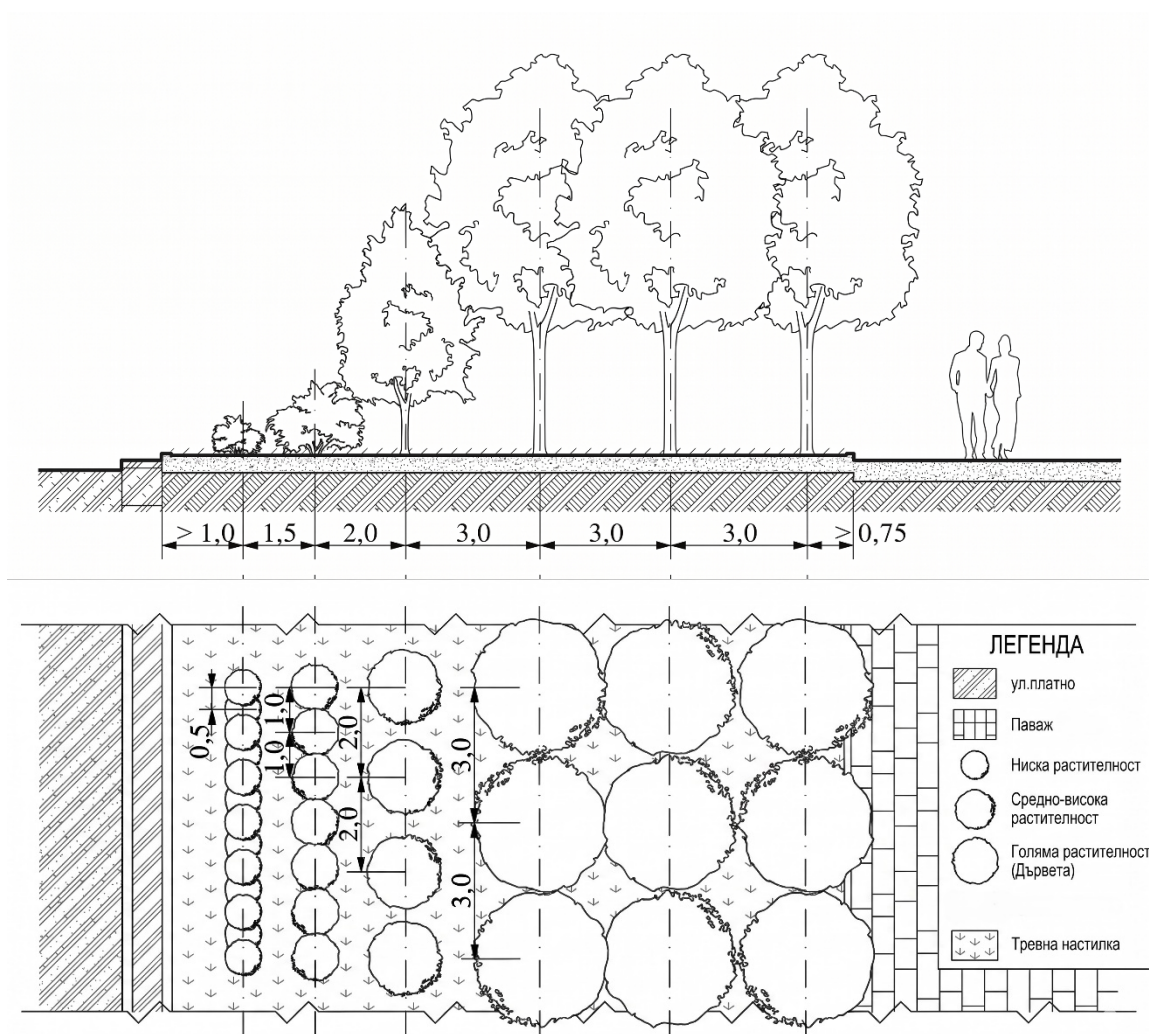
3. **Вечнозелен компонент (Минимум 30%):** Включването на иглолистни или вечнозелени широколистни видове е задължително условие за компенсиране на сезонния срив в ефективността на екрана. При изцяло широколистни пояси, зимният листопад води до деградация на шумозащитната способност с **до 60–70%** поради драстичното намаляване на общата повърхностна площ на листата (LAI - Leaf Area Index).

Таблица 14.

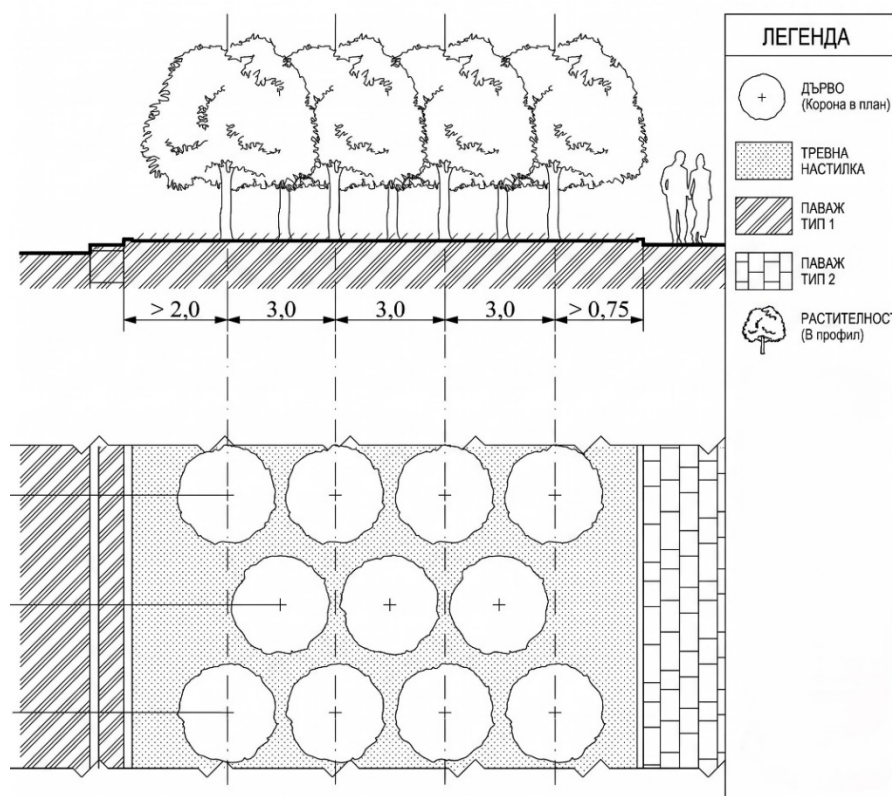
Конструктивна типология на шумозащитните пояси и тяхното зонирание

Тип Конструкция	Описание / Схема на засаждане	Акустичен механизъм	Приложение (Зони)
ТИП 1 (Градиран профил)	"Аеродинамичен клин" - стъпаловиден профил (4-етажна схема).	Дифракция: Принуждава звуковата вълна да се отклони вертикално над обекта.	П, Оз, Магистрали: За широки разделителни ивици (>10 м).
ТИП 2 (Шахматен екран)	Еднородна структура в триъгълна разбивка (Quincunx) без подлес.	Реверберация: Многократно пречупване на звука между стволите.	Ц, Смф: За централни части и тесни тротоари.
ТИП 3 (Комбиниран)	Двуетажна плътна схема (дървета и плътен храстов масив 0-2м).	Пълна абсорбция: Храстите поглъщат приземния шум, короните - аеродинамичния.	Жк, Тго, Зп: За жилищни зони, детски градини, болници.

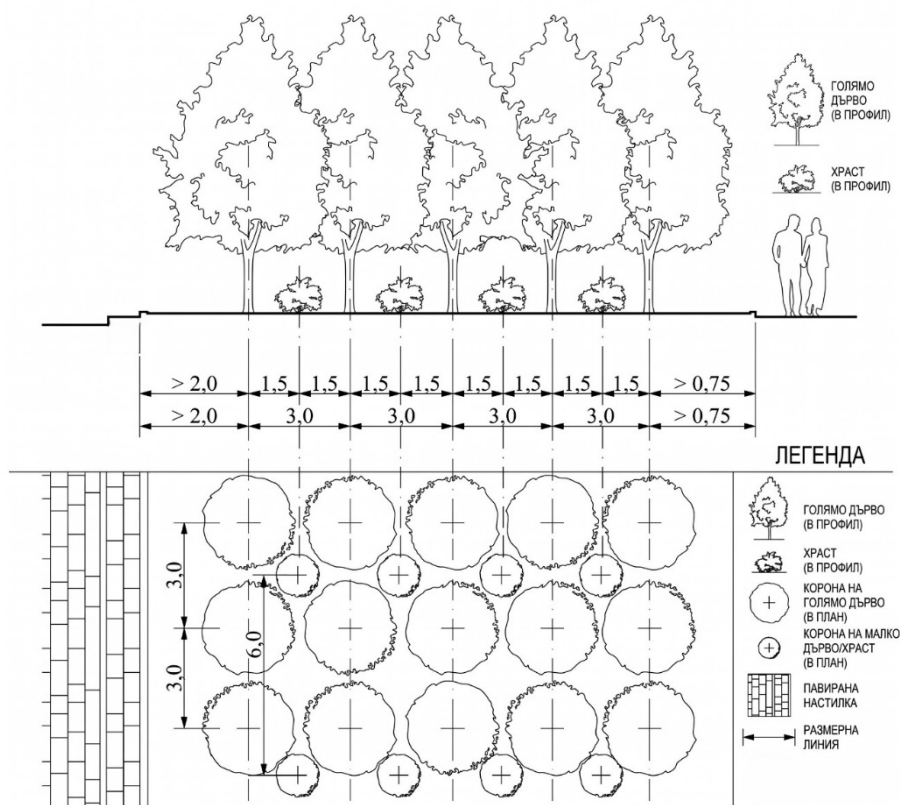
Фигура 2. Конструктивни типове шумозащитни екрани
Тип 1: „Аеродинамичен / Градиран профил“, Тип 2: „Хомогенен /
Шахматен екран“, Тип 3: „Комбиниран екран / Вертикална структура“



1) Тип 1: „Аеродинамичен / Градиран профил“



2)Тип 2: „Хомогенен / Шахматен екран“



3)Тип 3: „Комбиниран екран / Вертикална структура“

6.2. Математически модел на акустичния трансфер В този етап количественото оразмеряване се дефинира чрез интегралното уравнение за внасяната загуба: $IL = \Delta L_{geo} + \Delta L_{veg} + \Delta L_{ground}$

Затихването в биомасата се изчислява по формулата:

$$\Delta L_{veg} = \int B_0 \cdot \mu(f) \cdot \rho_{veg} dx$$

• Където B_0 е структурен коефициент, $\mu(f)$ е честотно-зависим коефициент на абсорбция, ρ_{veg} е обемната плътност на биомасата, а dx Диференциален елемент от дебелината (широчината) на растителния екран, по който се извършва интегрирането на затихващата функция. (Фиг.1)

Фигура 1. Математически модел на акустичния трансфер



Въвеждането на **Матрица на акустичния трансфер** позволява оразмеряването на фитоекрана да се съобрази с архитектурата на насаждението (триизмерна плътност) и честотния спектър на автомобилния поток. Поради фенологичния срыв при широколистните таксони, матрицата задължително отчита две състояния на вектора на затихване: V_{sum} (вегетация / облистено състояние) и V_{win} (покой / обезлистено състояние). За базово отстояние от източника $r = 15$ m и стандартни проектантски отстояния между отделните биогрупи, векторите на затихване по честотни нива (ниски <250 Hz, средни 250-1000 Hz и високи >1000 Hz) приемат следните експериментално доказани стойности:

1. При Конструкция Тип 1 („Аеродинамичен / Градиран профил“):

(Калибриран по данни от Локация Т.1 — Околовръстен път / Ляпчев: 4 реда, ширина 15 m)

- **Ниски честоти (<250Hz — двигатели, тежък трафик):** Затихването се определя от стволната дървесина и скелетните клони. Ефектът е постоянен през сезоните.

- **Средни и високи честоти (>1000 Hz — триене „гума-настилка“):**
Силно улавяне от широколистната биомаса през лятото, което спада рязко през зимата.

[Тип 1]_{15m} => $V_{sum} = (2.0 \parallel 5.5 \parallel 7.2) \text{ dB(A)}$, $V_{win} = (1.8 \parallel 2.1 \parallel 2.8) \text{ dB(A)}$

Забележка: Данните от точка Т.1 показват общ летен спад от 25.3 dB(A) (80.2 → 57.6 dB(A)) благодарение на комбинацията от ширина, релеф и почвен импеданс (*Ground Effect*). В зимни условия, поради отсъствието на подлес, се отчита „ефектът на акустичния тунел“ и общото затихване пада до 10 dB(A).

2. При Конструкция Тип 2 („Хомогенен / Шахматен екран“):

(Калибриран по данни от Локация Т.13 — Ботевградско шосе: редови масив, ширина 15 m)

Специфика: Максимална обемна листна повърхност (L_{Ai}) през лятото (*Fraxinus americana* + *Tilia cordata*), генерираща огромни термо-вискозни загуби в честотите около 1000 Hz. Зимата обаче настъпва тотален „фенологичен срыв“ с над 65% деградация на капацитета поради чистия широколистен състав.

[Тип 2]_{15m} => $V_{sum} = (1.5 \parallel 11.0 \parallel 20.9) \text{ dB(A)}$, $V_{win} = (1.2 \parallel 3.1 \parallel 4.6) \text{ dB(A)}$

Забележка: Измерванията в Т.13 улавят най-високата сурова редукция в облистено състояние — цели 33.4 dB(A) в 11:00 ч. (72.4 → 40.9 dB(A)). През зимата обаче системата деградира до едва 6.5 dB(A) в същия час, което математически доказва вашата теза за нуждата от вечнозелена компонента.

3. При Конструкция Тип 3 („Комбинирана вечнозелена структура“):

(Калибриран по данни от Локация Т.2 — Резиденция Бояна: моновиден пояс от *Picea abies*, ширина 15 m)

Специфика: Постоянна и целогодишно хомогенна обемна плътност $\rho_{veg} = const$. Липсва делта (Δ) между летен и зимен период. Векторите са идентични.

[Тип3]_{15m} => $V_{sum} = V_{win} = (4.5 \parallel 6.8 \parallel 8.0) \text{ dB(A)}$

Забележка: Измерванията в Т.2 показват абсолютна устойчивост — спад от 74.9dB(A) на точно 55.6 dB(A) както през лятото, така и през зимата (константна редукция от 19.3 dB(A)).

Тези диференцирани стойности служат за изчислителна основа при прогнозиране на шумовата редукция в градска среда. Обобщените данни за инженерното оразмеряване в зависимост от честотния спектър и сезонната фаза са систематизирани в Табл. 15

Таблица 15.

Матрица на честотно-зависимо затихване по типове конструкции

Тип конструкция	Облистеност	Ниски честоти (<250 Hz)	Средни честоти (250-1000 Hz)	Високи честоти (>1000 Hz)	Общ реален принос
Тип 1	Лято	Слаб (1.5 - 2.0 dB)	Среден (4.0 - 5.5 dB)	Висок (6.0 - 7.5 dB)	5.0 - 7.5 dB(A)
	Зима	Слаб (1.0 - 1.5 dB)	Минимален (1.5 - 2.0 dB)	Слаб (2.0 - 2.8 dB)	2.0 - 3.0 dB(A)

Тип 2	Лято	Слаб (1.0 - 1.5 dB)	Екстремн (9.0 - 11.0 dB)	Максимален (18.0 - 21.0 dB)	10.0 - 21.0 dB(A)
	Зима	Минимален (0.5 - 1.0 dB)	Слаб (2.0 - 3.0 dB)	Слаб (3.5 - 4.5 dB)	3.0 - 4.5 dB(A)
Тип 3	Целогодишно	Константен (4.0 - 4.5 dB)	Константен (6.0 - 6.8 dB)	Константен (7.5 - 8.0 dB)	7.0 - 8.0 dB(A)

Математическият анализ на данните доказва, че широколистните редови екрани (Тип 2) притежават феноменален капацитет за поглъщане на шума от контактното петно на гумите в облистено състояние (>1000 Hz), но са изключително уязвими структурно. Обратно, вечнозелените структури (Тип 3) гарантират константен акустичен импеданс на средата (19.3 dB(A) обща редукция), което ги дефинира като задължителен структурен скелет (минимум 30% от общата биомаса) за постигане на целогодишна защита на общественото здраве в град Пловдив, София или друг голям град.

6.3. Матрици за селекция и конструиране Изборът на растителност за целите на шумозащитата не може и не бива да бъде произволен или воден само от естетически съображения. Той трябва да почива на строги, обективни биофизични критерии. В хода на разработката на тази дисертация бе конструирана **Комплексна матрица за оценка**, която интегрира четири ключови фактора (Табл.15)

1. Акустична плътност (Acoustic Density): Този параметър се определя от индекса на листната площ (LAI) и гъстотата на разклоненията. Видове с едри, дебели или мъхести листа (като *Tilia tomentosa*) имат доказано по-висок коефициент на звукопоглъщане поради повишеното триене на въздушните частици в граничния слой на листото.

2. Газоустойчивост: Това е способността на растението да оцелява и функционира нормално в агресивна среда с високи концентрации на азотни оксиди (NO), въглероден оксид (CO) и фини прахови частици. Този фактор е критичен за икономическата ефективност на инвестицията, тъй като гарантира дълголетие на насаждението.

3. Едафична пластичност: Тук се оценява устойчивостта на засоляване (вследствие на зимното почистване на улиците с химикали) и способността за развитие в уплътнени почви в урбанизирана среда.

4. Фенологична стабилност: Отчита се продължителността на периода на облистване и способността за запазване на структурата на короната през зимата.

Стъпвайки на данните от Stoyanov (2021), (Цавков & Юруков, 2003) и собствени теренни наблюдения върху състоянието на растителността за София е направена селекция на приоритетни дървесни видове.

Първичният филтър при селекцията на приоритетните видове в представената матрица е тяхната екологична пластичност и климатична адаптивност. За територията на София подборът е изцяло съобразен с биологичните изисквания на таксоните към топлинния режим и тяхната студоустойчивост. Използваният асортимент е лимитиран до видове, чиято генетична критична точка на измръзване съответства на условията на Софийското поле. В своите изследвания Widrlechner (1997) дефинира този диапазон в границите на Зона 6 (USDA) – от -17.8 °C до -23.3 °C, което гарантира безпроблемното презимуване на таксоните. Игнорирането на

този микроклиматичен лимит води до дефолиация или необратимо увреждане на хабитуса, което пряко компрометира плътността и защитната функция на акустичния екран през зимния период.

Паралелно с климатичния фактор, при избора на видове за „първа линия“ до пътното платно се отчита тяхната газоустойчивост и способност за развитие в условия на интензивно почвено и атмосферно замърсяване.

Матрица за приложимост в устройствени зони

Градоустройственото планиране изисква строго диференциран подход при подбора на растителност. Прилагането на унифициран ландшафтен модел за територии с коренно различни екологични параметри и функционални цели – като индустриалните зони и историческия център – е научно нецелесъобразно и професионално неоправдано. В тази връзка нормативната уредба, и в частност Наредба № 7, дефинира специфични изисквания за отстояния, осветеност и визуален комфорт, които трябва да бъдат безусловно спазени при проектирането.

За преодоляване на тези пространствени и екологични ограничения е разработен приложен модел. Той има за цел директно да насочи ландшафтните архитекти и инженерите към правилния таксономичен състав в зависимост от функционалното предназначение на територията, съобразено с Общия устройствен план на Столична община. (Табл. 16)

Таблица 15.

Матрица. Селекция на приоритетни видове за Зона 6

Ботаническо име (Вид)	Акустична ефективност (1-5)	Устойчивост на газове/сол (1-5)	Темп на растеж	Препоръчителна употреба (Тип Конструкция и специфики)
<i>Picea abies</i> (Обикновен смърч)	5	3	Среден	Тип 1 (Заден план), Тип 2. Осигурява висока зимна плътност и постоянна биомаса в периферни зони.
<i>Thuja occidentalis</i> (Западна туя)	5	4	Бърз	Тип 2 (Жив плет), Тип 3 (Тесни екрани). Отлична за гъсти, линейни градски структури.
<i>Taxus baccata</i> (Обикновен тис)	5	5	Бавен	Тип 2, Тип 3. Изключително плътна вечнозелена структура, понася радикална резитба и силно засенчване.
× <i>Cupressocyparis leylandii</i> (Лейландски кипарис)	5	5	Много бърз	Тип 1, Тип 2, Тип 3. Бързо осигуряване на целогодишна акустична изолация. Перфектен за периметри на търговски обекти.
<i>Pinus nigra</i> (Черен бор)	4	5	Среден	Тип 1 (Индустриални и Смф зони). Изключително устойчив на градска суша, бедни почви и зимно осоляване.
<i>Pseudotsuga menziesii</i> (Дугласка ела)	5	3	Бърз	Тип 1, Тип 2. Дълбока корона с голяма иглолистна биомаса, подходяща за мащабни крайпътни екрани.
<i>Platanus x hispanica</i> (Кленов листен чинар)	4	5	Много бърз	Тип 1 (Скелетен доминант). Големите, плътни листа действат как мощни рефлектори и дифузори на звука.
<i>Tilia tomentosa</i> (Сребролистна липа)	4	5	Бърз	Тип 2 (Улично озеленяване). Плътният трихомен (власинков) слой по листата улавя огромни количества ФПЧ.
<i>Acer platanoides</i> (Остролистен клен)	4	3	Бърз	Тип 1, Тип 2. Формира плътна, мозаечна корона с голяма специфична листна площ (SLA).
<i>Acer campestre</i> (Полски клен)	4	5	Среден	Тип 2, Тип 3. Понася формование. Критичен за затваряне на средния и ниския етаж при подземна инфраструктура.
<i>Carpinus betulus</i> (Обикновен габър)	4	4	Среден	Тип 2 (Формиран жив плет). Частичен зимен екран – запазва сухите си листа до пролетта, намалявайки фенологичния срыв.
<i>Celtis occidentalis</i> (Западна копривка)	4	5	Бърз	Тип 1, Тип 2. Мощна коренова система и изключителна издръжливост на асфалтова жега и тежък градски стрес.
<i>Fraxinus excelsior</i> (Обикновен ясен)	3	5	Бърз	Тип 1 (Преден план – защитен щит). Силна скелетна структура, устойчива на механични повреди и въздушни течения.
<i>Catalpa bignonioides</i> (Южна каталпа)	4	4	Бърз	Тип 1, Тип 2. Огромните петури на листата осигурява отлично дифузно разсейване на звуковите вълни през лятото.
<i>Gleditsia triacanthos</i> (Трибодлива гледичия)	3	5	Бърз	Тип 1, Тип 2. Препоръчват се безбодливи форми (f. inermis). Изключителна толерантност към запрашаване и газове.
<i>Robinia pseudoacacia</i> (Бяла акация)	3	5	Много бърз	Тип 1 (Крайградски магистрални пояси). Агресивен растеж, укрепва терена (подходящ за наклони и геопластики).

Ботаническо име (Вид)	Акустична ефективност (1-5)	Устойчивост на газове/сол (1-5)	Темп на растеж	Препоръчителна употреба (Тип Конструкция и специфики)
<i>Quercus robur 'Fastigiata'</i> (Пирамидален летен дъб)	4	4	Бавен	Тип 2 (Пространствено ограничени зони). Тясна колоновидна корона, подходяща за разделителни ивици между платната.
<i>Populus nigra 'Italica'</i> (Пирамидална топола)	3	4	Много бърз	Тип 1. Подходяща за експресно изграждане на много високи вертикални екрани, но има кратък експлоатационен живот.
<i>Styphnolobium japonicum</i> (Японска акация / Sophora)	3	5	Бърз	Тип 2 (Градски магистрали). Изключително устойчива на прегряване на почвата и вредни емисии.
<i>Betula pendula</i> (Бяла бреза)	2	2	Бърз	Само като ландшафтен акцент. Неподходяща за самостоятелна шумозащита поради твърде ажурната си корона.
<i>Aesculus hippocastanum</i> (Конски кестен)	3	2	Среден	Ограничено в паркова среда. Не се препоръчва за булеварди поради уязвимост към листоминиращия молец.

Таблица 16.

Приложение на видовете спрямо устройствените зони

Устройствена зона (Код)	Характеристика и функция	Препоръчителен видов състав (Разширен асортимент)
Ж (Жилищни)	Зони с преобладаващо застрояване. Изисква се естетика, безопасност (ниска алергенност), акустичен комфорт и целогодишна изолация.	Дървета: <i>Picea pungens</i> , <i>Betula pendula</i> , <i>Acer pseudoplatanus</i> , <i>Tilia cordata</i> , <i>Sorbus aucuparia</i> , <i>Fraxinus excelsior</i> , <i>Carpinus betulus</i> , <i>Prunus serrulata</i> Храсти: <i>Ligustrum vulgare</i> , <i>Spiraea japonica</i> , <i>Syringa vulgaris</i>
Ц (Централни)	Зони на делови и стари градски центрове (Ц2). Високи изисквания за представителност, компактност на короната/корена и издръжливост на топлинен остров.	Дървета: <i>Acer platanoides</i> 'Globosum', <i>Aesculus hippocastanum</i> , <i>Fraxinus pennsylvanica</i> , <i>Ginkgo biloba</i> (само мъжки екземпляри), <i>Liquidambar styraciflua</i> , <i>Carpinus betulus</i> 'Fastigiata' Храсти: <i>Taxus baccata</i> , <i>Buxus sempervirens</i> , <i>Ilex aquifolium</i>
Смф (Смесена)	Многофункционални зони с висок трафик и търговски обекти. Изисква се висока устойчивост на запрашаване, аерозолни соли и газове.	Дървета: <i>Acer campestre</i> , <i>Platanus x hispanica</i> , <i>Celtis occidentalis</i> , <i>Gleditsia triacanthos</i> f. <i>inermis</i> , <i>Pinus nigra</i> Храсти: <i>Cupressocyparis leylandii</i> (за бързи буфери), <i>Prunus laurocerasus</i> , <i>Pyracantha coccinea</i>
О (Обществени)	Здравеопазване, образование. Изключително високи изисквания за санитарна защита, липса на токсични плодове и отделяне на фитонциди.	Дървета: <i>Pinus sylvestris</i> (фитонциди), <i>Picea pungens</i> (зимен щит), <i>Tilia tomentosa</i> (аромат), <i>Liriodendron tulipifera</i> , <i>Abies alba</i> Храсти: <i>Forsythia x intermedia</i> , <i>Chaenomeles japonica</i> , <i>Philadelphus coronarius</i>
П (Производствени)	Складове, логистика и производства. Търси се максимална филтрация на фини прахови частици (ФПЧ), бърз растеж и голяма листна биомаса (SLA).	Дървета: <i>Populus x berolinensis</i> , <i>Ulmus laevis</i> , <i>Robinia pseudoacacia</i> , <i>Elaeagnus angustifolia</i> (много силен прахоуловител), <i>Acer negundo</i> , <i>Quercus rubra</i> Храсти: <i>Amorpha fruticosa</i> , <i>Cotinus coggygria</i> , <i>Hibiscus syriacus</i>
Зп / Тго (Зелени площи)	Паркове, градини, скверове. Рекреативна функция. Търси се биоразнообразие, визуално маскиране на шума и полидоминантни структури.	Дървета: Пълен набор от автохтонни видове (<i>Fagus sylvatica</i> , <i>Quercus robur</i>) + декоративни солитери: <i>Malus floribunda</i> , <i>Magnolia x soulangeana</i> , <i>Larix decidua</i> Храсти: <i>Cornus mas</i> , <i>Corylus avellana</i> , <i>Cotoneaster horizontalis</i>
Са (Спорт)	Зони за спорт и атракции. Необходимост от ветрозащита, осигуряване на локална сянка и устойчивост на механични повреди.	Дървета: <i>Populus nigra</i> 'Italica' (ветрозащитни пояси), <i>Picea abies</i> , <i>Betula pendula</i> , <i>Ulmus minor</i> , <i>Acer platanoides</i> Храсти: <i>Juniperus virginiana</i> , <i>Thuja occidentalis</i> , <i>Symphoricarpos albus</i>

Матрица за конструиране на шумозащитни екрани. Представената синтетична матрица обединява акустичните параметри на средата с биологичния потенциал на вегетативните елементи, дефинирайки структурната рамка за последващото конструиране на специализираните шумозащитни типове.

Синтез и интердисциплинарна връзка между морфологичните белези на растителността, нейния биофизичен капацитет и конкретната ѝ роля в пространствената структура на акустичните екрани са показани в Таблица 28

Матрицата е разработена като алгоритъм за проектиране, съобразен с нуждите на градската среда. (Табл.17)

6.6. Допълващ асортимент за ниския етаж (0–1.5 м) Въвеждането на храстов и тревист подлес е критично важно за затваряне на „акустичните прозорци“ в основата на стъблата.

6.6.1. Храсти за шумоизолация и жив плет

Сериозен и често срещан пропуск в съвременната ландшафтна практика е пренебрегването на най-долния сегмент на зелените екрани — пространството от нула до метър и половина над земята. Ако целим реално затихване на звука и структурна плътност (особено при разработените Конструкции от Тип 1 и Тип 3), въвеждането на храстов и тревист подлес става критично важно. Fang и Ling (2003) обясняват това чрез биофизичната функция на този приземен етаж, който затваря т.нар. „акустични прозорци“. Тези зони на свободно преминаване на звука се появяват по естествен път в основата на дървесните стъбла, тъй като с възрастта короните се изнасят нагоре.

Храстов етаж: Функционално екраниране и биомеханична бариера

Изборът на храстови видове тук не е подчинен на търсенето на декоративен ефект, а се основава на ясни морфологични белези (предимно гъсто базално разклоняване) и екологична пластичност при сурови градски условия. Набелязаният асортимент се разделя на три обособени групи:

- **Плътноструктурни видове (формиращи масиви):** Тук влизат видове като *Ligustrum vulgare*, *Ligustrum ovalifolium*, *Spiraea x vanhouttei* и *Symphoricarpos albus*. Тяхното основно предимство е високата регенеративна способност, което им позволява да понасят интензивни резитби и да формират изключително гъст хабитус. Експериментите на Fan et al. (2010) върху честотния диапазон на затихване доказват нещо много важно: високата плътност на храстите (особено при дребнолистни таксони като *Ligustrum*) играе решаваща роля при улавянето и разсейването на средните и високите честоти на транспортния шум.

- **Защитно-бариерни (бодливи) видове:** Представители като *Berberis thunbergii*, *Crataegus* spp. и *Rosa* spp. Тези растения добавят към акустичната дифракция и една чисто механична, охранителна функция. Тъй като образуват бодливи и непроходими масиви, те на практика спират нерегламентираното пресичане на пешеходци към пътното платно.

- **Халофитни таксони (устойчиви на засоляване):** Видове като *Caragana arborescens* и *Cotoneaster lucidus*. Поставянето им на първа линия, в непосредствена близост до бордюра, има сериозна научна опора. Както посочват Цавков и Юруков (2003), тези растения притежават забележителна издръжливост към високите концентрации на соли в почвата и към агресивните химически аерозоли, с които се почистват улиците през зимните месеци.

Таблица 17.

Обобщена матрица за конструиране/проектиране на фитошумозащитни екрани

Категория таксони по функционален признак	Репрезентативни видове (референтен асортимент)	Пространствено-акустична функция в структурата на екрана	Сезонен капацитет на екраниране	Ландшафтно-устройствен обхват (Приложение)
I. Скелетни / Бързорастящи (Вертикални доминанти)	<i>Populus x berolinensis</i> <i>Ulmus laevis</i> <i>Salix alba</i> <i>Robinia pseudoacacia</i> <i>Acer negundo</i> <i>Platanus x hispanica</i>	Ускорена вертикална екранизация; формиране на първичен дифракционен профил на височина > 5-8 m.	Оптимален (Лято) / Редуциран (Зима)	Периферия на Смф (Смесени многофункционални зони), Промислени територии (П).
II. Плътни / Шумоабсорбиращи (Сърцевина)	<i>Tilia cordata</i> <i>Acer platanoides</i> <i>Fraxinus excelsior</i> <i>Carpinus betulus</i> <i>Quercus rubra</i> <i>Catalpa bignonioides</i>	Основна абсорбция и многократно разсейване на звуковата енергия чрез голяма листна повърхност (SLA/LAI) и плътна корона.	Висок (Вегетационен период)	Жилищни зони (Ж), Централни градски части (Ц).
III. Вечнозелени / Перманентни (Изоляционни)	<i>Picea pungens</i> <i>Pinus nigra</i> <i>Thuja occidentalis</i> <i>Cupressocyparis leylandii</i> <i>Taxus baccata</i> <i>Picea abies</i>	Осигуряване на непрекъснат акустичен импеданс през целогодишния цикъл; запълване на „зимните дефицити“ и блокиране на реверберацията.	Целогодишен (Максимален през зимата спрямо широколистните)	Интеграция във всички типове конструкции като стабилизиращ елемент. Търговски зони и паркинги.
IV. Декоративни / Ажурни (Визуални коректори)	<i>Betula pendula</i> <i>Sorbus aucuparia</i> <i>Prunus cerasifera</i> <i>Koelreuteria paniculata</i> <i>Ginkgo biloba</i> <i>Acer pseudoplatanus f. purpureum</i>	Психо-акустично маскиране (Visual Masking); осигуряване на аерация и визуална пропускливост в зони с пешеходен достъп.	Среден / Психологическа редукция	Паркови територии (Зп), Рекреационни джобове, Пешеходни алеи.
V. Базални (Храстови) / Подлес (Приземни изолатори)	<i>Ligustrum vulgare</i> <i>Spiraea x vanhouttei</i> <i>Berberis thunbergii</i> <i>Prunus laurocerasus</i> <i>Viburnum opulus</i> <i>Pyracantha coccinea</i> <i>Cornus alba</i>	„Запечатване“ на приземните акустични прозорци (0-2 m); елиминирание на звуковата трансляция под короните. Абсорбция на шума директно от гумите.	Висок (при плътно засаждане, особено при вечнозелените таксони)	Конструкции Тип 1 и Тип 3; линейни улични насаждения; контактни зони на булеварди.

6.6.2. Цветен етаж: Психо-акустична интерференция (т.нар. Visual Masking)

От гледна точка на чистата физика, тревистата и цветната растителност няма как да намали директно звуковото налягане, изразено в децибели, тъй като ѝ липсват нужната биомаса и обем. Attenborough (1988) изрично отбелязва това ограничение, но въпреки него, присъствието на тези видове в градската среда е напълно обосновано. То се опира на концепцията на Yang et al. (2011) за психологическата редукция на шума.

Интегрирането на цветни партери в най-ниското ниво помага за оптимизиране на средата по три начина:

1. **Акустична абсорбция на ниво терен (Ground Effect):** За разлика от асфалта и бетона, които са типични акустични огледала и усилват шума чрез отразяване, живата почва, покрита с растителност, работи като естествен порест поглъщател. Листната маса в зоната до 30 см променя акустичния импеданс на земята. Attenborough (1988) изтъква, че по този начин се улавя сериозна част от звуковата енергия, която се движи ниско над повърхността, главно във високочестотния спектър. Към това се добавят и откритията на Aylor (1972) и Horoshenkov et al. (2013), според които растенията с едри листни петури (като *Hosta* spp.) разсейват отразените вълни чрез микродифракция. Тъй като биометричните размери на листата им съвпадат с дължината на високочестотните вълни, те се превръщат в отлични дифузори.

2. **Генериране на положителна биофония (Soundscape approach):** Модерната градска акустика залага не само на физическото изолиране на шума, но и на въвеждането на т.нар. „маскиращи звуци“ от природата. Използването на медоносни и ентомофилни видове като *Salvia splendens*, *Lavandula angustifolia* и различни представители на семейство *Asteraceae* привлича птици и насекоми. Както доказват изследванията на De Coensel et al. (2011), жуженето и птичите песни, съчетани с естественото шумолене на листата при вятър, създават приятен звуков фон. Той действа успокояващо и успешно маскира нискочестотния тътен от автомобилния трафик.

Наред с това, проучванията в областта на екологичната психология, публикувани от Yang et al. (2011), доказват силата на визуалното маскиране. Когато скрием източника на дразнение зад красиви ландшафтни елементи, ние реално променяме субективното възприятие на хората. Цветните петна на преден план отвличат вниманието и доказано намаляват нивата на стрес и усещането за шумов дискомфорт. За да постигнем това визуално разсейване в София, Щилиянова (2005) препоръчва подбор на видове, които съчетават силен декоративен ефект с издръжливост на градски натиск. В тази група влизат:

- **Едногодишни таксони (за интензивен колорит):** *Tagetes erecta*, *Petunia x hybrida*, *Salvia splendens*.

- **Многогодишни таксони (за устойчиви структурни групи):** *Hosta* spp. (подходящи за сенчестите зони под дърветата), *Hemerocallis* spp., *Sedum spectabile*.

6.6.3. Акустична ефективност на „Зелените релси“ (Green Track)

Използването на специализирана растителност (например сухоустойчиви тревни смеси) намира своята най-добра инженерна и екологична реализация при релсовия транспорт. Технологичната линия на зелените трамвайни трасета, изпробвана на столичния булевард „Македония“, се опира на богата световна практика. В своите изследвания Van Renterghem и Botteldooren (2014) установяват, че замяната на традиционната каменна баластра със седуми или жива трева променя изцяло спектралния състав на шума. Най-осезаемо затихват

честотите около 1000 Hz — именно тези, към които човешкото ухо има най-висока чувствителност и които възприема като най-агресивни.

Проучванията на Чолаков (2018) при реконструкцията на софийските трасета показват важни допълнителни ползи: ефективно улавяне на фините прахови частици още при самия източник и осезаемо редуциране на вибрациите, които застрашават основите на прилежащите исторически сгради.

Почвеният субстрат и растителната покривка имат висок коефициент на звукопоглъщане ($\alpha > 0.5$). Това активира т.нар. „ефект на меката повърхност“ (soft ground effect). Директните измервания на бул. „Македония“ отчетоха спад на пиковите нива с 4.2 dB(A) в сравнение със стандартно, открито трасе. Този резултат съвпада напълно с данните на Van Renterghem и Botteldooren (2014), които посочват средна ефективност между 3 и 5 dB(A) при аналогични обекти в градове като Гент и Ротердам. (Табл.18)

Таблица 18.

Сравнителна ефективност на настилките при релсов път

Тип конструкция на пътя	Акустичен импеданс	Рефлексия (Отражение)	Редукция спрямо бетона	Оценка на ефективността
Бетонна плоча	Висок (Твърда)	> 90% (Силна)	Референтна (0 dB(A))	Ниска. Усилва шума в градския каньон.
Баластра (Камък)	Среден	60-70% (Частично разсейване)	~ 1-2 dB(A)	Средна. Добро вибропоглъщане, но задържа прах.
Зелен трамвай (Трева/Седум)	Нисък (Мека)	< 30% (Слаба)	3 - 5 dB(A)	Висока. Абсорбция + отличен екологичен ефект.

Анализът на резултатите от изследването на „Линейния парк“ на бул. „Македония“ позволява да се направи едно важно обобщение: ефективната шумозащита никога не е резултат от една изолирана преграда, а се дължи на дълбочината и пространствената структура на зелената ивица.

Ако съпоставим данните с френския опит — по-конкретно с известния проект *Promenade Plantée* в Париж — ще видим ясна закономерност. Когато растителността е съчетана правилно с пешеходната зона и е осигурено отстояние от трафика, субективното усещане за шумов натиск намалява радикално. В условията на София моделът на Линеен парк на бул. „Македония“ доказва на практика, че дори при запазване на интензивното движение, въвеждането на „зелен буфер“ (съставен от четири реда дървета — два странични и два централни, няколко успоредни ивици жив плет и затревено трамвайно трасе) създава истински остров на акустичен комфорт за пешеходците. Теренните замервания потвърждават спад на шума до напълно поносимите 60–62 dB(A) в зоната на пешеходната алея през летния период, когато растителността е изцяло облиствена.

7. ИЗВОДИ

Проведените в рамките на настоящото изследване теоретични проучвания, инструментален мониторинг на територията на агломерация София и последващият сравнителен анализ на дендрологичните модели дават основание да се формулират следните изводи:

Предложената комплексна методика осигурява висока степен на научна надеждност и представителност на емпиричните данни чрез постигане на

синергия между обективния инструментален мониторинг и задълбочената експертна интерпретация.

7.1. Научно-теоретични изводи относно механизма на действие

1. **Физико-биологичен механизъм на фитоекраните:** Установено е, че растителните пояси не функционират единствено като линейна физическа преграда, аналогична на конвенционалните инженерни съоръжения. Те представляват сложна, динамична система за дисипация на енергията. Ефективността им е резултат от синергията между три физични процеса: абсорбция на звуковите вълни от порестата структура на кората, листата и почвата, дифракция (огъване) на вълната около масива и множествено вътрешно отражение в короните. Доказва се, че „мекотата“ на растителната тъкан е критичен фактор за поглъщането на високочестотния спектър (над 1000 Hz), генериран от триенето на гумите, докато плътността на дървесните стволоче е отговорна за редуцирането на нискочестотните вибрации.

2. **Структурна зависимост и императив на биоразнообразието:** Монокултурните насаждения демонстрират ограничена ефективност и по-висока уязвимост. Изследването показва категорично, че полидоминантните структури повишават акустичния капацитет на екрана с до 15-20%. Разнообразната морфология на листата създава многослоен филтър. Критичен фактор обаче остава вертикалната структура: дърветата с високо вдигнати корони и оголени стъбла пропускат шума безпрепятствено в приземния слой (0–2 м). Без наличието на плътен храстов подлес, който да затвори тази „акустична пролука“, шумозащитният ефект остава предимно психологически.

3. **Фенологичен парадокс и сезонна динамика на защитата:** Емпиричните данни от София разкриха драстична зависимост на ефективността от фенологичната фаза. При листопадните видове (*Tilia*, *Acer*, *Fraxinus*) се наблюдава срив в шумозащитната способност с до 60-70% през зимния период. Този факт налага преразглеждане на досегашните практики и научно обосновава необходимостта от задължително включване на вечнозелени видове (*Picea*, *Cupressus*, *Thuja*) в съотношение не по-малко от 30% от общия обем на биомасата.

7.2. Практически изводи от приложените казуси (Казичене, Ботевград, Технополис)

1. **Пространствен императив и функционално зонироване:** Потвърдено е правилото за „близката защита“. Зелената бариера реализира своя максимален потенциал, когато е ситуирана на отстояние 6.0 – 10.0 метра от източника. Анализът на казуса „Казичене“ показва, че в големи паркови територии е необходимо вътрешно микро-зонироване, при което чувствителните зони (детски площадки) се защитават с локални екрани (Тип 3), компенсирани шума от вътрешната алейна мрежа.

2. **Ефективност на „Зеления щит“ в жилищна среда:** Проектното решение за Жилищен комплекс „Ботевград“ доказва, че за постигане на реален акустичен комфорт в зона „Жс“ е необходима многоетажна структура. Използването на над 2500 бр. живи плетове (*Laurocerasus officinalis*) в комбинация с високи широколистни дървета създава плътна бариера, която блокира едновременно шума от гумите и аеродинамичния шум от трафика.

3. **Икономическа и пространствена оптимизация чрез вертикално озеленяване:** Казусът „Технополис“ (с реализирани 512 л.м. вертикално озеленяване) демонстрира, че в индустриални зони (Смф) биологичните екрани са най-ефективната икономическа алтернатива. Чрез комбинация от вертикални

стени и бързорастящи иглолистни видове (*Cupressus leylandii*) се постига максимална защита при минимално отнемане от полезната площ на имота.

8. СПИСЪК НА НАУЧНИТЕ И НАУЧНО-ПРИЛОЖНИТЕ ПРИНОСИ

Научни приноси (Теоретични):

- **Дефиниране на физико-биологичния механизъм:** Доказано е научно, че фитоекраните функционират като сложна система за дисипация на звуковата енергия чрез синергия от абсорбция, дифракция и микрореверберация.
- **Доказване на сезонната (фенологична) динамика:** Количествено измерен и доказан „фенологичният срив“ в акустичната ефективност при изцяло широколистните масиви през зимния период.
- **Разработване на Математически модел на акустичния трансфер:** Създаден е модел за количествено изчисляване на внасяната загуба (Insertion Loss).

Научно-приложни приноси (Практически):

- **Създаване на оригинална Конструктивна типология:** Разработени са и са валидирани три пространствено-функционални модела на фитоекрани (Тип 1: Аеродинамичен, Тип 2: Шахматен, Тип 3: Комбиниран).
- **Конструиране на Комплексна матрица за селекция:** Разработена е специализирана матрица за подбор на приоритетни дървесни и храстови видове за Зона 6.
- **Апробация в реална градска среда:** Доказана е технико-икономическата и ландшафтна ефективност на биологичните решения при критични инфраструктурни обекти (Търговски комплекс „Технополис“, ЖК „Ботевград“).

9. ПОЛЗВАТЕЛИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД Трудът има приложение в университетската практика и може да послужи като основа за обучение на студенти по ландшафтна архитектура. Също така може да бъде използван като база за създаване на практически насоки при проектиране на зелени пространства в градската среда. Трудът формира надеждна база, която е директно приложима в съвременната практика на ландшафтното проектиране.

10. НАСОКИ ЗА БЪДЕЩИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

Възможни продължаващи и задълбочаващи изследвания биха могли да наблегнат върху:

- Задълбочено изследване на растителната конструкция в междинните зелени пространства при наклонени терени.
- Задълбочено изследване на растителната конструкция при малкоетажно застрояване.
- Задълбочено изследване на растителната конструкция при високоетажно застрояване.
- Надграждане на таксономичната матрица.

11. СПИСЪК НА ПУБЛИКАЦИИТЕ ВЪВ ВРЪЗКА С ДИСЕРТАЦИЯТА

1. Grozeva, M. P. (2023). An Optimised Design for Transport Noise Pollution Reduction in the Children's Area and Recreation Spots. *Agricultural Sciences*, 15(37), 12-19. DOI: 10.22620/agrisci.2023.37.002
2. Grozeva, M. P. (2023). Macedonia Boulevard Linear Park Design for Reduced Transport Noise Pollution. *Agricultural Sciences*, 15(37), 20-29. DOI: 10.22620/agrisci.2023.37.003

12. SUMMARY

TYPOLOGY AND METHODS FOR NOISE PROTECTION THROUGH THE USE OF GREEN VEGETATION IN URBAN ENVIRONMENTS

Author: Mariya Petkova Grozeva **Supervisors:** Prof. Dr. Valeria Ivanova, Assoc. Prof. Dr. Dimka Haytova

The current dissertation addresses the critical issue of urban traffic noise pollution within the Sofia agglomeration by proposing sustainable, nature-based solutions. While traditional urban planning relies heavily on artificial noise barriers, this research explores and validates the largely untapped potential of vegetative noise screens (phyto-screens).

The main objective of the study is to develop a scientifically grounded methodology and a spatial-functional typology for the design of highly efficient green noise barriers. The research applied a complex methodology involving systematic *in situ* acoustic monitoring across 19 critical urban locations, comparative seasonal analysis (summer versus winter phenological states), and specific experimental case studies using high-precision digital sonometers.

The results empirically prove the physical and biological mechanisms of sound attenuation through plant biomass. Phyto-screens operate as a complex system for sound energy dissipation through the synergy of acoustic absorption (via foliage and substrate), diffraction around canopies, and micro-reverberation. A critical finding is the measurement of the "phenological collapse"—a drastic reduction in the noise-shielding efficiency of purely deciduous plant belts during the winter season, reaching a 60-70% decline. This validates the necessity of integrating at least 30-50% evergreen taxa in urban green infrastructure.

A major scientific contribution of this work is the development of the Mathematical Model of Acoustic Transfer, which differentiates and quantifies the total noise attenuation (Insertion Loss) based on geometric divergence, vegetative absorption, and soil impedance. Practically, the dissertation introduces an original Constructive Typology of green barriers (Aerodynamic, Quincunx, and Combined types) and a comprehensive selection matrix for woody and shrub species suitable for Hardiness Zone 6.

The theoretical models were successfully validated through real-world implementation projects, such as the "Green Tram" technology on Macedonia Blvd., and multi-layered evergreen buffers in residential and commercial zones, proving that bio-engineered vegetative barriers serve as a highly effective and economically viable alternative to artificial noise walls.