

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКИ ФАКУЛТЕТ

Марко Давидовић

**УТИЦАЈ ПРИМЕНЕ LED ТЕХНОЛОГИЈЕ НА
ЕНЕРГЕТСКУ ЕФИКАСНОСТ И КВАЛИТЕТ
ЕЛЕКТРИЧНЕ ЕНЕРГИЈЕ У АДАПТИВНОМ
УЛИЧНОМ ОСВЕТЉЕЊУ**

докторска дисертација

Београд, 2022.

UNIVERSITY OF BELGRADE
SCHOOL OF ELECTRICAL ENGINEERING

Marko Davidovic

**IMPACT OF THE APPLICATION OF LED
TECHNOLOGY ON ENERGY EFFICIENCY
AND POWER QUALITY IN ADAPTIVE
STREET LIGHTING**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2022

Ментор:

др Јован Микуловић, редовни професор
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

Чланови комисије:

др Предраг Стефанов, ванредни професор
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

др Драган Тасић, редовни професор
Универзитет у Нишу, Електронски факултет

др Миомир Костић, редовни професор
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

др Зоран Радаковић, редовни професор
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

Датум одбране: _____

Захвалница

Прво и пре свега, желим да се захвалим проф. др Драгану Радовановићу и његовом тиму лекара из КБЦ Др Драгиша Мишовић који су ми 2019. године спасили живот.

Посебно се захваљујем мом незваничном коментору, проф. др Миомиру Костићу, на одлучујућој подршци и несебичној помоћи, као и на усмеравањима и подстицајима, током свих година заједничког рада, а нарочито за време израде докторске дисертације у свим њеним фазама. Професору Костићу такође дугујем велику захвалност што је и мене научио да пишем научно-стручне радове.

Проф. др Лидији Ђокић, редовном професору на Архитектонском факултету, захваљујем се на драгоценој стручно-техничкој помоћи приликом припреме научно-стручних радова из области докторске дисертације, а који су објављени у еминентним научним часописима са импакт фактором. Заједно са др Александром Чабаркапом, асистентом на Архитектонском факултету, такође је значајно допринела у организацији анкетних делова истраживања и довођењу веће групе са Архитектонског факултета.

Такође бих се захвалио и мом ментору, проф. др Јовану Микуловићу, као и проф. др Зорану Радаковићу и Николи Ђорђевићу на значајној помоћи у фазама истраживања које су се односиле на хармонијске дисторзије.

Захваљујем се својим родитељима, мајци Драгани и оцу Зорану, на љубави, великом стрпљењу и подршци коју сам имао у сваком тренутку.

Београд, 2022.

Марко Давидовић

Наслов докторске дисертације:

Утицај примене LED технологије на енергетску ефикасност и квалитет електричне енергије у адаптивном уличном осветљењу

РЕЗИМЕ

Тема докторске дисертације је утврђивање оправданости употребе LED технологије у уличном осветљењу, поређењем релевантних показатеља енергетске ефикасности, квалитета електричне енергије, економских и других параметара инсталација уличног осветљења изведених помоћу LED светиљки и конвенционалних (натријумових или метал-халогених) светиљки, уз уважавање употребе система за регулацију светлосног флукса и ефеката мезопског виђења.

Циљ дисертације је утврђивање објективних и субјективних показатеља примене LED технологије у уличном осветљењу, са аспекта енергетске ефикасности, квалитета електричне енергије, параметара електричних инсталација уличног осветљења, боје светлости и економских параметара.

Доприноси дисертације се огледају у утврђеним зависностима активне снаге, реактивне снаге, фактора снаге, THD напона и THD струје од светлосног флукса за различите типове светиљки, на основу којих су дати поступци и мере за смањење негативних утицаја LED светиљки на квалитет електричне енергије. Применом утврђених зависности које се односе на активну снагу, за неколико реалних саобраћајница представљене су могућности за уштеде електричне енергије у уличном осветљењу на годишњем нивоу које обезбеђује примена LED уместо конвенционалних светиљки (како у нормалном режиму, тако и у комбинованим режимима адаптивног уличног осветљења), као и могућности за додатне уштеде електричне енергије уважавањем мезопских ефеката. Представљена је и свеобухватна анализа којом су утврђене стварне могућности за уштеде електричне енергије и стварни финансијски ефекти примене LED технологије у уличном осветљењу. Утврђене су и предности и недостаци примене LED технологије са аспекта параметара инсталације уличног осветљења (пресека кабла, пада напона и ефикасности заштите у случају квара). На основу резултата субјективних евалуација пешака и возача, дате су и препоруке за примену LED пакета одговарајуће боје светлости.

Кључне речи: осветљење улица/путева, натријумове, метал-халогене и LED светиљке, фотометрија, хармонијско изобличење, пад напона и TN систем заштите, пилот пројекат, мезопско виђење, субјективни доживљаји, уштеде електричне енергије, економска анализа

Научна област: Електротехника

Ужа научна област: Техника осветљења

УДК број: 621.3

The title of doctoral dissertation:

Impact of the application of LED technology on energy efficiency and power quality in adaptive street lighting

ABSTRACT

The topic of the doctoral dissertation is the determination of the justification of the use of LED technology in street lighting, comparing relevant indicators of energy efficiency, power quality, economic and other parameters of street lighting installations realised with LED luminaires and conventional (high-pressure sodium or metal-halide) luminaires, taking into account the use of a system for the regulation of the luminous flux and the effects of mesopic vision.

The aim of the dissertation is the determination of objective and subjective indicators of the application of LED technology in street lighting, in terms of energy efficiency, power quality, parameters of electrical installations of street lighting, colour of light and economic parameters.

The contributions of the dissertation are reflected in the determined dependences of active power, reactive power, power factor, THD voltage and THD current on the luminous flux for different types of luminaires, based on which procedures and measures aimed to reduce negative effects of LED luminaires on power quality are given. By using the determined dependencies related to active power, for a few real streets (roads) possibilities for electricity savings in street lighting provided by the use of LEDs instead of conventional luminaires (both in the normal and combined regimes of adaptive street lighting), as well as the possibility of additional energy savings that involve mesopic effects, are presented. A comprehensive analysis, which determined the real possibilities for electricity savings and real financial effects of the application of LED technology in street lighting, was presented. The advantages and disadvantages of the application of LED technology from the aspect of parameters of street lighting installations (cable cross-section, voltage drop and efficacy of the protection system in case of failure) have been determined. Based on the results of subjective evaluation by both pedestrians and drivers, recommendations for LED luminaires of appropriate colour of light are given.

Keywords: street/road lighting, LED, HPS and MH luminaires, photometry, harmonic distortion, voltage drop and TN protection system, pilot project, mesopic vision, subjective impressions, energy savings, economic analysis

Scientific area: Electrical engineering

Specific scientific field: Lighting

UDK number: 621.3

САДРЖАЈ

1 УВОД	1
2 ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА	3
3 СТРУКТУРА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ.....	6
4 ДИСТОРЗИЈА НАПОНА У LED ИНСТАЛАЦИЈАМА ОСВЕТЉЕЊА УЛИЦА И ПУТЕВА	8
4.1 Преглед публикованих резултата у вези са дисторзијом напона у LED инсталацијама осветљења улица и путева	9
4.2 Лабораторијска мерења електричних параметара светиљки	11
4.2.1 Стварне годишње процентуалне уштеде активне и реактивне електричне енергије	26
4.3 Модел за одређивање изобличења напона у случају нелинеарног и несиметричног уличног LED осветљења.....	28
4.3.1 Распоред стубова	28
4.3.2 Основе развијеног математичког модела	29
4.3.3 Примена развијеног модела на трофазну инсталацију уличног LED осветљења	31
4.4 Експерименти изведени на инсталацији уличног осветљења.....	34
4.4.1 Експериментална поставка	34
4.4.2 Резултати мерења.....	35
4.4.3 Провера тачности развијеног софтвера	39
4.5 Анализа квалитета електричне енергије у инсталацији уличног осветљења са великим бројем LED светиљки	43
4.6 Пад напона као утицајни фактор у инсталацијама осветљења	46
4.7 Ефикасност TN система заштите у случају квара као утицајни фактор у инсталацијама осветљења.....	49
4.8 Уважавање пада напона и ефикасности TN система заштите у случају квара као утицајних фактора	52
4.9 Правци даљег истраживања	54
4.10 Закључци	54
5 LED ОСВЕТЉЕЊЕ УЛИЦА И ПУТЕВА ТОПЛО-БЕЛЕ И НЕУТРАЛНЕ БЕЛЕ БОЈЕ СВЕТЛОСТИ: СУБЈЕКТИВНИ ДОЖИВЉАЈИ ПЕШАКА	57
5.1 Преглед публикованих резултата у вези са субјективним доживљајима пешака.....	57
5.2 Примењена метода	58
5.2.1 Експериментална поставка	58
5.2.2 Анкета и упитник.....	61
5.2.3 Процедура.....	61
5.2.4 Учесници анкете	62
5.3 Резултати и дискусија	62
5.3.1 Општа анализа	62

5.3.2	Анализа по полу.....	65
5.4	Закључак.....	65
6	LED ОСВЕТЉЕЊЕ УЛИЦА И ПУТЕВА ТОПЛО-БЕЛЕ И НЕУТРАЛНЕ БЕЛЕ БОЈЕ СВЕТЛОСТИ: ИСПИТИВАЊЕ ОБЈЕКТИВНИХ ПАРАМЕТАРА ОСВЕТЉЕЊА И СУБЈЕКТИВНИ ДОЖИВЉАЈИ ВОЗАЧА	67
6.1	Преглед публикованих резултата у вези са испитивањем објективних и субјективних параметара осветљења	67
6.2	Примењена метода	69
6.2.1	Експериментална поставка	69
6.2.2	Испитивања која се односе на објективну (квантитативну) евалуацију	70
6.2.3	Испитивање које се односи на субјективну оцену	74
6.3	Резултати и дискусија	77
6.3.1	Истраживање засновано на STV концепту	77
6.3.2	Истраживање посвећено уочавању пешака.....	77
6.3.3	Истраживање које се односи на субјективну оцену	78
6.4	Закључци	81
7	ПОРЕЂЕЊЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ЕФИКАСНОСТИ И ТРОШКОВА КОЈИ СЕ ОДНОСЕ НА КОНВЕНЦИОНАЛНЕ И LED ИНСТАЛАЦИЈЕ ОСВЕТЉЕЊА УЛИЦА И ПУТЕВА	83
7.1	Преглед публикованих резултата у вези са енергетском ефикасношћу и трошковима у инсталацијама LED осветљења.....	83
7.2	Методологија за одређивање енергетски најефикаснијих светлотехничких решења	88
7.3	Конвенционално у поређењу са LED осветљењем улица и путева: показатељи енергетске ефикасности	93
7.4	Методологија за прорачун трошкова	98
7.5	Економско поређење	99
7.6	Употреба ефикаснијих LED пакета	101
7.7	Дискусија.....	102
7.8	Закључци	103
8	ЗАКЉУЧЦИ	105
	ЛИТЕРАТУРА.....	110
	ПРИЛОГ 1.....	118
	ПРИЛОГ 2.....	133
	ПРИЛОГ 3.....	137
	ПРИЛОГ 4.....	140
	ПРИЛОГ 5.....	143
	ПРИЛОГ 6.....	144
	БИОГРАФИЈА АУТОРА	150

1 УВОД

Због побољшане енергетске ефикасности и уштеде трошкова, у току је масовни прелазак са конвенционалног на LED осветљење. У осветљењу улица/путева, које учествује са око 1,3% у укупној потрошњи електричне енергије у Европи и са око 1% у глобалној потрошњи електричне енергије, LED светиљке се генерално пореде са конвенционалним светиљкама (које садрже натријумове изворе високог притиска или метал-халогене изворе), а у циљу процене њихове енергетске ефикасности, трошкова, фотометријских параметара и утицаја на животну средину.

У протеклих двадесетак година, светлосна искористивост LED пакета повећала се са око 25 lm/W на преко 160 lm/W, док је за исто време њихов животни век повећан са отприлике 50000 h на преко 100000 h. Истовремено су се у великој мери смањиле цене LED пакета и осталих елемената LED светиљки, због чега је LED осветљење постало конкурентно са конвенционалним по питању иницијалних трошкова, као и трошкова утрошене електричне енергије. Повећање енергетске ефикасности, заједно са смањењем цене, омогућило је произвођачима LED технологије да обезбеде побољшану боју светлости, репродукцију боја, расподелу светлости и изглед светиљки, као и унапређену контролу својих LED производа. То је довело до масовне примене LED технологије и у унутрашњем и у спољашњем (јавном) осветљењу. Напредак LED технологије је уједно изазвао и агресивну промотивну кампању њених произвођача често засновану на неутемељеним тврђењима.

У пропагандним материјалима произвођача LED технологије није помињан утицај боје светлости LED извора на људско здравље. Бројне улице у неколико градова Америке биле су осветљене LED светиљкама са пакетима хладно-беле боје (богатим светлосћу плаве боје), изабраним због највеће светлосне искористивости међу свим LED пакетима. Међутим, реакције јавности су покдразале да многи грађани нису били задовољни оваквим осветљењем, оцењујући га као осветљење прејаког интензитета, које изазива јако бљештање и проблеме са спавањем. Нарочито негативни коментари односили су се на непријатну (хладну, плавичасту) боју светлости и повећано светлосно загађење (LED извори хладно-беле боје негативно утичу на сјај неба, ноћне пејзаже и ноћне животиње).

Поучени наведеним искуством, пројектанти уличног осветљења данас избегавају коришћење LED пакета хладно беле боје. Уместо њих, обично бирају LED пакете неутралне беле боје, који су енергетски ефикаснији од LED пакета топло-беле боје. Међутим, разлика између светлосних искористивости комерцијално доступних LED пакета неутралне беле боје (4000 K) и топло-беле боје (3000 K) (које карактерише исти општи индекс репродукције боја) износи само 6%. Постизање једнаке светлосне искористивости LED пакета топло-беле и неутралне беле боје предвиђа се у блиској будућности. Дакле, енергетска ефикасност (светлосна искористивост) више не би требало да буде одлучујући критеријум при избору боје LED пакета намењених за улично осветљење, већ би он требало да се заснива на субјективним доживљајима пешака и возача, односно, само возача уколико је улица (пут) искључиво намењена за моторни саобраћај.

Као што је већ поменуто, смањење потрошње електричне енергије у осветљењу улица (путева) углавном је реализовано заменом конвенционалних LED светиљкама, али и кроз примену телеменаџмент система који омогућавају различите режиме осветљења, засноване на редукацији светлосног флуksа светиљки (димовању). Међутим, неадекватна примена таквих (адаптивних) система осветљења може довести до негативних последица у пракси, које се најчешће манифестују кроз недовољну видљивост.

Један од главних проблема је утицај примене LED технологије на квалитет електричне енергије. После поменутих замена конвенционалних LED светиљкама, уочени су проблеми са

вишим хармоницима у инсталацијама јавног осветљења, и то у погледу дисторзије напона и струје, као и проблеми са ниским факторима снаге светилки. Разлог за то представља употреба драјвера стандардних карактеристика, као и примена различитих сценарија димовања. Додатни разлог представља и утицај стварног (изобличеног) напона на фактор снаге и хармонијску дисторзију напона и струје LED светилки. Из наведених разлога, релевантни електрични параметри светилки често нису усаглашени са оним који су декларисани од стране произвођача, што може довести до погрешних закључака по питању уштеда утрошене електричне енергије, као примарног циља замене конвенционалних LED светилкама у инсталацијама уличног осветљења.

Други велики проблем при замени конвенционалних LED светилкама представља неадекватан избор нових (заменских) светилки, и то доминантно у погледу постизања нееквивалентних релевантних фотометријских параметара. Закључци изведени на основу једног случаја улице/пута и одсуство уважавања ефеката мезопског виђења, који представљају додатну предност LED технологије, такође су чести у пројектантској пракси. Наведени недостаци могу довести до погрешних закључака по питању уштеда утрошене електричне енергије, али и по питању укупних трошкова, чија редукција представља секундарни циљ замене конвенционалних LED светилкама у инсталацијама уличног осветљења.

Имајући у виду све напред наведено, утврђивање бројних реалних показатеља квалитета и оправданости примене LED технологије у уличном осветљењу, као и развој методологија како за објективну тако и за субјективну евалуацију свих параметара квалитета LED уличног осветљења, представљали су основну мотивацију за израду предметне докторске дисертације.

2 ПРЕДМЕТ ИСТРАЖИВАЊА

Смањење потрошње електричне енергије у осветљењу улица (путева) углавном је реализовано заменом конвенционалних (које садрже натријумове изворе високог притиска или метал-халогене изворе) LED светилкама, али и кроз примену телеменаџмент система који омогућавају различите режиме осветљења, засноване на редукцији светлосног флукса светилки (димовању). Међутим, неадекватна примена таквих (адаптивних) система осветљења може довести до негативних последица у пракси, које се најчешће манифестују кроз недовољну видљивост.

Заменом конвенционалних LED светилкама, долази до проблема са дисторзијом напона и струје, као и са ниским факторима снаге светилки у инсталацијама јавног осветљења, што је проузроковано како употребом драјвера стандардних карактеристика, тако и применом различитих сценарија димовања. Додатни узрок представља и утицај стварног (изобличеног) напона на фактор снаге и хармонијску дисторзију напона и струје LED светилки. Због тога релевантни електрични параметри светилки често нису усаглашени са параметрима декларисаним од стране произвођача, што може навести на погрешне закључке по питању уштеда утрошене електричне енергије, које представљају примарни циљ замене конвенционалних LED светилкама у инсталацијама осветљења улица/путева.

У циљу поређења релевантних показатеља енергетске ефикасности инсталација уличног осветљења изведених помоћу LED и конвенционалних (натријумових или метал-халогених) светилки, изабрано је 17 типичних градских саобраћајница којима одговарају све стандардне светлотехничке класе, за које су, уз избор адекватног распореда светилки (једнострани, цик-цак, двострани наспрамни или централни), извршени фотометријски прорачуни уз претпостављену примену савремених натријумових, метал-халогених и LED светилки топло-беле боје (придружене температуре боје 3000 K) и неутралне беле боје (придружене температуре боје 4000 K). Избор оптималног решења осветљења улице/пута извршен је по два критеријума: критеријуму максималног растојања између стубова и критеријуму минималне инсталисане снаге. Излазни подаци фотометријских прорачуна релевантни за техно-економску анализу су типови натријумових, метал-халогених и LED светилки, који одговарају оптималним решењима осветљења, као и висине и растојања између суседних стубова (светилки) у оквиру свих 17 разматраних случајева.

На основу фотометријских прорачуна, а у циљу анализе утицаја изабраних светилки на квалитет електричне енергије, у лабораторијским условима и при мрежном напону, извршена су мерења вредности следећих параметара: активне снаге, реактивне снаге, струје, фактора снаге, THD напона и THD струје.

Лабораторијска мерења наведених параметара (електричних величина) извршена су при напонима чији је степен изобличења вариран додавањем отпорности и пригушнице на ред са сваком тестираном светилком (таквим поступком је симулирана кабловска веза између разводног ормана јавног осветљења и прве светилке у инсталацији осветљења улице/пута). Употребом телеменаџмент система, сви наведени параметри су разматрани и у режимима рада са редукованим светлосним флуksom (који се примењују у касним ноћним и раним јутарњим сатима). Уважени су и ефекти мезопског виђења (нивои сјајности разматраних саобраћајница за моторни и мешовити саобраћај одговарају мезопском виђењу).

Горе поменути измерени параметри представљају улазне податке за анализу сценарија јавног осветљења са три режима рада, за четири типичне саобраћајнице у циљу одређивања процентуалних разлика утрошене активне и реактивне електричне енергије на годишњем нивоу у случају инсталирања LED уместо конвенционалних (натријумових и метал-халогених) светилки.

Извршена су и мерења вредности релевантних електричних параметара светиљки у реалним условима – на два дела реалне инсталације LED уличног осветљења (једне са LED драјверима са стандардним, а друге са LED драјверима са побољшаним карактеристикама). На основу измерених вредности развијен је математички модел за прорачун изобличења напона у трофазним инсталацијама уличног осветљења. Након тога је реализован програм у Matlab-у, који је примењен на четири типичне инсталације осветљења улица (путева), с циљем да се одреди максималан број светиљки за који није прекорачена ниједна од граница које се односе на пад напона, THD напона и појединачне хармонике напона у нормалном и редукованим режимима осветљења.

За 6 типичних случајева са фотометријски упоредивим светлотехничким решењима са натријумовим и LED светиљкама (по два случаја за централни, двострани наспрамни и једнострани распоред стубова, којима редом одговарају стандардне светлотехничке класе улице/пута M1, M2 и M3) анализиран је и утицај примене LED светиљки на пресек кабла струјног кола осветљења, ефикасност заштите од електричног удара (у случају квара) и пад напона.

Пошто у пропагандним материјалима произвођача LED технологије није помињан негативан утицај LED извора хладно-беле боје на људско здравље, иако бирани због највеће светлосне искористивости међу свим LED пакетима, поучени негативним реакцијама јавности, пројектанти уличног осветљења данас избегавају коришћење LED пакета хладно-беле боје. Уместо њих, обично бирају LED пакете неутралне беле боје, који су енергетски ефикаснији од LED пакета топло-беле боје. Због разлике између светлосних искористивости комерцијално доступних LED пакета неутралне беле боје (4000 K) и топло-беле боје (3000 K) (које карактерише исти општи индекс репродукције боја) која износи само 6%, као и чињенице да се предвиђа постизање једнаке светлосне искористивости LED пакета топло-беле и неутралне беле боје у блиској будућности, енергетска ефикасност (светлосна искористивост) више не би требало да буде одлучујући критеријум при избору боје LED пакета намењених за улично осветљење. Критеријум избора боје светлости LED пакета би требало да се заснива на субјективним доживљајима пешака и возача, односно, само возача уколико је улица (пут) искључиво намењена за моторни саобраћај.

Имајући у виду напред наведено, на основу пилот пројекта у оквиру кога је уз помоћ телеменаџмент система, мобилног луминансметра (CCD камере), анкете и статистичке анализе њених резултата извршено поређење субјективних показатеља квалитета инсталација уличног осветљења реализованих помоћу LED чипова топло-беле и неутралне беле боје, као и на основу анализе релевантних референци које су се бавиле здравственим аспектима употребе LED светиљки у уличном осветљењу, дате су препоруке у вези са LED чиповима одговарајуће придружене температуре боје за примену у уличном осветљењу.

Први део истраживања је посвећен субјективном доживљају видљивости и видног комфора пешака при коришћењу LED пакета топло-беле боје (придружене температуре боје 3000 K) и неутрално беле боје (придружене температуре боје 4000 K) у уличном осветљењу.

Други део истраживања се односи на одређивање префериране боје светлости LED пакета из перспективе возача, због чега ће се извршити оцењивање релевантних параметара квалитета LED осветљења топло-беле и неутрално беле боје (редом 3000 K и 4000 K), и то како објективно тако и субјективно. Прво оцењивање је засновано на видљивости малих мета и пешака, а друго на попуњавању упитника од стране испитаника који су учествовали у стварној вожњи. Испитивање које се односи на видљивост малих мета базирано је на условима организације ANSI/IESNA, док ће испитивање које ће се односити на детекцију пешака бити засновано на софтверској анализи фотографија пешака који прелази улицу. Субјективно поређење релевантних параметара осветљења обе инсталације изведено је коришћењем упитника.

При замени конвенционалних LED светилкама често долази и до неадекватног избора нових (заменских) светилки, и то доминантно у погледу постизања нееквивалентних релевантних фотометријских параметара, због чега може доћи до погрешних закључака по питању уштеда утрошене електричне енергије, али и по питању укупних трошкова.

Због претходно наведеног је након свих извршених прорачуна, мерења, анализа и симулација урађена и техно-економска анализа оправданости употребе LED технологије у уличном осветљењу. Техно-економска анализа је посвећена адекватном поређењу LED светилки са светилкама са натријумовим изворима високог притиска или метал-халогеним изворима са керамичким горионом, примењених за осветљење улица или путева намењених за моторизовани или мешовити саобраћај. Поређење је извршено са становишта потрошње електричне енергије и економских показатеља. Разматране су LED светилке са пакетима неутралне беле и топло-беле боје, светлосне искористивости до 160 lm/W, а за обе анализе су коришћена светлотехничка решења по критеријуму минималне инсталисане снаге. Поред стандардних LED пакета који се данас користе у светилкама намењеним осветљењу улица/путева, узети су у обзир и они које карактерише светлосна искористивост од 190 lm/W, који се комерцијално могу очекивати у блиској будућности. Светлотехничка решења су одређена тако да за сваку саобраћајницу буду испуњени сви фотометријски захтеви специфицирани у актуелним EN стандардима, уз услов да добијени нивои сјајности мање од 5% одступају од захтеваних. Применом израђене опште процедуре за поређење различитих инсталација осветљења улица/путева са или без уважавања мезопских ефеката, извршено је поређење само фотометријски еквивалентних светлотехничких решења. У погледу економске анализе, поред утицаја стандардних параметара – стопе актуелизације и цене електричне енергије – на укупне инвестиционе трошкове, анализа осетљивости обухвата и утицај животног века LED пакета.

3 СТРУКТУРА ДОКТОРСКЕ ДИСЕРТАЦИЈЕ

Докторска дисертација има неколико јасно дефинисаних сегмената који чине логичку целину.

Прво поглавље даје кратак осврт на историјат LED технологије, њену улогу у јавном осветљењу и њене предности и недостатке са аспекта фотометријских, техничких, здравствених и економских параметара.

Друго поглавље се бави предметом истраживања докторске дисертације и има за циљ да објасни мотивацију за свако од истраживања.

Треће поглавље даје структуру докторске дисертације по поглављима и описује садржај сваког од поглавља.

У четвртом поглављу су у циљу анализе утицаја натријумових, метал-халогених и LED светилки на квалитет електричне енергије, мрежним анализатором у лабораторијским условима и при мрежном напону извршена мерења њихових тренутних вредности напона и струје. Експерименти су подељени у два дела: први, који је подразумевао директно прикључење светилки на мрежни напон, и други, који је подразумевао прикључење светилки на мрежни напон преко редне везе отпорности и пригушнице која је имала за циљ промену степена изобличења напона на светилкама. Анализом сценарија јавног осветљења са три режима рада, на основу резултата мерења су за четири типичне саобраћајнице одређене процентуалне разлике утрошене активне и реактивне електричне енергије на годишњем нивоу у случају инсталирања LED уместо конвенционалних (натријумових и метал-халогених) светилки. Такође је представљен и развијени математички модел за прорачун изобличења напона у трофазним инсталацијама уличног осветљења које карактерише једностран или централни распоред стубова, чија је главна предност у избегавању уобичајеног, али захтевног прорачуна сопствених и међусобних магнетских флуксева, потребних за одређивање сопствене и међусобне адмитансе. Уместо тога, користе се параметри компоненти мреже у директном, инверзном и нултом компонентном систему, што је учињено комбиновањем две технике које се широко користе у електроенергетици: (1) директном и инверзном Фортескјуовом трансформацијом, и (2) моделима импедансе за директни, инверзни и нулти компонентни систем. За 6 типичних случајева са фотометријски упоредивим светлотехничким решењима са натријумовим и LED светилкама (по два случаја за централни, двострани наспрамни и једностран распоред стубова, којима редом одговарају стандардне светлотехничке класе улице/пута М1, М2 и М3) анализиран је и утицај примене LED светилки на пресек кабла струјног кола осветљења, ефикасност заштите од електричног удара (у случају квара) и пад напона.

Пето поглавље се бави субјективним доживљајима видљивости и видног комфора пешака при коришћењу LED пакета топло-беле и неутрално беле боје у уличном осветљењу. Истраживање је засновано на поређењу субјективних доживљаја релевантних параметара квалитета осветљења тротоара улице осветљене помоћу LED пакета придружене температуре боје 3000 K и 4000 K.

У шестом поглављу представљено је истраживање које има за циљ да одреди преферирану боју светлости LED пакета из перспективе возача, због чега је извршена оцена релевантних параметара квалитета осветљења како објективно, тако и субјективно. Прво истраживање је подразумевало два испитивања заснована на видљивости (детекцији) малих мета и пешака, а друго анкету са стварном вожњом.

Седмо поглавље посвећено је адекватном поређењу LED светилки са светилкама са натријумовим изворима високог притиска или метал-халогеним изворима са керамичким

гориоником, примењених за осветљење улица или путева намењених за моторизовани или мешовити саобраћај. Поређење је извршено са становишта потрошње електричне енергије и економских показатеља.

Свако од поглавља 4–7 садржи и преглед публикованих резултата у вези са темом поглавља.

На крају рада, у оквиру закључног поглавља, сажето су приказани сви важнији резултати истраживања у оквиру докторске дисертације, као и главни доприноси дисертације у вези са утврђивањем објективних и субјективних показатеља квалитета LED технологије која се користи у уличном осветљењу, са аспекта енергетске ефикасности, квалитета електричне енергије, утицаја на електричну инсталацију уличног осветљења, боје светлости и економских параметара.

4 ДИСТОРЗИЈА НАПОНА У LED ИНСТАЛАЦИЈАМА ОСВЕТЉЕЊА УЛИЦА И ПУТЕВА

У недостатку радова који се баве утицајем комбиноване хармонијске емисије великог броја LED светилки у инсталацији уличног осветљења на таласни облик напона напајања, а у циљу постизања јасних закључака, смерница и/или препорука у вези са овим проблемом, овај део докторске дисертације представља резултате даљег и захтевнијег проучавања проблема квалитета електричне енергије у случају како нормалног тако и режима са редукованим светлосним флуksom LED уличног осветљења.

У циљу анализе утицаја натријумових, метал-халогених и LED светилки на квалитет електричне енергије, мрежним анализатором су у лабораторијским условима и при мрежном напону извршена мерења њихових тренутних вредности напона и струје. Експерименти су подељени у два дела: први, који је подразумевао директно прикључење светилки на мрежни напон, и други, који је подразумевао прикључење светилки на мрежни напон преко редне везе отпорности и пригушнице која је имала за циљ промену степена изобличења напона на светилкама.

Анализом сценарија јавног осветљења са три режима рада, на основу резултата мерења су за четири типичне саобраћајнице одређене процентуалне разлике утрошене активне и реактивне електричне енергије на годишњем нивоу у случају инсталирања LED уместо конвенционалних (натријумових и метал-халогених) светилки.

Развијен је и математички модел за прорачун изобличења напона у трофазним инсталацијама уличног осветљења које карактерише једностран или централни распоред стубова. Модел је детаљно описан у поглављу 4.3.2. Основе за модел су: (1) Сваки хармоник (основни и виши хармоници) се разматра независно коришћењем једнофреквентног кола. (2) Струјни извори LED светилки у сваком од ових струјних кола одређују се помоћу резултата мерења струјног спектра који карактерише разматране LED светилке (без уважавања промене струјног спектра LED светилке са променом ефективне вредности напона и степена изобличења напона). (3) Струја у каблу који повезује стубове светилки израчунава се сабирањем струја LED светилки. (4) Метода симетричних компоненти [1] је примењена за формирање директне, инверзне и нулте ($d, i, 0$) компоненте струја симетричног система кроз кабл који повезује стубове светилки, полазећи од несиметричних струја у трофазном А, В, С систему. (5) Степен изобличења напона када су LED светилке искључене користи се као улазни податак и може бити постављен произвољно. (6) Модел важи за било који број стубова. (7) Решавањем модела импедансе у сваком од $d, i, 0$ система и за сваки од хармоника, добијају се напони у $d, i, 0$ систему у сваком чвору кола (укључујући и напоне на сваком стубу). (8) Коришћењем трансформације $d, i, 0$ у А, В, С систем, одређује се фазни напон у свакој од А, В, С фаза у сваком чвору кола.

Главна предност новог модела је у избегавању уобичајеног, али захтевног прорачуна сопствених и међусобних магнетских флуksева, потребних за одређивање сопствене и међусобне адмитансе. Уместо тога, користе се параметри компоненти мреже у $d, i, 0$ систему (као што је детаљно објашњено у поглављу 4.3.2, они се могу се добити много лакше). Ово је учињено комбиновањем две технике које се широко користе у електроенергетици: (1) Фортескјуова трансформација трофазних величина у директни, инверзни и нулти компонентни систем, и (2) модел импедансе за симетричне системе (који се примењује у сваком од $d, i, 0$ система). Према истраживању аутора, не постоје истраживања која примењују овај приступ у проучавању несиметричних и нелинеарних оптерећења у инсталацијама осветљења.

За развијање модела, као и за тестирање тачности одговарајућег софтвера, извршена су мерења на два дела инсталације уличног осветљења (једне са драјверима са стандардним, а друге са драјверима са побољшаним карактеристикама). Након тога, развијени софтвер је примењен на четири типичне инсталације осветљења улица (путева), с циљем да се одреди максималан број светиљки за који није прекорачена ниједна од граница која се односи на падове напона, тоталну хармонијску дисторзију напона и појединачне хармонике напона у нормалном и режимима осветљења са смањеним светлосним флуksom.

За 6 типичних случајева са фотометријски упоредивим светлотехничким решењима са натријумовим и LED светиљкама (по два случаја за централни, двострани наспрамни и једнострани распоред стубова, којима редом одговарају стандардне светлотехничке класе улице/пута M1, M2 и M3) анализиран је и утицај примене LED светиљки на пресек кабла струјног кола осветљења, ефикасност заштите од електричног удара (у случају кvara) и пад напона. Анализа је обухватила инсталације осветљења на деоницама иницијалне дужине 1000 m, реализоване помоћу конвенционалних светиљки са натријумовим изворима високог притиска и LED светиљки. Претпостављена је употреба каблова са алуминијумским проводницима пресека 10 mm^2 , 16 mm^2 или 25 mm^2 , као и следеће вредности фактора снаге: $\cos \varphi = 0,85$ за конвенционалне светиљке са електромагнетским баластима, односно $\cos \varphi = 0,95$ за LED светиљке са драјвером.

4.1 Преглед публикованих резултата у вези са дисторзијом напона у LED инсталацијама осветљења улица и путева

Осветљење, које чини око 15% потрошње светске електричне енергије [2], представља област са потенцијалом за највећи проценат уштеда енергије. До недавно је учешће осветљења било око 20% [3], што јасно указује на позитивне ефекте масовне примене високо енергетски ефикасне LED технологије широм света. Покушаји да се потрошња електричне енергије у осветљењу улица (путева) смањи углавном су реализовани кроз замену конвенционалних (обично са живиним изворима високог притиска, метал-халогеним изворима и натријумовим изворима високог притиска) LED светиљкама, као и кроз примену адаптивних система који омогућавају различите сценарије димовања. Стога, како би се избегле могуће негативне последице у пракси, потребно је свестрано проучити проблеме у вези са квалитетом електричне енергије LED светиљки намењених осветљењу улица (путева).

Врло је мало истраживања која се баве поређењем хармонијске дисторзије конвенционалних и LED светиљки намењених за осветљење путева. У референци [4] анализирана је дисторзија напона у изолованом СН/НН дистрибутивном систему који се испоручује синхроним генераторима снаге 600 kVA. Оптерећење је представљао стари систем јавног осветљења са светиљкама са живиним изворима високог притиска, које су касније замењене LED светиљкама. За хармонијску анализу примењена је методологија токова оптерећења (снага), прилагођена трофазној четворожичној надземној кабловској мрежи узимајући у обзир утицаје неутралних проводника и земље. Анализа је показала да је замена старих светиљки са живиним изворима високог притиска савременим LED светиљкама резултирала смањењем THD_u -а (тоталне хармонијске дисторзије напона). После замене метал-халогених LED рефлекторима у инсталацији спољашњег осветљења, у референци [5] закључено је да је потрошња електричне енергије смањена, а фактор снаге побољшан. У истраживању представљеном у референци [6] показано је да су LED светиљке намењене за улично осветљење смањиле хармонијске вредности у односу на светиљке са натријумовим изворима високог притиска. Помоћу експерименталне поставке, у референци [7] је такође утврђено да тестирана LED светиљка има боље перформансе од тестиране светиљке са

натријумовим извором високог притиска у погледу квалитета електричне енергије. За сличне таласне облике напона напајања, таласни облик струје светилке са натријумовим извором био је у великој мери изобличен у поређењу са оним који карактерише LED светилку. Упоредивањем рада LED светилке и светилке са натријумовим извором кроз експерименталну студију, у референци [8] је потврђено да употреба LED светилке уместо светилке са натријумовим извором не би резултирала повећањем хармонијске емисије. С друге стране, мерења представљена у референци [9] показала су да LED светилке одликује већа хармонијска дисторзија у поређењу са светилкама са натријумовим изворима или флуо цевима. Овај закључак, контрадикторан онима изнесеним у референцама [6–8], последица је различитих типова драјвера који се користе у тестираним LED светилкама [10], због чега су и конвенционални и побољшани LED драјвери били укључени у овом истраживању.

У студији [11] заснованој на упоредивим (практично једнаким) фотопским или мезопским нивоима сјајности и испуњењу свих фотометријски релевантних захтева за светлотехничке класе улица (путева) наведених у референци [12], показано је да примена LED светилки уместо светилки са натријумовим изворима обезбеђује око 31% мању потрошњу електричне енергије у нормалном режиму осветљења. Уз примену вишестепених сценарија димовања годишња потрошња електричне енергије би била око 50% мања, што би могло бити смањено за додатних 10% када се у обзир узму и мезопски ефекти. Међутим, примена вишестепених сценарија димовања повећала је процентуално учешће реактивне енергије у годишњој потрошњи за 50%. Ова чињеница је била главна мотивација за детаљно проучавање проблема квалитета електричне енергије (углавном у погледу виших хармоника) у инсталацијама LED уличног осветљења чији су резултати представљени у овом раду.

Конвенционалне LED светилке намењене за осветљење путева карактерише константна једносмерна струја на излазу AC/DC претварача (LED драјвера) са двостепеном прекидачком топологијом и галванском изолацијом, који је дизајниран да има висок фактор снаге при називном улазном напону и називној струји [13]. Међутим, покривајући широк спектар улазних наизменичних напона, као и широки опсег излазних једносмерних струја и напона [14, 15], у већини случајева такви драјвери раде при напонима и струјама другачијим од називних, што отежава одржавање прихватљивих вредности фактора снаге и хармоника [13]. Ово је посебно тачно у случају LED светилки конструисаних за рад у различитим режимима осветљења. Према истраживању аутора, само две студије бавиле су се хармонијском емисијом у условима димовања LED светилки намењених за осветљење путева.

Истраживање представљено у референци [16] проучавало је рад осветљења пута изведеног помоћу LED светилки променом ефективне вредности напона напајања (207–253 V), степена изобличења напона напајања (0%, 1,79%, 2,5%, 5% и 7,5%) и нивоа димовања (0–100%, са кораком од 10% и напоном напајања синусоидалног таласног облика). Четири светилке су тестиране у лабораторијским условима. На основу резултата мерења констатовано је да је промена ефективне вредности напона напајања имала највећи утицај на реактивну снагу светилке, као и да је тотална хармонијска дисторзија струје (THDi) светилке била параметар који карактеришу највеће промене у случају димовања (повећала се скоро 3 пута у поређењу са вредношћу која одговара нормалном режиму). Мерења су потврдила да тип драјвера изузетно утиче на струјну дисторзију (на пример, THDi при називном неизобличеном напону износио је 10,46%, 13,94%, 128,58% и 21,51% за четири тестиране светилке).

У референци [13] истражен је однос између светлосног флукса и активне снаге, као и проблеми са квалитетом електричне енергије при димовању светилки са натријумовим изворима и LED светилки које се користе у уличном осветљењу. Мерењима у радионици и на терену у нормалном и три режима димовања (са 26%, 44% и 63% смањеним светлосним флуksom), светилке са натријумовим изворима су упоређене са LED светилкама неутралне

беле боје (придružене температуре боје 4000 K), које су садржале конвенционални драјвер, као и са LED светиљкама топло-беле боје (придružене температуре боје 3000 K), које су садржале драјвер са побољшаним карактеристикама у условима димовања. Показано је да LED светиљке, које садрже драјвер са побољшаним карактеристикама у условима димовања, карактерише значајно смањење $THDi$ у већини разматраних режима осветљења.

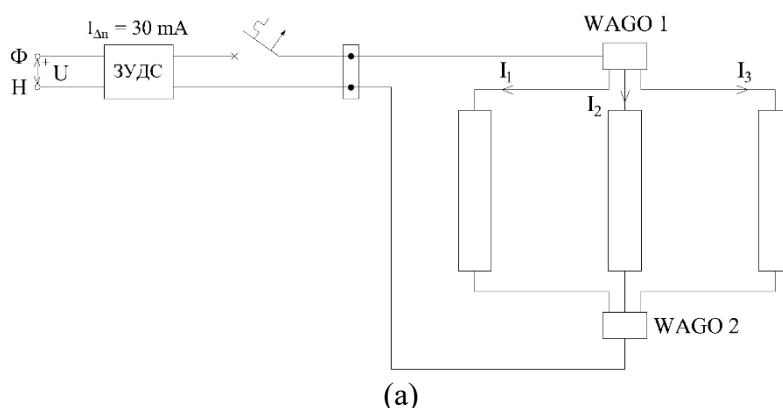
4.2 Лабораторијска мерења електричних параметара светиљки

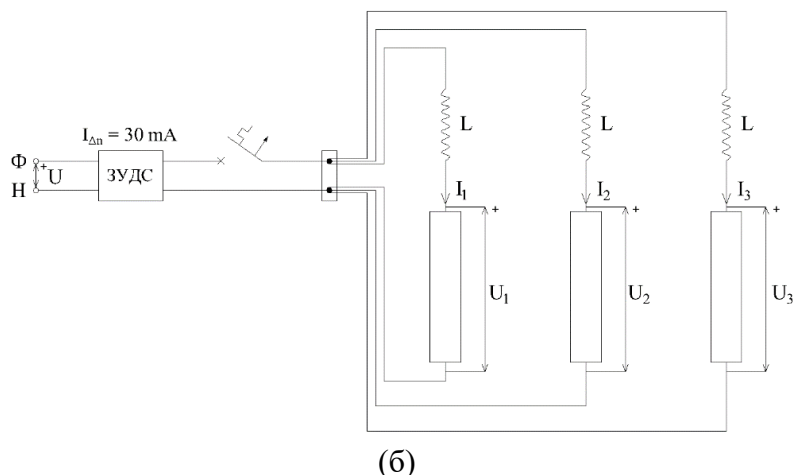
Како би се упоредили релевантни фотометријски параметри инсталација уличног осветљења изведених помоћу LED светиљки и конвенционалних (натријумових или метал-халогених) светиљки, изабрано је 17 типичних градских саобраћајница (светлотехничких класа M1–M6), за које су, уз избор адекватног распореда светиљки (једностране, цик-цак, двостране наспрамне и централне), извршени фотометријски прорачуни са савременим натријумовим, метал-халогеним и LED светиљкама топло-беле (придružене температуре боје 3000 K) и неутралне беле боје (придružене температуре боје 4000 K) по два критеријума: критеријуму максималног растојања између стубова и критеријуму минималне инсталисане снаге (детаљан опис фотометријских прорачуна дат је у поглављу 7.2). На основу резултата фотометријских прорачуна (Прилог 1) и доступности опреме, за лабораторијску анализу изабране су следеће светиљке:

- Опух 2, са натријумовим сијалицама снаге 70, 100, 150 и 250 W и метал-халогеним сијалицама снаге 70, 100 и 150 W (3000 K), као и са одговарајућим програмабилним електронским баластима за сваку од разматраних снага сијалица,
- Ampere Mini 24 LED (53 W, 4000 K) са одговарајућим програмабилним драјвером 1-10 V (драјвер типа Philips Xitanium Xi LP 75W 0.3-1.0A S1 230V S240 sXt [17]), и
- Ampere Maxi 80 LED (165 W, 4000 K) са одговарајућим програмабилним драјвером 1-10 V (драјвер типа LG Innotek PISE-A165X [18]).

Како би разматране светиљке биле изложене (практично) истом таласном облику мрежног напона, оне су повезане паралелно.

На слици 1 приказана је шема повезивања светиљки на мрежни напон у оба дела експеримента.





Слика 1. Шема повезивања светилки на мрежни напон у првом (а) и другом (б) делу експеримента

У првом делу експеримента фазни проводници светилки повезани су на Wago клему где је извршено гранање фазног проводника (означену са Wago 1 на слици 1а) од мреже ка пријемницима, док су неутрални проводници светилки повезани на другу Wago клему где је извршено гранање неутралног проводника (означену са Wago 2 на слици 1а) од мреже ка пријемницима. Wago клема са фазним проводницима (Wago 1) је проводником пресека 4 mm^2 преко клеме повезана са аутоматским прекидачем називне струје 16 А и карактеристике окидања С, који је везан на фазу заштитног уређаја диференцијалне струје струје реаговања 30 mA. Wago клема са неутралним проводницима (Wago 2) је преко клеме везана на нулу заштитног уређаја диференцијалне струје који је повезан са утикачем којим је вршено прикључење светилки на мрежни напон.

У другом делу експеримента је повезивање светилки извршено на нешто другачији начин – део инсталације од клеме до сваке од Wago клема (укључујући и њих) замењен је са фазним, односно неутралним проводником, дужине 5 m, за сваку од разматраних светилки (слика 1б). Сваки део инсталације од аутоматског прекидача до светилке садржао је и по три пригушнице везане паралелно чија је еквивалентна индуктивност износила $35,67 \text{ } \mu\text{H}$.

Дужине фазних и неутралних проводника, односно њихова укупна еквивалентна отпорност, као и вредност еквивалентне индуктивности пригушница, одређене су еквивалентном отпорношћу и индуктивношћу (реактансом) алуминијумског кабла $4 \times 35 \text{ mm}^2$ дужине 80 m који повезује светилке у инсталацији осветљења у улици Милутина Миланковића која је детаљније описана у поглављима 4.3.1, 5.2.1 и 6.2.1. Вредности еквивалентне отпорности и индуктивности (реактансе) овог кабла, срачунате на основу вредности подужне отпорности и реактансе које се односе на вишежилни кабл са жилама секторског пресека и XLPE изолацијом из референце [19] при температури проводника од $45 \text{ } ^\circ\text{C}$, износиле су $153 \text{ m}\Omega$ ($\approx 2 \cdot 80 \text{ m} \cdot 0,956 \text{ m}\Omega/\text{m}$) и $36,92 \text{ } \mu\text{H}$ ($11,6 \text{ m}\Omega$ ($\approx 2 \cdot 80 \text{ m} \cdot 0,0725 \text{ m}\Omega/\text{m}$)), респективно (уз уважавање и фазних и неутралних проводника). На основу добијене еквивалентне отпорности кабла и подацима из референце [19] при температури проводника од $45 \text{ } ^\circ\text{C}$, за повезивање светилки у другом делу експеримента изабран је бакарни проводник пресека $1,5 \text{ mm}^2$, укупне дужине (фазног и неутралног проводника) 10 m. С друге стране, еквивалентна реактанса изабраног проводника износи $1,57 \text{ m}\Omega$. Да би се постигла вредност реактансе приближно једнака реактанси напојног кабла, као и да би се омогућило успостављање назначене струје сваке од светилки, изабране су 3 пригушнице индуктивности по $107 \text{ } \mu\text{H}$, везане паралелно.

Мерења су извршена мрежним анализатором Circutor AR5L, који омогућава мерење три напона у оквиру трофазног (четворожичног) система и четири струје истовремено, због чега је у сваком тренутку овог експеримента истовремено мерен један напон и три струје.

У првом делу истраживања извршена су мерења напона на почетку струјног кола (између фазе и нуле заштитног уређаја диференцијалне струје) пре прикључења светиљки и са прикљученим светиљкама, као и струја сваке од прикључених светиљки. Због начина повезивања светиљки (паралелне везе), као и доста нижих вредности еквивалентних отпорности и индуктивности (реактанси) коришћених проводника него у другом делу експеримента, сматрано је да је напон на почетку струјног кола једнак напону на свакој од светиљки. Мерења су вршена у трајању до 60 s са кораком од 1 s, што у пракси значи да се у размаку од једне секунде снимају тренутне вредности напона и струје у оквиру једне периоде (128 одбирака у току периоде од 0,02 s).

У другом делу истраживања извршена су мерења напона на почетку струјног кола (између фазе и нуле заштитног уређаја диференцијалне струје) пре и после прикључења светиљки, као и напона и струја на свакој од светиљки. Мерења су вршена у трајању до 10 s са кораком од 1 s.

На основу измерених тренутних вредности напона и струје у оквиру једне периоде, применом Фуријеових редова и софтверског пакета Matlab, добијене су ефективне вредности и фазни углови хармоника напона и струје за посматрани тренутак, што је омогућило израчунавање следећих релевантних параметара:

- активне снаге,
- реактивне снаге,
- фактора снаге,
- THD напона (THD_u), и
- THD струје (THD_i).

Разматрани су и режими рада светиљки са редукованим светлосним флуksom (који се примењују у касним ноћним сатима), што је омогућила употреба Owlet телеменаџмент система [20]. Помоћу постављене Owlet веб странице и путем Zigbee мреже успостављена је комуникација са LuCo NXP контролером инсталираним у свакој од светиљки, што је омогућило процентуалну регулацију нивоа контролног сигнала, односно регулацију светлосног флуksа светиљке. На овај начин омогућено је уважавање ефеката мезопског виђења (нивои сјајности саобраћајница за моторни и мешовити саобраћај одговарају мезопском виђењу). Узимајући у обзир да се у касним ноћним сатима светлотехничка класа спушта највише за две класе, подешавање режима рада са редукованим светлосним флуksom метал-халогених и LED светиљки како у фотопским, тако и у мезопским условима, вршено је процентуалном регулацијом светлосног флуksа светиљки на основу табеле 1. Вредности мезопских (коригованих фотопских) средњих сјајности за разматране односе скотопског и фотопског светлосног флуksа (S/P) од 1,2 и 1,6, који одговарају метал-халогеним и LED светиљкама, респективно, преузете су из референце [21]. Нивои димовања од 100% одговарају номиналном режиму сваке од светиљки за сваку од светлотехничких класа M1–M6, док остали нивои димовања представљају односе одговарајућих мезопских и фотопских средњих сјајности у режимима димовања у оквиру сваке од светлотехничких класа.

Табела 1. Средње сјајности и нивои димовања у фотопским и разматраним мезопским условима

Светлотехничка класа улице	Фотопски услови		Мезопски услови			
	Средња сјајност коловоза (cd/m ²)	Ниво димовања (%)	Средња сјајност коловоза при S/P = 1,2 (топло-бела боја светлости) (cd/m ²)	Ниво димовања (%)	Средња сјајност коловоза при S/P = 1,6 (неутрална бела боја светлости) (cd/m ²)	Ниво димовања (%)
M1	2,00	100	1,94	97	1,89	94
	1,50	75	1,43	71	1,39	69
	1,00	50	0,93	46	0,90	45
M2	1,50	100	1,43	95	1,39	93
	1,00	67	0,93	62	0,90	60
	0,75	50	0,69	46	0,66	44
M3	1,00	100	0,93	93	0,90	90
	0,75	75	0,69	69	0,66	66
	0,50	50	0,45	45	0,42	42
M4	0,75	100	0,69	92	0,66	88
	0,50	67	0,45	60	0,42	56
	0,30	40	0,26	35	0,24	32
M5	0,50	100	0,45	90	0,42	84
	0,30	60	0,26	52	0,24	48
M6	0,30	100	0,26	86	0,24	80

У табелама 2–10 представљени су резултати прорачуна релевантних параметара светиљки директно прикључених на мрежни напон, док су у табелама 11–19 приказани резултати прорачуна релевантних параметара светиљки прикључених на мрежни напон преко редне везе отпорности и индуктивности. Свака од табела 2–10 садржи вредности нивоа димовања, THD вредности напона на почетку кола пре и после прикључења светиљки, THD вредности струје светиљке, вредности активне (P), привидне (S) и неактивне снаге (N), као и фактора снаге према релевантним IEEE и DIN стандардима [22, 23], вредности реактивне снаге према дефиницијама Kusters-а и Moore-а (Q_{kusL} и Q_{kusC}) [24], као и вредности реактивне (Q_{cz}) и расипне (D_s) снаге према CPC теорији Czarnecki-ог [25].

Активна снага се дефинише као средња вредност тренутне снаге у основној периоди $T = 2\pi/\omega_1$ и може се приказати као сума активних снага појединих хармонијских компоненти P_k :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = \sum_{k=1}^n U_k I_k \cos \varphi_k = P_k \quad (1)$$

где су u и i тренутне вредности напона и струје, U_k и I_k представљају ефективне вредности k -тих хармоника напона и струје са одговарајућим фазним угловима θ_k и ψ_k , n је ред највишег хармоника, а $\varphi_k = \theta_k - \psi_k$ је фазни померај између k -тог хармоника напона и струје.

Привидна снага потрошача се дефинише се као производ ефективне вредности напона U и ефективне вредности струје I , уз уважавање присуства виших хармоника:

$$S = U \cdot I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\sum_{k=1}^n U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^m I_k^2} \quad (2)$$

Фактор снаге се дефинише као однос активне и привидне снаге:

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad (3)$$

Неактивна снага се добија на основу привидне и активне снаге:

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (4)$$

Неактивна снага је дефинисана од стране Fryze-а [26] и прихваћена је у немачком DIN стандарду 40110 [23] и америчком IEEE Standardu 1459-2010 [22]. Често се за неактивну снагу користи и израз тотална реактивна снага. Међутим, неактивна снага се разликује од реактивне снаге када напони и струје садрже више хармонике.

Budeanu је дефинисао реактивну снагу Q у једнофазним системима као суму реактивних снага свих хармоника [26]:

$$Q = \sum_{k=1}^n U_k I_k \sin \varphi_k = Q_k \quad (5)$$

На основу производа различитих хармоника струје и напона, Budeanu је дефинисао снагу деформације или дисторзије D , тако да је комплетирао једначину за ортогоналност снага [26]:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (6)$$

Дефиниција Kusters-а и Moore-а се заснива на минимизацији ефективне вредности струје у напојном воду потрошача коришћењем оптималне капацитивности кондензатора C_{opt} или индуктивности пригушнице L_{opt} за компензацију неактивне снаге потрошача [24]:

$$C_{\text{opt}} = -\frac{\frac{1}{T} \int_0^T \dot{u} i dt}{\frac{1}{T} \int_0^T \dot{u}^2 dt} = \frac{1}{\omega_1} \cdot \frac{\sum_{k=1}^{\min(n,m)} k U_k I_k \sin \varphi_k}{\sum_{k=1}^n k^2 U_k^2} \quad (7)$$

$$L_{\text{opt}} = -\frac{\frac{1}{T} \int_0^T \tilde{u}^2 dt}{\frac{1}{T} \int_0^T \tilde{u} i dt} = \frac{1}{\omega_1} \cdot \frac{\sum_{k=1}^n \frac{1}{k^2} U_k^2}{\sum_{k=1}^{\min(n,m)} \frac{1}{k} U_k I_k \sin \varphi_k} \quad (8)$$

где су: $\dot{u} = \frac{du}{dt}$ и $\tilde{u} = \frac{1}{T} \int u dt$.

Czarnecki је користио еквивалентну кондуктансу G_e потрошача да би дефинисао активну струју потрошача, а такође је дефинисао и еквивалентну адмитансу Y_k потрошача при учестаности k -тог хармоника [27]:

$$G_e = \frac{P}{U^2} \quad (9)$$

$$Y_k = G_k + jB_k = \frac{I_k}{U_k} = \frac{S_k^*}{U_k^2} \quad (10)$$

На основу еквивалентних параметара потрошача, Czarnecki је извршио разлагање укупне струје потрошача на активну (i_a), расипну (i_s) и реактивну струју (i_r) [27]:

$$i_a = \frac{P}{U^2} u = G_e u \quad (11)$$

$$i_s = \sum_{k=1}^n (G_k - G_e) u_k \quad (12)$$

$$i_r = \sum_{k=1}^n B_k \frac{du_k}{d(\omega_k t)} \quad (13)$$

где је u_k тренутна вредност k -тог хармоника напона чија је угаона учестаност ω_k .

Czarnecki је за уведене струје дао физичке интерпретације и због тога је своју теорију назвао теоријом физичких компоненти струја (Current Physical Component – CPC theory) [25]. Активна струја је струја минималне ефективне вредности за исту активну снагу P и пропорционална је напону и у фази са њим. Расипна струја је последица тога што се еквивалентна кондуктанса потрошача G_k мења са редом хармоника и одступа од кондуктансе G_e . Реактивна струја је последица фазног помераја између напона и струје и представља меру осцилаторне размене енергије између потрошача и извора.

На основу ефективних вредности расипне и реактивне струје, Czarnecki је дефинисао расипну и реактивну снагу [25]:

$$D_s = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_s^2(t) dt} = U \cdot I_s \quad (14)$$

$$Q = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \cdot \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_r^2(t) dt} = U \cdot I_r \quad (15)$$

Снаге које су дефинисане у Czarnecki-евој теорији физичких компоненти струја задовољавају једначину ортогоналности [25]:

$$S^2 = P^2 + D_s^2 + Q^2 \quad (16)$$

У табелама 11–19 су за исте нивое димовања приказани практично исти параметри, с том разликом да су због концепта мерења поред вредности THD-а мрежног напона пре прикључења светиљки и вредности THD-а напона на почетку кола дате и вредности THD-а напона на свакој од светиљки. У табелама 10 и 19 су за вредности фактора снаге мање од 0,90 дате и вредности оптималне индуктивности (L_{opt}) по дефиницији Kusters-a и Moore-a, чија је улога поправка фактора снаге. Међутим, због њихових великих вредности, за исте случајеве израчунате су и вредности оптималне индуктивности редне пригушнице (L_{optred}), која се добија на сличан начин као у теорији Kusters-a и Moore-a, при чему је у разматраном случају потребно користити критеријум за минимизацију ефективне вредности напона (дуалан проблем), на основу кога се добија оптимална индуктивност редне пригушнице:

$$L_{optred} = - \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u \frac{di}{dt} dt}{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{di}{dt} \right)^2 dt} = \frac{1}{\omega_1} \cdot \frac{\sum_{k=1}^{\min(n,m)} k U_k I_k \sin \varphi_k}{\sum_{k=1}^n k^2 I_k^2}. \quad (17)$$

Табела 2. Релевантни параметри натријумове светилке са извором снаге 70 W директно прикључене на мрежни напон

Фотопски услови											
Ниво димовања	THDi без оптерећења (%)	THDi са оптерећењем (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q_{kusiL} (var)	Q_{kusiC} (var)	Q_{cz} (var)	D_s (var)
100%	3,20	2,95	13,99	77,82	79,42	15,87	0,98	-10,21	12,36	14,57	6,22
75%	3,20	3,37	16,01	63,94	65,77	15,43	0,97	-10,32	12,23	14,83	4,19
67%	3,20	3,05	17,87	59,44	61,49	15,74	0,97	-10,34	11,31	13,56	7,95
60%	3,20	2,93	17,71	55,48	57,56	15,30	0,96	-10,57	12,30	14,55	4,56
50%	3,20	2,98	19,44	48,71	51,08	15,39	0,95	-11,01	12,45	14,25	5,69
40%	3,20	2,76	20,19	43,24	45,86	15,28	0,94	-11,38	12,44	14,21	5,52

Табела 3. Релевантни параметри натријумове светилке са извором снаге 100 W директно прикључене на мрежни напон

Фотопски услови											
Ниво димовања	THDi без оптерећења (%)	THDi са оптерећењем (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q_{kusiL} (var)	Q_{kusiC} (var)	Q_{cz} (var)	D_s (var)
100%	2,48	2,70	12,21	106,16	107,61	17,59	0,99	-10,16	12,86	16,91	4,79
75%	2,48	2,86	13,88	89,32	91,08	17,85	0,98	-11,22	13,49	17,37	3,95
67%	2,48	2,47	14,18	83,32	85,17	17,64	0,98	-11,33	13,96	16,56	6,00
60%	2,48	2,37	14,57	77,17	79,14	17,52	0,98	-11,68	13,65	16,19	6,65
50%	2,48	2,25	16,58	68,60	70,75	17,32	0,97	-11,46	13,65	16,49	5,26
40%	2,48	2,73	17,20	60,61	62,89	16,77	0,96	-11,73	13,89	16,02	4,89

Табела 4. Релевантни параметри натријумове светилке са извором снаге 150 W директно прикључене на мрежни напон

Фотопски услови											
Ниво димовања	THDi без оптерећења (%)	THDi са оптерећењем (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q_{kusiL} (var)	Q_{kusiC} (var)	Q_{cz} (var)	D_s (var)
100%	2,59	2,84	11,54	161,73	163,08	20,91	0,99	-7,42	11,92	19,84	6,04
75%	2,59	2,21	11,89	133,52	135,00	19,96	0,99	-9,34	12,83	18,56	6,29
67%	2,59	2,31	13,10	122,67	124,27	19,87	0,99	-9,21	12,56	18,51	6,51
60%	2,59	2,24	12,87	114,50	116,09	19,20	0,99	-9,99	13,23	18,71	4,18
50%	2,59	2,28	15,55	100,79	102,70	19,71	0,98	-10,01	12,56	18,20	6,11
40%	2,59	2,19	15,51	88,89	90,91	19,06	0,98	-11,00	13,49	16,61	8,23

Табела 5. Релевантни параметри натријумове светилке са извором снаге 250 W директно прикључене на мрежни напон

Фотопски услови											
Ниво димовања	THDi без оптерећења (%)	THDi са оптерећењем (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q_{kusiL} (var)	Q_{kusiC} (var)	Q_{cz} (var)	D_s (var)
100%	2,51	2,59	8,72	275,86	277,44	29,62	0,99	-13,09	20,72	28,43	8,19
75%	2,51	2,99	9,95	227,60	229,54	29,73	0,99	-15,91	22,22	28,46	8,15
67%	2,51	2,83	9,63	211,13	213,07	28,68	0,99	-16,84	23,23	27,70	7,08
60%	2,51	2,94	11,54	197,10	199,27	29,32	0,99	-15,11	21,16	25,75	13,16
50%	2,51	2,78	11,49	174,33	176,55	27,91	0,99	-16,19	21,24	26,85	7,30
40%	2,51	3,32	11,43	151,98	154,50	27,78	0,98	-19,08	23,61	27,11	5,86

Табела 6. Релевантни параметри метал-халогене светиљке са извором снаге 70 W директно прикључене на мрежни напон

Фотопски услови											
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu са оптерећењем (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q_{kustL} (var)	Q_{kustC} (var)	Q_{cz} (var)	D_s (var)
100%	2,81	3,00	14,79	77,66	79,42	16,64	0,98	-10,64	13,18	15,23	6,62
75%	2,81	3,05	16,56	64,69	66,70	16,25	0,97	-11,18	13,01	14,56	7,15
67%	2,81	3,29	17,21	60,60	62,68	15,99	0,97	-11,04	12,82	15,52	3,80
60%	2,81	2,80	17,64	56,48	58,75	14,14	0,96	-11,54	13,16	15,42	4,72
50%	2,81	2,93	20,21	49,49	51,96	15,82	0,95	-11,04	12,96	15,33	3,77
40%	2,81	2,75	21,71	43,16	45,89	15,61	0,94	-11,36	12,84	15,08	3,98
Мезопски услови											
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu са оптерећењем (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q_{kustL} (var)	Q_{kustC} (var)	Q_{cz} (var)	D_s (var)
97%	2,81	2,65	14,81	75,68	77,45	16,44	0,98	-10,53	12,63	15,22	6,18
95%	2,81	3,01	14,44	74,94	76,75	16,55	0,98	-11,06	13,27	15,47	5,83
93%	2,81	2,72	15,86	73,00	74,91	16,79	0,97	-10,71	12,65	15,10	7,33
92%	2,81	2,82	15,62	73,26	75,09	16,48	0,98	-10,54	12,29	15,74	4,77
90%	2,81	3,04	15,35	71,61	73,40	16,10	0,98	-10,40	12,21	14,75	6,41
86%	2,81	2,89	15,20	71,31	73,24	16,70	0,97	-11,39	13,40	16,23	3,84
71%	2,81	3,02	16,88	62,20	64,25	16,10	0,97	-10,98	12,90	15,73	3,41
69%	2,81	3,02	17,95	60,92	63,05	16,27	0,97	-10,80	12,91	15,58	4,64
62%	2,81	3,13	18,52	56,48	58,71	16,02	0,96	-11,02	12,90	15,57	3,58
52%	2,81	2,70	18,98	50,97	53,46	16,13	0,95	-11,81	13,25	15,65	3,88
46%	2,81	2,85	20,34	47,46	50,01	15,77	0,95	-11,40	12,78	15,17	4,25
45%	2,81	2,64	20,45	45,88	48,46	15,60	0,95	-11,23	12,64	14,71	5,09
35%	2,81	2,89	22,61	39,38	42,33	15,52	0,93	-11,59	13,05	14,96	3,95

Табела 7. Релевантни параметри метал-халогене светиљке са извором снаге 100 W директно прикључене на мрежни напон

Фотопски услови											
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu са оптерећењем (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q_{kustL} (var)	Q_{kustC} (var)	Q_{cz} (var)	D_s (var)
100%	2,45	2,39	12,14	107,04	108,45	17,43	0,99	-9,50	12,39	16,60	4,70
75%	2,45	2,62	15,40	88,99	90,78	17,94	0,98	-9,85	12,48	16,58	4,92
67%	2,45	2,69	14,27	82,98	84,74	17,14	0,98	-10,79	13,20	16,66	3,35
60%	2,45	2,85	14,93	77,87	79,70	17,02	0,98	-11,02	13,22	16,63	3,51
50%	2,45	2,78	15,93	69,18	71,16	16,66	0,97	-11,12	13,01	16,27	3,30
40%	2,45	2,66	18,63	59,95	62,37	17,20	0,96	-11,57	13,50	16,27	4,48
Мезопски услови											
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu са оптерећењем (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q_{kustL} (var)	Q_{kustC} (var)	Q_{cz} (var)	D_s (var)
97%	2,45	2,99	12,95	103,96	105,45	17,67	0,99	-9,76	12,71	17,04	4,66
95%	2,45	3,18	13,27	101,96	103,45	17,51	0,99	-9,58	12,83	16,77	4,94
93%	2,45	2,85	13,05	100,72	102,21	17,41	0,99	-9,90	12,80	16,80	4,33
92%	2,45	2,61	12,86	99,97	101,49	17,53	0,98	-10,09	13,82	16,18	6,57
90%	2,45	2,54	13,07	98,39	99,91	17,39	0,98	-9,83	12,39	15,45	7,96
86%	2,45	2,47	12,96	96,77	98,38	17,72	0,98	-10,76	13,23	17,11	4,38
71%	2,45	2,71	13,88	85,60	87,26	16,94	0,98	-10,47	12,71	16,61	3,20
69%	2,45	2,48	14,12	84,22	85,94	17,08	0,98	-10,47	12,86	16,55	3,85
62%	2,45	2,79	14,73	79,01	80,87	17,25	0,98	-11,22	13,54	16,86	3,42
52%	2,45	2,48	16,10	71,04	73,07	17,09	0,97	-11,17	13,16	16,04	5,84
46%	2,45	2,77	16,94	66,01	68,10	16,74	0,97	-11,13	13,24	16,15	4,34
45%	2,45	2,73	17,15	64,59	66,81	17,08	0,97	-11,64	13,59	16,75	3,18
35%	2,45	2,86	17,94	56,13	58,52	16,55	0,96	-12,03	13,59	16,13	3,48

Табела 8. Релевантни параметри метал-халогене светиљке са извором снаге 150 W директно прикључене на мрежни напон

Фотопски услови											
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu са оптерећењем (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q _{busL} (var)	Q _{busC} (var)	Q _{cz} (var)	D _s (var)
100%	2,38	2,51	11,51	162,45	163,94	22,08	0,99	-8,87	12,21	20,84	6,67
75%	2,38	2,64	12,99	133,41	135,01	20,72	0,99	-9,55	12,98	19,98	5,36
67%	2,38	3,05	14,18	123,82	125,58	20,94	0,99	-9,50	13,32	20,29	4,88
60%	2,38	2,75	13,58	114,56	116,29	19,98	0,99	-10,62	13,78	19,44	4,12
50%	2,38	2,28	14,16	102,19	104,12	19,97	0,98	-11,64	14,39	19,44	4,19
40%	2,38	2,83	16,48	88,13	90,23	19,36	0,98	-11,01	13,52	18,34	5,85
Мезопски услови											
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu са оптерећењем (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q _{busL} (var)	Q _{busC} (var)	Q _{cz} (var)	D _s (var)
97%	2,38	2,68	11,96	158,51	159,96	21,48	0,99	-7,49	12,11	19,96	7,05
95%	2,38	2,55	11,22	155,88	157,30	21,11	0,99	-9,09	13,75	20,42	4,74
93%	2,38	2,92	12,46	152,84	154,26	20,87	0,99	-7,19	11,68	19,81	5,53
92%	2,38	1,99	11,95	152,19	153,64	21,05	0,99	-7,77	11,68	19,50	6,24
90%	2,38	2,74	11,13	149,28	150,64	20,22	0,99	-9,07	13,07	19,63	4,47
86%	2,38	2,94	12,93	146,32	147,82	21,01	0,99	-7,07	11,60	19,89	6,02
71%	2,38	3,11	13,85	128,45	130,14	20,92	0,99	-9,11	12,94	19,78	5,32
69%	2,38	2,50	12,56	125,85	127,49	20,38	0,99	-10,66	13,93	19,82	4,20
62%	2,38	2,73	14,27	116,43	118,17	20,20	0,99	-9,40	12,95	19,35	5,08
52%	2,38	2,31	14,61	104,46	106,23	19,34	0,98	-10,06	12,72	18,54	4,45
46%	2,38	3,19	15,92	95,42	97,35	19,31	0,98	-10,30	13,14	18,49	3,99
45%	2,38	2,55	15,57	94,47	96,47	19,51	0,98	-11,13	13,80	18,69	4,42
35%	2,38	1,97	16,61	81,66	83,80	18,80	0,97	-11,10	13,19	17,06	7,66

Табела 9. Релевантни параметри LED светиљке снаге 165 W директно прикључене на мрежни напон

Фотопски услови											
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu са оптерећењем (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q _{busL} (var)	Q _{busC} (var)	Q _{cz} (var)	D _s (var)
100%	3,20	2,95	7,04	170,83	171,50	15,22	0,99	-7,50	11,70	13,32	7,31
75%	3,20	2,88	8,44	126,59	127,39	14,22	0,99	-8,08	11,33	12,45	6,78
67%	3,20	3,18	9,32	110,49	111,33	13,60	0,99	-7,87	10,17	11,55	7,16
60%	3,20	3,41	10,55	94,96	95,89	13,31	0,99	-7,74	10,64	12,03	5,64
50%	3,20	3,26	14,09	75,24	76,51	13,89	0,98	-8,34	10,57	12,38	6,25
40%	3,20	3,28	16,05	56,44	57,90	12,91	0,97	-8,34	10,29	11,64	5,55
Мезопски услови											
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu са оптерећењем (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q _{busL} (var)	Q _{busC} (var)	Q _{cz} (var)	D _s (var)
94%	3,20	3,38	7,32	167,37	168,06	15,14	0,99	-7,21	11,72	13,38	7,03
93%	3,20	3,61	7,53	167,20	167,83	14,58	0,99	-6,90	11,70	13,21	6,10
90%	3,20	3,08	7,47	156,66	157,30	14,19	0,99	-6,62	10,75	12,23	7,13
88%	3,20	3,82	8,09	156,67	157,36	14,69	0,99	-6,68	11,22	13,18	6,43
84%	3,20	3,32	7,61	143,14	143,81	13,87	0,99	-7,59	12,76	12,79	5,27
80%	3,20	2,92	7,78	136,62	137,36	14,24	0,99	-7,82	11,69	12,13	7,40
69%	3,20	2,83	9,32	113,34	114,21	14,08	0,99	-7,87	10,11	11,27	8,40
66%	3,20	2,76	9,21	110,46	111,36	14,11	0,99	-8,52	11,20	11,93	7,51
56%	3,20	2,93	11,07	88,11	89,14	13,52	0,99	-8,29	10,61	11,80	6,58
48%	3,20	3,34	13,51	72,38	73,60	13,36	0,98	-8,32	10,46	11,45	6,80
45%	3,20	2,95	13,89	66,21	67,53	13,24	0,98	-8,61	10,54	11,44	6,62
44%	3,20	3,00	14,93	62,61	63,97	13,11	0,98	-8,47	10,11	10,97	7,14
42%	3,20	3,05	16,14	59,90	61,33	13,15	0,98	-8,21	9,96	11,38	6,55
32%	3,20	2,62	19,20	41,20	43,09	12,61	0,96	-8,89	10,20	11,52	5,09

Табела 10. Релевантни параметри LED светилке снаге 53 W директно прикључене на мрежни напон

Фотопски услови													
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu са оптерећењем (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q_{kustL} (var)	Q_{kustC} (var)	Q_{cz} (var)	D_s (var)	L_{opt} (H)	L_{optred} (H)
100%	3,20	2,95	12,36	56,80	58,50	14,02	0,97	-10,93	12,59	13,22	4,61	-	-
75%	3,20	2,88	18,64	42,13	44,49	14,30	0,95	-10,97	12,25	13,57	4,34	-	-
67%	3,20	3,18	19,35	36,28	38,76	13,63	0,94	-10,78	11,74	12,90	4,35	-	-
60%	3,20	3,41	21,83	32,96	35,59	13,43	0,93	-10,38	11,67	13,08	2,93	-	-
50%	3,20	3,26	26,52	27,21	30,30	13,33	0,90	-10,31	11,47	12,98	2,84	16,35	0,64
40%	3,20	3,28	27,99	21,87	25,08	12,26	0,87	-9,74	10,67	11,84	3,08	17,47	0,83
Мезопски услови													
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu са оптерећењем (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q_{kustL} (var)	Q_{kustC} (var)	Q_{cz} (var)	D_s (var)	L_{opt} (H)	L_{optred} (H)
94%	3,20	3,38	13,56	53,00	54,78	13,86	0,97	-10,64	12,36	13,21	4,14	-	-
93%	3,20	3,61	13,95	52,85	54,72	14,19	0,97	-11,07	12,89	13,94	2,53	-	-
90%	3,20	3,08	14,21	50,98	52,93	14,26	0,96	-11,16	12,76	13,65	4,02	-	-
88%	3,20	3,82	15,19	49,91	51,74	13,65	0,96	-10,21	12,07	13,23	3,16	-	-
84%	3,20	3,32	15,42	47,14	49,04	13,54	0,96	-10,40	12,51	12,83	4,24	-	-
80%	3,20	2,92	14,57	45,13	47,13	13,60	0,96	-10,84	12,39	12,86	4,31	-	-
69%	3,20	2,83	19,33	38,19	40,56	13,68	0,94	-10,50	11,48	12,69	5,06	-	-
66%	3,20	2,76	19,22	36,38	38,81	13,52	0,94	-10,63	11,68	12,67	4,57	-	-
56%	3,20	2,93	21,74	29,89	32,49	12,72	0,92	-10,06	11,06	12,30	3,12	-	-
48%	3,20	3,34	23,68	26,35	29,37	12,97	0,90	-10,52	11,54	12,21	4,28	16,06	0,68
45%	3,20	2,95	24,99	24,77	27,91	12,86	0,89	-10,41	11,36	12,38	3,31	16,35	0,63
44%	3,20	3,00	25,43	23,84	27,00	12,68	0,88	-10,29	11,10	12,07	3,67	16,43	0,73
42%	3,20	3,05	26,71	22,75	25,89	12,34	0,88	-9,90	10,68	11,78	3,50	17,13	0,67
32%	3,20	2,62	30,26	17,53	21,19	11,91	0,83	-9,78	10,43	11,58	2,56	17,34	0,82

Табела 11. Релевантни параметри натријумове светилке са извором снаге 70 W прикључене на мрежни напон преко редне везе отпорности и индуктивности

Фотопски услови												
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu на почетку кола (%)	THD напона светилке (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q_{kustL} (var)	Q_{kustC} (var)	Q_{cz} (var)	D_s (var)
100%	3,33	3,45	3,10	14,96	77,59	79,60	17,75	0,97	-12,07	14,02	17,23	4,18
75%	3,33	3,69	3,25	17,29	63,40	65,70	17,24	0,96	-12,22	14,49	15,03	8,40
67%	3,33	3,46	3,29	17,14	59,92	62,36	17,25	0,96	-12,75	14,80	14,85	8,73
60%	3,33	3,51	3,11	18,91	55,26	57,87	17,17	0,95	-12,56	14,36	16,36	5,18
50%	3,33	3,39	3,53	19,36	48,98	51,69	16,54	0,95	-12,40	14,25	16,29	2,78
40%	3,33	2,71	2,76	20,29	43,16	46,23	16,55	0,93	-12,93	14,26	15,93	4,39

Табела 12. Релевантни параметри натријумове светилке са извором снаге 100 W прикључене на мрежни напон преко редне везе отпорности и индуктивности

Фотопски услови												
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu на почетку кола (%)	THD напона светилке (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q_{kustL} (var)	Q_{kustC} (var)	Q_{cz} (var)	D_s (var)
100%	3,43	2,48	2,88	13,63	106,06	108,03	20,56	0,98	-12,56	15,43	19,55	5,83
75%	3,43	3,66	3,27	15,56	88,61	90,83	19,95	0,98	-12,97	15,33	18,77	4,69
67%	3,43	2,97	2,75	15,06	82,06	84,28	19,25	0,97	-13,36	15,26	18,10	6,41
60%	3,43	2,60	3,10	16,13	76,10	78,34	18,61	0,97	-12,49	14,73	17,57	5,96
50%	3,43	3,49	3,24	16,48	67,86	70,32	18,44	0,96	-13,16	15,24	17,67	5,18
40%	3,43	3,29	3,38	18,31	59,83	62,45	17,91	0,96	-12,65	14,71	16,82	6,13

Табела 13. Релевантни параметри натријумове светиљке са извором снаге 150 W прикључене на мрежни напон преко редне везе отпорности и индуктивности

Фотопски услови												
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu на почетку кола (%)	THD напона светиљке (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q_{kustL} (var)	Q_{kustC} (var)	Q_{cz} (var)	D_s (var)
100%	3,24	3,31	3,52	12,75	161,08	162,63	22,41	0,99	-8,24	12,55	19,87	8,07
75%	3,24	3,14	3,28	12,95	131,07	133,01	22,67	0,99	-13,11	16,79	22,04	5,03
67%	3,24	2,81	2,81	13,07	122,60	124,61	22,32	0,98	-13,46	16,99	21,40	6,14
60%	3,24	2,79	2,40	13,63	113,50	115,64	22,14	0,98	-13,61	16,27	21,51	5,16
50%	3,24	2,91	2,83	14,98	100,12	102,30	21,00	0,98	-11,91	15,53	20,39	4,81
40%	3,24	3,17	3,16	15,65	87,82	90,09	20,08	0,97	-13,07	15,52	19,75	3,63

Табела 14. Релевантни параметри натријумове светиљке са извором снаге 250 W прикључене на мрежни напон преко редне везе отпорности и индуктивности

Фотопски услови												
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu на почетку кола (%)	THD напона светиљке (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q_{kustL} (var)	Q_{kustC} (var)	Q_{cz} (var)	D_s (var)
100%	3,27	3,03	3,76	9,74	273,18	275,50	35,74	0,99	-21,16	27,43	34,92	6,73
75%	3,27	2,77	2,92	10,20	224,16	226,69	33,74	0,99	-20,80	26,55	32,85	7,52
67%	3,27	2,88	2,70	9,81	208,38	211,13	34,02	0,99	-23,28	28,18	31,40	12,88
60%	3,27	3,20	3,15	10,77	194,45	197,29	33,36	0,99	-22,56	28,74	32,29	8,24
50%	3,27	3,37	3,35	12,14	172,96	175,91	32,06	0,98	-20,98	26,43	29,19	12,77
40%	3,27	3,40	2,88	13,98	150,11	153,26	30,94	0,98	-20,13	24,76	27,57	13,94

Табела 15. Релевантни параметри метал-халогене светиљке са извором снаге 70 W прикључене на мрежни напон преко редне везе отпорности и индуктивности

Фотопски услови												
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu на почетку кола (%)	THD напона светиљке (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q_{kustL} (var)	Q_{kustC} (var)	Q_{cz} (var)	D_s (var)
100%	3,35	3,39	3,39	15,93	76,63	78,74	18,11	0,97	-12,09	14,39	17,60	3,91
75%	3,35	3,07	3,59	17,31	63,56	65,93	17,50	0,96	-12,49	14,44	16,93	4,36
67%	3,35	3,76	3,62	18,69	59,31	61,84	17,51	0,96	-12,44	14,57	16,93	4,39
60%	3,35	2,91	3,82	19,40	55,03	57,57	16,93	0,96	-11,99	13,90	16,42	4,01
50%	3,35	3,40	3,33	19,62	49,33	52,14	16,89	0,95	-12,78	14,23	16,57	3,12
40%	3,35	3,54	3,60	21,14	42,94	46,07	16,72	0,93	-12,84	14,30	16,37	2,84
Мезопски услови												
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu на почетку кола (%)	THD напона светиљке (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q_{kustL} (var)	Q_{kustC} (var)	Q_{cz} (var)	D_s (var)
97%	3,35	3,67	3,52	15,11	75,31	77,44	18,02	0,97	-12,72	15,04	17,56	3,96
95%	3,35	3,83	3,44	16,17	74,13	76,19	17,58	0,97	-11,55	14,04	17,08	4,01
93%	3,35	3,44	3,32	16,11	72,36	74,44	17,50	0,97	-11,96	14,00	16,29	6,29
92%	3,35	3,41	3,39	15,64	72,71	74,83	17,70	0,97	-12,43	14,35	16,26	6,68
90%	3,35	3,02	2,82	15,36	71,39	73,57	17,77	0,97	-12,98	14,45	14,74	9,32
86%	3,35	3,17	3,03	15,64	70,70	72,78	17,26	0,97	-11,81	14,24	16,38	5,37
71%	3,35	2,91	3,27	17,18	61,46	63,83	17,24	0,96	-12,39	14,43	16,85	3,56
69%	3,35	3,09	2,99	17,83	60,48	62,84	17,06	0,96	-11,99	14,34	16,43	4,45
62%	3,35	3,91	3,45	18,40	56,32	58,78	16,85	0,96	-12,11	14,16	15,86	5,56
52%	3,35	2,89	3,39	19,72	50,45	53,15	16,74	0,95	-12,44	14,00	14,44	8,44
46%	3,35	3,49	3,60	20,44	46,99	49,90	16,79	0,94	-12,64	14,05	16,11	4,69
45%	3,35	4,05	3,82	22,10	45,93	48,88	16,72	0,94	-12,28	14,02	16,31	3,62
35%	3,35	2,93	3,17	22,85	39,26	42,55	16,40	0,92	-12,59	13,85	15,70	3,61

Табела 16. Релевантни параметри метал-халогене светиљке са извором снаге 100 W прикључене на мрежни напон преко редне везе отпорности и индуктивности

Фотопски услови												
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu на почетку кола (%)	THD напона светиљке (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q_{kustL} (var)	Q_{kustC} (var)	Q_{cz} (var)	D_s (var)
100%	3,02	2,47	2,17	12,99	105,62	107,75	21,32	0,98	-14,03	16,80	20,29	5,60
75%	3,02	2,51	2,83	14,65	88,73	91,05	20,40	0,97	-13,85	15,55	18,77	6,81
67%	3,02	2,39	2,66	14,87	82,25	84,60	19,84	0,97	-13,70	15,78	17,75	8,70
60%	3,02	2,61	2,45	14,69	76,58	79,01	19,43	0,97	-13,88	15,58	17,63	8,04
50%	3,02	2,87	3,34	17,63	67,87	70,51	19,12	0,96	-13,42	15,53	17,89	6,69
40%	3,02	3,02	3,26	18,35	59,36	62,18	18,53	0,95	-13,60	15,23	17,15	6,92
Мезопски услови												
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu на почетку кола (%)	THD напона светиљке (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q_{kustL} (var)	Q_{kustC} (var)	Q_{cz} (var)	D_s (var)
97%	3,02	2,91	2,18	13,38	102,79	104,85	20,65	0,98	-12,52	15,40	18,59	8,63
95%	3,02	3,22	2,78	14,14	100,07	102,24	20,95	0,98	-13,41	15,89	19,23	7,99
93%	3,02	3,28	2,30	14,08	99,87	102,01	20,80	0,98	-13,27	15,92	18,41	9,38
92%	3,02	3,03	3,17	14,09	99,28	101,38	20,50	0,98	-13,20	15,75	19,51	5,88
90%	3,02	3,51	3,70	14,67	98,51	100,70	20,86	0,98	-12,88	15,51	20,00	5,53
86%	3,02	2,95	2,71	14,56	95,19	97,29	20,08	0,98	-12,80	15,62	18,96	6,33
71%	3,02	2,97	2,62	15,29	84,90	87,18	19,81	0,97	-13,08	15,01	17,35	9,09
69%	3,02	2,94	2,43	14,86	83,01	85,28	19,54	0,97	-12,83	15,64	18,17	7,00
62%	3,02	2,38	2,61	15,34	77,80	80,21	19,49	0,97	-13,57	15,89	18,90	4,46
52%	3,02	2,89	3,51	16,17	69,88	72,38	18,84	0,97	-13,62	15,61	18,34	4,24
46%	3,02	3,82	3,84	18,43	64,63	67,30	18,78	0,96	-13,19	15,38	18,18	4,66
45%	3,02	2,85	2,45	16,62	63,41	65,94	18,07	0,96	-13,13	14,61	16,82	6,56
35%	3,02	2,25	2,29	17,59	55,66	58,57	18,23	0,95	-13,90	15,20	16,95	6,67

Табела 17. Релевантни параметри метал-халогене светиљке са извором снаге 150 W прикључене на мрежни напон преко редне везе отпорности и индуктивности

Фотопски услови												
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu на почетку кола (%)	THD напона светиљке (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q_{kustL} (var)	Q_{kustC} (var)	Q_{cz} (var)	D_s (var)
100%	2,88	3,45	2,61	12,28	160,40	162,40	25,37	0,99	-12,77	16,00	19,47	15,71
75%	2,88	3,68	2,79	13,05	132,38	134,44	23,43	0,98	-12,59	16,86	21,53	9,01
67%	2,88	2,81	3,58	13,50	121,16	123,24	22,54	0,98	-13,61	16,73	19,74	10,82
60%	2,88	3,73	3,04	12,77	113,15	115,24	21,85	0,98	-14,16	16,75	20,05	8,60
50%	2,88	3,06	2,70	14,18	100,14	102,37	21,24	0,98	-13,61	15,97	17,98	11,23
40%	2,88	3,56	3,20	16,19	88,27	90,81	21,33	0,97	-14,12	16,36	19,02	9,10
Мезопски услови												
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu на почетку кола (%)	THD напона светиљке (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q_{kustL} (var)	Q_{kustC} (var)	Q_{cz} (var)	D_s (var)
97%	2,88	2,84	3,48	12,43	156,72	158,66	24,69	0,99	-13,40	17,16	21,01	12,50
95%	2,88	3,47	3,32	12,95	155,18	157,02	23,99	0,99	-11,07	15,42	22,46	6,44
93%	2,88	3,04	3,97	13,15	150,63	152,44	23,38	0,99	-10,18	14,87	21,41	8,76
92%	2,88	2,91	3,31	12,86	150,30	152,21	24,06	0,99	-12,06	15,66	21,19	10,52
90%	2,88	3,13	3,85	12,71	146,94	148,90	24,07	0,99	-13,07	16,72	20,02	13,08
86%	2,88	2,94	2,96	13,37	144,95	146,95	24,17	0,99	-12,21	15,39	19,71	13,85
71%	2,88	3,11	3,12	12,89	126,45	128,43	22,49	0,98	-13,13	16,15	20,81	7,66
69%	2,88	2,87	2,83	14,55	124,24	126,27	22,57	0,98	-11,83	14,67	20,60	8,48
62%	2,88	2,63	3,20	13,57	114,71	116,72	21,56	0,98	-13,15	16,31	20,92	5,12
52%	2,88	3,71	3,26	14,62	103,25	105,47	21,49	0,98	-13,75	16,62	17,87	11,71
46%	2,88	3,72	2,91	15,78	93,83	96,05	20,54	0,98	-12,46	14,89	19,75	4,85
45%	2,88	2,85	3,33	14,93	93,90	96,03	20,15	0,98	-12,87	15,50	19,58	4,09
35%	2,88	3,90	2,91	17,01	80,13	82,66	20,30	0,97	-13,14	15,48	18,68	7,62

Табела 18. Релевантни параметри LED светиљке снаге 165 W прикључене на мрежни напон преко редне везе отпорности и индуктивности

Фотопски услови												
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu на почетку кола (%)	THD напона светиљке (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q _{kusL} (var)	Q _{kusC} (var)	Q _{cz} (var)	D _s (var)
100%	3,33	3,45	3,46	7,26	166,47	167,15	14,99	0,99	-7,45	11,73	13,35	6,74
75%	3,33	3,36	3,85	9,44	126,26	127,13	14,85	0,99	-8,08	12,62	13,73	5,55
67%	3,33	3,71	2,78	9,00	110,22	111,16	14,42	0,99	-8,95	11,82	13,02	6,16
60%	3,33	3,34	4,04	11,12	94,41	95,43	13,91	0,99	-8,58	11,45	12,90	5,14
50%	3,33	3,51	4,22	13,82	75,24	76,52	13,93	0,98	-8,77	11,61	13,10	4,63
40%	3,33	3,22	3,15	17,04	56,15	57,77	13,57	0,97	-9,00	10,70	12,42	5,37
Мезопски услови												
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu на почетку кола (%)	THD напона светиљке (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q _{kusL} (var)	Q _{kusC} (var)	Q _{cz} (var)	D _s (var)
94%	3,33	3,23	3,54	7,77	166,41	167,12	15,38	0,99	-7,53	12,42	14,05	6,20
93%	3,33	3,21	3,07	7,39	166,20	166,93	15,67	0,99	-7,67	12,20	13,38	8,12
90%	3,33	3,22	3,17	7,88	156,05	156,81	15,48	0,99	-7,73	11,72	13,99	6,57
88%	3,33	3,41	3,34	7,84	155,99	156,75	15,48	0,99	-7,88	12,34	13,62	7,33
84%	3,33	3,76	3,01	8,15	142,52	143,33	15,23	0,99	-7,88	11,85	13,51	6,99
80%	3,33	3,43	3,68	8,83	136,61	137,39	14,67	0,99	-8,31	11,87	13,30	6,13
69%	3,33	3,70	3,16	9,55	112,72	113,66	14,66	0,99	-8,97	11,86	13,35	6,03
66%	3,33	3,73	3,62	10,67	109,73	110,70	14,63	0,99	-8,16	11,09	13,48	5,64
56%	3,33	3,23	3,36	12,32	87,59	88,77	14,42	0,99	-8,81	11,35	13,11	5,90
48%	3,33	3,38	3,08	12,83	72,12	73,39	13,60	0,98	-9,01	11,14	12,67	4,89
45%	3,33	3,66	3,89	15,47	65,83	67,29	13,95	0,98	-8,87	11,60	13,34	4,05
44%	3,33	3,77	3,46	14,86	62,37	63,86	13,69	0,98	-9,22	11,27	12,94	4,36
42%	3,33	3,71	3,14	14,28	59,59	61,06	13,35	0,98	-9,32	11,33	12,47	4,70
32%	3,33	3,81	3,62	20,76	41,04	43,05	12,99	0,95	-8,90	10,44	11,28	6,38

Табела 19. Релевантни параметри LED светиљке снаге 53 W прикључене на мрежни напон преко редне везе отпорности и индуктивности

Фотопски услови														
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu на почетку кола (%)	THD напона светиљке (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q _{kusL} (var)	Q _{kusC} (var)	Q _{cz} (var)	D _s (var)	L _{opt} (H)	L _{optred} (H)
100%	3,33	3,45	3,25	13,23	54,97	56,71	13,92	0,97	-10,53	12,50	13,45	3,44	-	-
75%	3,33	3,36	3,29	18,86	42,10	44,48	14,35	0,95	-11,06	12,58	13,95	3,16	-	-
67%	3,33	3,71	3,17	21,01	36,19	38,81	14,02	0,93	-10,79	12,24	13,58	3,32	-	-
60%	3,33	3,34	3,55	22,74	32,74	35,46	13,63	0,92	-10,51	11,77	13,32	2,69	-	-
50%	3,33	3,51	3,88	24,42	27,30	30,44	13,45	0,90	-10,75	11,90	13,31	1,87	16,35	0,76
40%	3,33	3,22	3,40	30,16	21,76	25,35	13,00	0,86	-10,28	11,34	12,76	2,39	17,12	0,84
Мезопски услови														
Ниво димовања	THDu без оптерећења (%)	THDu на почетку кола (%)	THD напона светиљке (%)	THDi (%)	P (W)	S (VA)	N (VA)	PF	Q _{kusL} (var)	Q _{kusC} (var)	Q _{cz} (var)	D _s (var)	L _{opt} (H)	L _{optred} (H)
94%	3,33	3,23	3,54	14,87	52,91	54,83	14,39	0,96	-10,98	13,31	14,03	3,16	-	-
93%	3,33	3,21	3,41	14,32	52,75	54,70	14,49	0,96	-11,16	13,16	14,16	2,92	-	-
90%	3,33	3,22	2,95	13,91	50,76	52,72	14,25	0,96	-11,25	12,95	13,72	3,75	-	-
88%	3,33	3,41	3,95	15,59	49,80	51,91	14,67	0,96	-11,46	13,56	14,43	2,49	-	-
84%	3,33	3,76	3,11	17,32	46,91	49,10	14,51	0,96	-10,96	12,70	14,14	3,11	-	-
80%	3,33	3,43	3,00	16,54	44,87	47,12	14,38	0,95	-11,39	12,93	14,00	3,02	-	-
69%	3,33	3,70	3,34	18,97	38,30	40,85	14,22	0,94	-11,30	12,65	13,86	2,87	-	-
66%	3,33	3,73	3,01	19,39	36,08	38,61	13,74	0,93	-10,90	11,99	13,29	3,42	-	-
56%	3,33	3,23	3,63	23,61	29,75	32,70	13,57	0,91	-10,73	11,96	13,27	2,71	-	-
48%	3,33	3,38	3,01	24,30	26,31	29,49	13,32	0,89	-10,75	11,85	13,03	2,68	16,60	0,84
45%	3,33	3,66	3,25	25,51	24,60	27,84	13,04	0,88	-10,55	11,52	12,87	1,83	16,74	0,81
44%	3,33	3,77	3,81	28,57	23,58	26,96	13,07	0,87	-10,29	11,46	12,89	2,06	17,24	0,79
42%	3,33	3,71	3,60	28,87	22,89	26,44	13,22	0,87	-10,49	11,39	12,86	3,00	16,85	0,70
32%	3,33	3,81	3,43	31,78	17,49	21,60	12,66	0,81	-10,47	11,35	12,07	3,76	17,01	1,07

THD напона у мрежи (без оптерећења) у делу експеримента са светиљкама директно прикљученим на мрежни напон био је у опсегу 2,45–3,20%, док је у другом делу експеримента са редном везом отпорности и индуктивности био у опсегу 2,88–3,43%.

Опсежи THD-а напона на почетку кола при директном прикључењу светиљки на мрежни напон и делу експеримента са прикључењем светиљки на мрежни напон преко редне везе отпорности и индуктивности, као и опсежи THD-а напона сваке од светиљки, дати су у табели 20. Табела 20 садржи и опсеге THD-а струје сваке од светиљки у оба дела експеримента.

Табела 20. Опсежи THD-а напона и струје у оба дела експеримента

Тип светиљке	THD напона на почетку кола при директном прикључењу светиљки на мрежни напон (%)	THD напона на почетку кола при прикључењу светиљки на мрежни напон преко редне везе отпорности и индуктивности (%)	THD напона светиљке при мрежном напону преко редне везе отпорности и индуктивности (%)	THD струје при директном прикључењу светиљки на мрежни напон	THD струје при прикључењу светиљки на мрежни напон преко редне везе отпорности и индуктивности
Натријумова светиљка 70 W	2,76–3,37	2,71–3,69	2,76–3,53	13,99–20,19	14,96–20,29
Натријумова светиљка 100 W	2,25–2,86	2,48–3,66	2,75–3,38	12,21–17,20	13,63–18,31
Натријумова светиљка 150 W	2,19–2,84	2,79–3,31	2,40–3,52	11,54–15,55	12,75–15,65
Натријумова светиљка 250 W	2,59–3,32	2,77–3,40	2,70–3,76	8,72–11,54	9,74–13,98
Метал-халогена светиљка 70 W	2,47–3,35	2,89–4,05	2,82–3,82	14,79–22,61	15,93–22,85
Метал-халогена светиљка 100 W	2,39–3,18	2,25–3,51	2,17–3,84	12,14–18,63	12,99–18,43
Метал-халогена светиљка 150 W	1,97–3,19	2,63–3,90	2,61–3,85	11,51–16,61	12,28–17,01
LED светиљка 165 W	2,76–3,82	3,21–3,81	2,78–4,25	7,04–19,20	7,26–20,76
LED светиљка 53 W	2,76–3,82	3,21–3,81	2,95–3,95	12,36–30,26	13,23–31,78

Поређењем опсега THD-а напона на почетку кола при директном прикључењу светиљки на мрежни напон са опсегом THD-а напона у мрежи (оба се односе на први део експеримента) из табеле 20, могу се уочити врло мале разлике између њих.

Исто важи и за поређење опсега THD вредности напона светиљке са THD вредностима напона на почетку кола у другом делу експеримента. Поређењем њихових вредности са THD вредностима напона у мрежи у другом делу експеримента, могу се уочити исте сличности. С обзиром на то да су THD вредности напона посматране у различитим тренуцима (због ограничења мерног уређаја), као и чињенице да THD напона мења своју вредност из периоде у периоду осцилујући око неке вредности, на основу ових података није могуће извући конкретан закључак у вези са утицајем редне везе отпорности и индуктивности на THD напона светиљке.

Најнижи THD струје у пуном режиму рада у оба дела експеримента карактерисао је натријумову светиљку снаге 250 W и LED светиљку снаге 53 W, док је за најнижи ниво димовања THD струје LED светиљке снаге 53 W нижи од истог параметра других светиљки за најмање 34% (за 58%, односно 53% у поређењу са LED светиљком снаге 165 W у првом и другом делу експеримента, респективно). Треба нагласити да веће вредности THD-а струје светиљки одговарају режимима са смањеним светлосним флуksom, односно нижем нивоу димовања.

Поређењем опсега THD-а струје сваке од светилки у првом и другом делу експеримента, може се закључити да је прикључење светилки на мрежни напон преко редне везе отпорности и индуктивности утицало на повећање горњих и доњих граница опсега THD вредности струје (0,22–1,42%, за доњу, и -0,2–2,44% за горњу границу (негативна разлика односи се на случај метал-халогене светилке снаге 100 W)). Имајући у виду уочене промене THD вредности струје, може се закључити да оне постоје и код THD вредности напона, али да су врло мале и да се због напред наведених недостатака мерења не могу квантификовати.

У табели 21 дати су опсежи активних снага и фактора снаге при директном прикључењу светилки и прикључењу преко редне везе отпорности и индуктивности.

Табела 21. Опсежи фактора снаге светилки у првом и другом делу експеримента

Тип светилке	Светилка директно прикључена на мрежни напон		Светилка прикључена на мрежни напон преко редне везе отпорности и индуктивности	
	Активна снага (W)	Фактор снаге	Активна снага (W)	Фактор снаге
Натријумова светилка 70 W	43,24–77,82	0,94–0,98	43,16–77,59	0,93–0,97
Натријумова светилка 100 W	60,61–106,16	0,96–0,99	59,83–106,06	0,96–0,98
Натријумова светилка 150 W	88,89–161,73	0,98–0,99	87,82–161,08	0,97–0,99
Натријумова светилка 250 W	151,98–275,86	0,98–0,99	150,11–273,18	0,98–0,99
Метал-халогена светилка 70 W	39,38–77,66	0,93–0,98	39,26–76,63	0,92–0,97
Метал-халогена светилка 100 W	56,13–107,04	0,96–0,99	55,66–105,62	0,95–0,98
Метал-халогена светилка 150 W	81,66–162,45	0,97–0,99	80,13–160,40	0,97–0,99
LED светилка 165 W	41,20–170,83	0,96–0,99	41,04–166,41	0,95–0,99
LED светилка 53 W	17,53–56,80	0,83–0,97	17,49–54,97	0,81–0,97

Смањивањем светлосног флуksа смањивала се активна снага светилки: приликом димовања конвенционалних (натријумових и метал-халогених) светилки активна снага је опадала за мањи проценат од процентуалне редукције светлосног флуksа, док су приликом димовања LED светилки светлосни флуks и активна снага опадали за приближно исти проценат.

Смањивањем светлосног флуksа (смањивањем активне снаге) у првом делу експеримента зависно од типа и снаге светилки смањивао се и фактор снаге код свих светилки, а највише се смањује у случају LED светилке снаге 53 W у поређењу са другом LED светилком и осталим конвенционалним светилкама.

Поређењем опсега фактора снаге сваке од светилки у другом делу експеримента са одговарајућим опсегом фактора снаге у првом делу експеримента, у већини случајева (7 од 9) може се уочити да је прикључење светилке на мрежни напон преко редне везе отпорности и индуктивности довело до смањења једне од или обе границе опсега (у случајевима натријумове светилке снаге 250 W и метал-халогене светилке снаге 150 W није дошло до промена границе опсега фактора снаге). Највеће смањење фактора снаге уочено је код светилке која је имала најмањи фактор снаге и у претходном делу експеримента – LED светилке снаге 53 W, због чега се за употребу ове светилке у режимима димовања, односно употребу светилки са типом драјвера који је инсталиран у овој светилци, препоручује употреба пригушнице за поправку фактора снаге (као и сузбијање виших хармоника у случају редне пригушнице) чије су вредности дате у табелама 10 и 19.

Поређењем одговарајућих реактивних снага по дефиницији Kusters-а и Moore-а (Q_{kusL} и Q_{kusC}) из табела 2–19 за све светиљке у свим режимима рада може се закључити да је реактивна снага свих разматраних светиљки била капацитивног карактера ($Q_{kusL} < 0$ и $Q_{kusC} > 0$).

4.2.1 Стварне годишње процентуалне уштеде активне и реактивне електричне енергије

Да би се илустровао утицај различитих режима димовања у пракси, изабрано је неколико типичних саобраћајница у циљу одређивања процентуалних промена утрошене активне и реактивне електричне енергије на годишњем нивоу у случају инсталирања LED уместо конвенционалних (натријумових и метал-халогених) светиљки.

Светлотехничка решења за неколико типичних саобраћајница узета су из Прилога 1, док су два решења реализована помоћу LED светиљки снаге 53 W у случају двостраног наспрамног и цик-цак распореда добијена накнадним прорачунима у софтверу Ulysse (видети табеле 22–24).

Табела 22. Основни подаци о светлотехничким решењима разматраних улица/путева реализованим помоћу светиљки са натријумовим светиљкама

Распоред	Светло-техничка класа	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lamp} (W)	kW/km
Централни 3 траке (аутопут)	M1	42	13	0,87	0	1,91	41	68	9,5	0,56	250	11,9
Двострани наспрамни 4 траке	M2	27	8	0,37	5	1,67	60	69	10,0	0,50	100	7,4
Цик-цак 3 траке	M4	21	8	0,87	10	0,75	40	69	9,7	0,55	70	3,3
Једнострани 2 траке	M3	36	8	1,37	10	1,08	46	60	14,6	0,42	100	2,8

Табела 23. Основни подаци о светлотехничким решењима разматраних улица/путева реализованим помоћу метал-халогених светиљки

Распоред	Светло-техничка класа	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lamp} (W)	kW/km
Централни 3 траке (аутопут)	M1	20	13	0,37	10	1,93	39	91	9,6	0,56	150	15,0
Двострани наспрамни 4 траке	M2	28	8	-0,13	10	1,87	57	69	10,0	0,57	150	10,7
Цик-цак 3 траке	M4	21	8	1,37	10	0,75	41	72	9,8	0,54	70	3,3
Једнострани 2 траке	M3	34	8	1,37	5	1,03	40	63	14,9	0,37	100	2,9

Табела 24. Основни подаци о светлотехничким решењима разматраних улица/путева реализованим помоћу LED светиљки

Распоред	Светло-техничка класа	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lamp} (W)	kW/km
Централни 3 траке (аутопут)	M1	40	13	0,45	0	1,93	39	80	9,2	0,47	165	8,3
Двострани наспрамни 4 траке	M2	26	8	0,79	0	1,60	55	86	9,8	0,40	53	4,1
Цик-цак 3 траке	M4	27	8	1,29	0	0,82	41	59	11,3	0,38	53	2,0
Једнострани 2 траке	M3	36	8	1,29	0	0,98	45	77	12,3	0,30	53	1,5

На основу календара укључења и искључења јавног осветљења у Београду добијеног од ЈКП Јавно осветљење, као и на основу дужине трајања сваког од 3 режима (Режим 1: од укључења до 22h, Режим 2: од 22h до 24h, Режим 3: од 24h до искључења), за сваки месец у години, као и за целу годину, израчунато је трајање сваког од та 3 режима. Добијени подаци су приказани у табели 25.

Табела 25. Време укључености светиљки по месецима и укупно годишње у сваком од три режима

Месец	Време укључености светиљки (h:min)			
	I режим (од укључења до 22h)	II режим (22-24h)	III режим (од 00h до искључења)	Укупно
Јануар	166:17:00	62:00:00	218:09:00	446:26:00
Фебруар	130:46:00	56:00:00	182:38:00	369:24:00
Март	123:51:00	62:00:00	175:02:00	360:53:00
Април	99:18:00	60:00:00	140:38:00	299:56:00
Мај	83:47:00	62:00:00	122:54:00	268:41:00
Јун	69:20:00	60:00:00	110:53:00	240:13:00
Јул	73:09:00	62:00:00	121:05:00	256:14:00
Август	91:13:00	62:00:00	137:50:00	291:03:00
Септембар	114:30:00	60:00:00	151:06:00	325:36:00
Октобар	148:09:00	62:00:00	176:16:00	386:25:00
Новембар	166:30:00	60:00:00	191:58:00	418:28:00
Децембар	180:07:00	62:00:00	215:53:00	458:00:00
Укупно годишње:	1446:57:00	730:00:00	1944:22:00	4121:19:00

На основу података из табеле 25, као и на основу података о процентуалној редукцији светлосног флуksа светиљки у случају сваке од светлотехничких класа из табеле 1 и одговарајућих измерених снага светиљки из табела 11–19, за период од годину дана израчуната је процентуална редукција активне и реактивне снаге (потрошње електричне енергије) када се уместо конвенционалних (натријумових и метал-халогених) светиљки користе LED светиљке. Резултати прорачуна су дати у табели 26.

Табела 26. Процентуална редукција активне и реактивне снаге коришћењем LED уместо конвенционалних светиљки за сваки од разматраних случајева

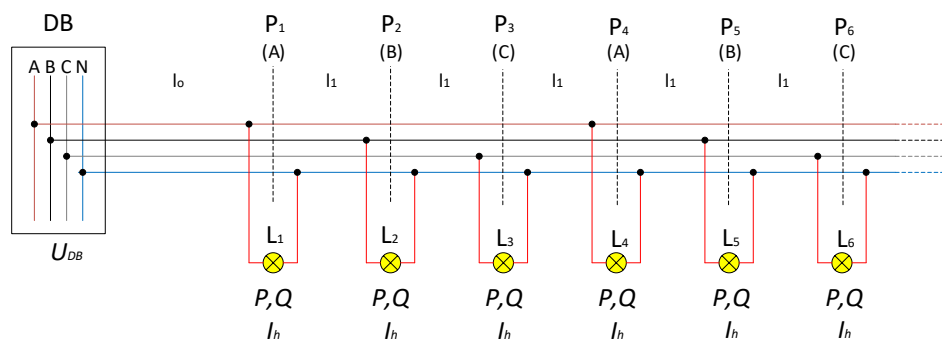
Распоред	Светлотехничка класа	Редукција активне снаге у случају натријумових светиљки (%)	Редукција реактивне снаге у случају натријумових светиљки (%)	Редукција активне снаге у случају метал-халогених светиљки (%)	Редукција реактивне снаге у случају метал-халогених светиљки (%)
Централни 3 траке (аутопут)	M1	42	53	53	68
Двострани наспрамни 4 траке	M2	53	27	67	35
Цик-цак 3 траке	M4	51	37	51	38
Једнострани 2 траке	M3	53	29	56	36

Анализом резултата из табеле 26 може се закључити да је примена LED светиљки обезбедила преко 50% уштеда активне снаге у комбинованом режиму рада у свим разматраним случајевима осветљења улица/путева, осим у случају осветљења аутопута где је редукција активне снаге износила 42% (редукција реактивне снаге износила је 27–53% и 35–68% у поређењу са решењима са натријумовим и метал-халогеним светиљкама, респективно).

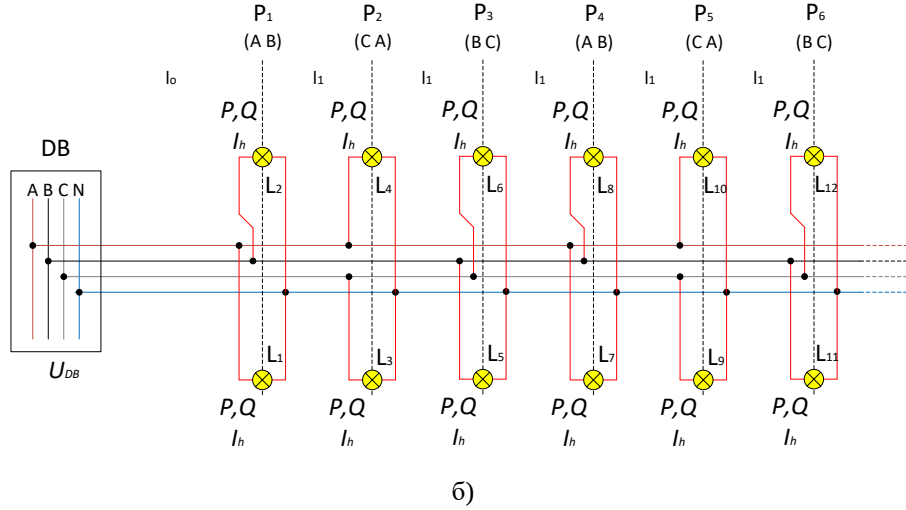
4.3 Модел за одређивање изобличења напона у случају нелинеарног и несиметричног уличног LED осветљења

4.3.1 Распоред стубова

Један од техничких аспеката који би могли негативно утицати на примену LED пакета у уличном осветљењу је хармонијско изобличење напона, јер је струја LED светиљки веома изобличена. Ако LED оптерећење значајно учествује у мрежи ниског напона, оно може изазвати значајно изобличење напона, а додатно погоршање квалитета напона се јавља због чињенице да је улично осветљење у већини случајева несиметрично. Ово је очигледно са слике 2, где су представљена два различита распореда стубова: једнострани (слика 2а) и централни, где сваки стуб носи две светиљке (слика 2б). Пошто су светиљке повезане на фазе А, В и С (слика 2), делови трофазног напојног кабла између суседних стубова нису оптерећени симетрично. Један од главних циљева овог истраживања био је да се развије математички модел за предвиђање изобличења напона у инсталацијама уличног LED осветљења приказаним на слици 2. Модел се може сматрати општим, јер се три преостала стандардна (најчешће коришћена) распореда стубова (наспрамни, цик-цак и централни) могу третирати као једнострани распоред (са једним напојним каблом у случају централног, односно са два напојна кабла у случају наспрамног и цик-цак распореда).



а)



Слика 2. Два стандардна распореда стубова: једнострани (а), и централни (б)

4.3.2 Основе развијеног математичког модела

Уобичајени модел за процену изобличења напона у случају нелинеарног оптерећења је познати модел импедансе. Стандардно се користи у случају симетричног трофазног оптерећења. За сваки од хармоника дефинише се и решава посебно коло (модел импедансе). Примена овог модела за процену изобличења напона у електроенергетским мрежама са значајним присуством компактних флуо извора светлости са уграђеним предспојним уређајима представљена је у референци [28]. Општа примена оваквог модела представљена је у референци [29].

Постоје и општији модели који узимају у обзир несиметрична трофазна оптерећења. Описани метод у референци [1] нуди једноставан поступак за прорачун напона решавањем линеарне матричне једначине:

$$[\underline{I}_h] = [\underline{Y}_h][\underline{U}_h], \quad (18)$$

где је $[\underline{Y}_h]$ матрица хармоничних адмитанси система за хармоник реда h ($h \geq 1$). За трофазни систем, елементи матрице адмитанси 3×3 су сопствене и међусобне адмитансе. Сличан приступ је коришћен у референци [30]. Проблем код примене оваквих модела је одређивање релевантних параметара елемената мреже (на пример, сопствене и међусобне адмитансе водова или трансформатора). Стога је модел заснован на симетричним компонентама [1] прикладнији. Параметри разматраног елемента мреже могу се добити мерењима извршеним на том елементу. Ова мерења се лако обављају на правилно спојеним прикључцима елемента. За основни хармоник, параметри су типично доступни као каталошки подаци.

За сваки напонски и струјни извор хармоника примењује се трансформација несиметричног трофазног система (А, В, С) на систем директне, инверзне и нулте (d, i, 0) компоненте. Фортескјуова трансформација напона је дата формулом:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{bmatrix}, \quad (19)$$

где је $\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$, $j = \sqrt{-1}$. Следећи корак је подешавање и решавање модела са импедансама, сличног оном који је представљен у референци [28], за сваки од d, i, 0 система и за сваки

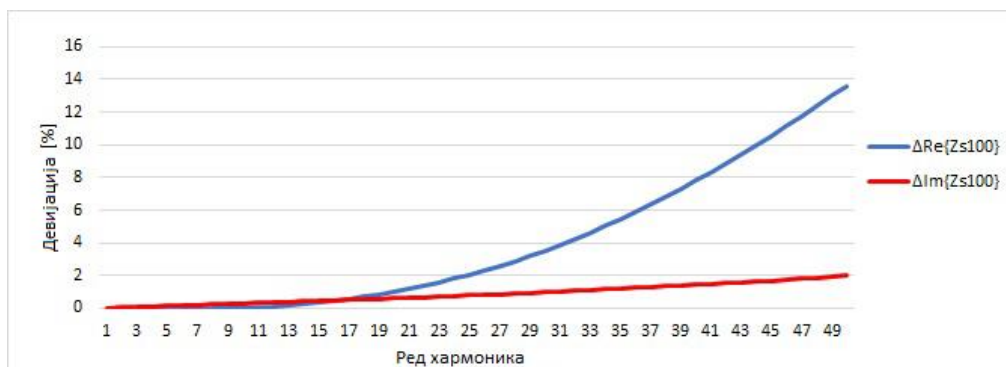
хармоник. За моделовање извора електричне енергије који напаја разматрану електричну инсталацију користе се напонски извори (као еквивалентни Тевененови генератори), док се за моделовање нелинеарног оптерећења (LED светиљке) разматране инсталације осветљења пута користе струјни извори.

На овај начин, анализа за сваки од хармоника може да се врши у d , i и 0 системима као што се врши у симетричном трофазном систему, где се може применити модел еквивалентне импедансе по фази. Математички модел је исти, али се параметри у d , i и 0 системима разликују. Треба напоменути да су у већини случајева (оним без ротирајућих електричних машина) одговарајући параметри у d и i системима исти. Након извршених прорачуна у d , i и 0 системима, могуће је применити инверзну трансформацију из d , i , 0 у A , B , C систем напона:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_0 \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix}. \quad (20)$$

Након решавања једначина (одређивање d , i и 0 компоненти напона у чворовима и струја у гранама), одређују се стварне вредности A , B и C система напона у чворовима и струја у гранама коришћењем матрице трансформације 3×3 дате у једначини 20.

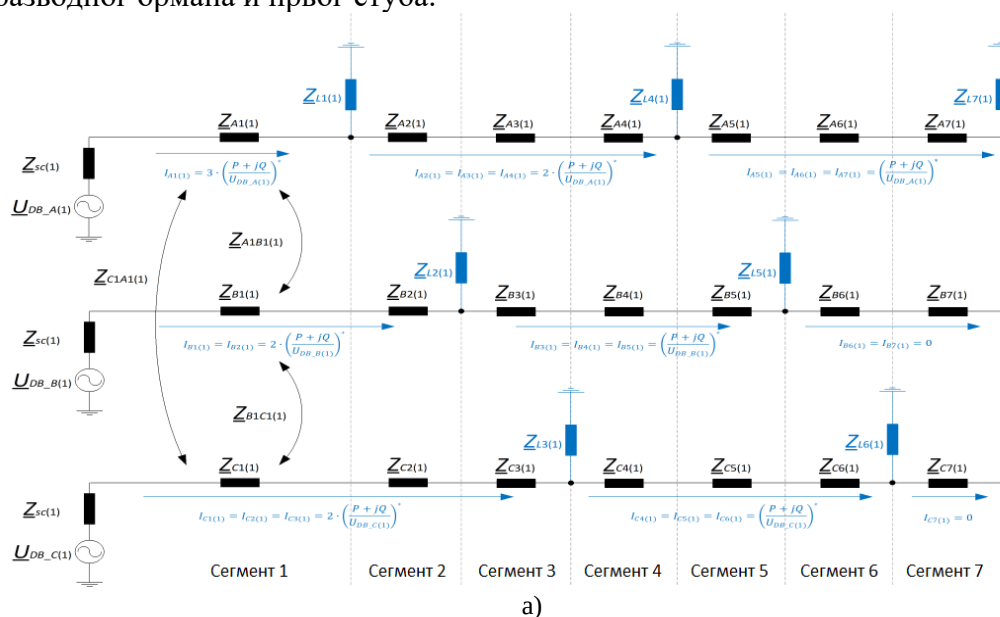
Параметри елемената мреже (отпорност R и индуктивност L) зависе од фреквенције. Они се могу одредити или детаљним прорачуном расподеле магнетског поља за одређени хармоник (што је једна од опција у комерцијалном софтверу намењеном за анализе електроенергетског система), или мерењима извршеним на релевантним елементима електричне мреже. Утицај скин ефекта и ефекта близине на отпорност напојног кабла узети су у обзир. Конвенционално, прорачуни пада напона основног хармоника на нисконапонским кабловима врше се без разматрања капацитивности кабла. Прорачуни провере извршени су на два узорка модела како би се истражио ефекат занемарене капацитивности. Модели узорака су засновани на стандардној Π шми вода, формираној од подужних параметара вода и линеарних диференцијалних једначина другог реда које описују пропагацију дуж вода [29]. Провере су извршене упоређивањем реалног и имагинарног дела еквивалентне импедансе у случајевима са и без узимања у обзир оточног кондензатора. Прва провера се односи на прво растојање (између разводног ормана (на којем је прикључен еквивалентни Тевененов генератор) и прве светиљке), где је еквивалентна импеданса одређена са: $Z_{s1} = (-j/(\omega C/2)) \parallel [(R + j\omega L) + (-j/(\omega C/2) \parallel Z_t)]$. За растојање између стубова 50 m, хармонијски ред 50, пресек кабла од 35 mm² и Тевененов генератор описан у поглављу 4.5, разлике у ситуацијама када кондензатор није разматран су: за реални део еквивалентне импедансе 0,13%, а за њен имагинарни део 0,000507%. Даљи прорачуни су извршени за еквивалентне импедансе које се виде са даљих стубова i ($i = 2, \dots, 100$) према разводном орману: $Z_{si} = (-j/(\omega C/2)) \parallel [(R + j\omega L) + (-j/(\omega C/2) \parallel Z_{s(i-1)})]$. Слика 3 приказује разлике за ситуацију када капацитивности нису разматране за 100. стуб. Максимално одступање појављује се за 50. хармоник и износи 13,61% за реални део еквивалентне импедансе и 2% за њен имагинарни део. Треба напоменути да занемаривање утицаја капацитивности има знатно мањи ефекат на напон од наведених 13,6% и 2%, пошто се струје виших хармоника смањују са повећањем i . Струја достиже свој максимум (једнак збиру струја свих LED светиљки) у каблу који повезује разводни орман и први стуб, где су одступања од импедансе само 0,13% за реални део и 0,000507% за имагинарни део. С друге стране, на даљим стубовима, где су одступања импедансе већа, струје су мање. Уз то, у реалистичнијој инсталацији са 50 стубова и растојањем између стубова од 50 m највеће одступање (за 50. хармоник на најудаљенијем (50.) стубу) износи 4,58% за реални део импедансе и 0,48% за њен имагинарни део.

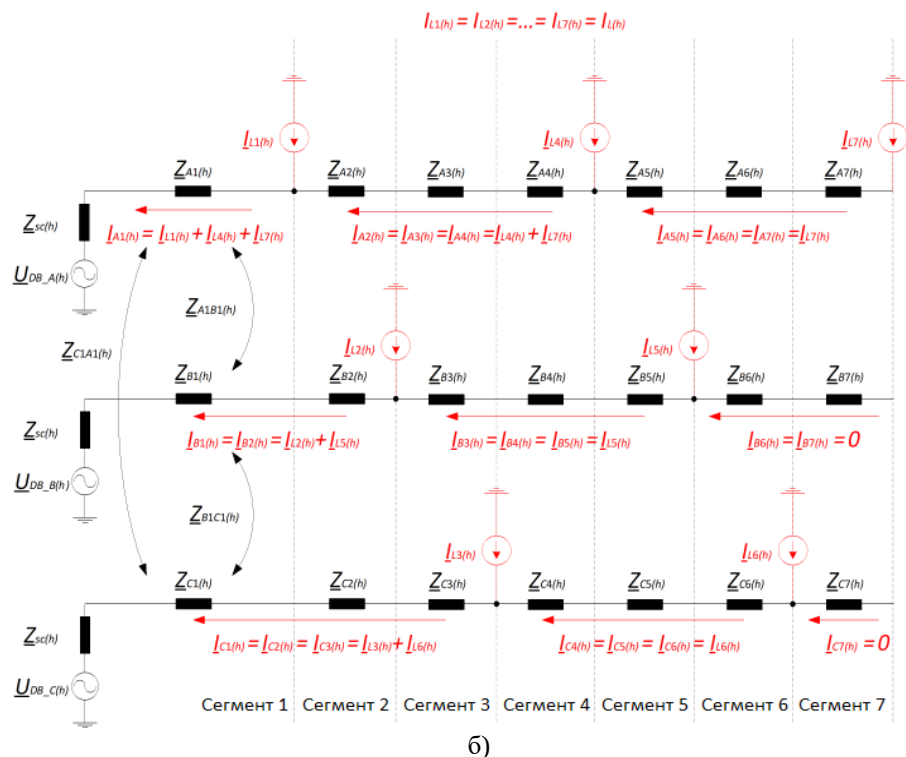


Слика 3. Девијација реалног и имагинарног дела еквивалентне импедансе без узимања у обзир капацитивности на 100. стубу

4.3.3 Примена развијеног модела на трофазну инсталацију уличног LED осветљења

Еквивалентно коло (модел импедансе) за једностранни распоред стубова (приказано на слици 2), које се односи на основне и више хармонике, представљено је на слици 4. Слично еквивалентно коло се лако може добити и за трофазни централни распоред стубова (приказан на слици 2б). Инсталација уличног осветљења се из разводног ормана напаја нисконапонским кабловима. Средњенапонска мрежа напајања и кабл, енергетски трансформатор и каблови до разводне кутије моделовани су еквивалентним Тевененовим генераторима. Напон генератора (означен са U_{DB}) једнак је измереном напону у разводном орману у случају нултог оптерећења, а његова импеданса (означена са Z_{sc}) једнака је збиру импеданси претходно наведених елемената мреже. Основни хармоник напона Тевененовог генератора приближно је једнак називном напону, а Тевененова импеданса одговара класичној импеданси кратког споја која се односи на разводни орман. За више хармонике постоји и напон у разводном орману у случају нултог оптерећења, због других нелинеарних оптерећења која постоје у мрежи из које се напаја улично осветљење. Падови напона на свакој фази на делу кабла између разводног ормана и првог стуба, као и на сваком делу кабла између суседних стубова, резултат су струја у све три фазе кабла (због магнетске спреге), што је илустровано на слици 4а за део кабла између разводног ормана и првог стуба.





Слика 4. Шематски приказ модела који се односи на пример трофазног једностраног распореда са 7 стубова (светилки): за основни хармоник (а) и за више хармонике (за сваки хармоник (h) успоставља се посебно коло) (б)

Објашњење асиметрије фазног оптерећења полази од претпоставке да је фундаментална струја прве светиљке (означена са $L1$ на слици 4), која је повезана на фазу A , једнака:

$$\underline{I}_{L_{A(1)}} = \frac{P + jQ}{U_{DB_{A(1)}}^*}, \quad (21)$$

где су P и Q активна и реактивна снага основног хармоника светилјке. Као поједностављење је усвојено да су ефективне вредности и фазни углови основног хармоника струје једнаки за све светилјке у разматраној инсталацији уличног осветљења, односно да на њих не утичу мале промене напона услед падова напона. Напон $U_{DB_A(1)}$ је измерени фундаментални напон мреже хармоника фазе А у разводном орману. У фази пројектовања узима се да је једнак називном напону.

Ефективна вредност струје сваке светиљке за h -ти хармоник може се израчунати коришћењем следеће једначине:

$$\frac{I_{L1_{A(h)}}}{100} = \frac{i_{L1_{A(h)[\%]}}}{100} \cdot I_{L1_{A(1)}}, \quad (22)$$

која се заснива на измереној процентуалној вредности сваког струјног хармоника. Као што је објашњено у даљем тексту, претпостављено је да су ефективне вредности свих струјних хармоника истог реда једнаке за све светиљке у разматраној инсталацији уличног осветљења (видети поглавља 4.4.3 и 4.5). Претпостављено је да фазни углови струјних хармоника зависе од фаза основног хармоника напона у тачки прикључка светиљке, због чега се фазни углови струјних хармоника разликују од једног до другог стуба. Ово чини процедуру прорачуна компликованијом, али неопходном пошто фазни померај струјних хармоника има значајан утицај (изражен у процентима) на мале вредности хармоника напона у чворовима.

Као што се може видети са слике 4, за већину сегмената између стубова струје у фазама А, В и С напојног кабла нису једнаке. У зависности од броја стубова, струја се такође може разликовати у три фазе дела напојног кабла између разводног ормана и првог стуба (ово важи за једностранни распоред приказан на слици 4).

Као што је претходно наведено, због асиметрије струја у деловима напојног кабла у случајевима различитих сегмената, погодно је трансформисати А, В, С систем у d, i, 0 систем у сваком делу напојног кабла. За N-ти део, који означава вредности струјног хармоника h у овом делу са $\underline{I}_{N_{A(h)}}$, $\underline{I}_{N_{B(h)}}$ и $\underline{I}_{N_{C(h)}}$, одговарајуће d, i и 0 компоненте струје износе:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_{N_{0(h)}} \\ \underline{I}_{N_{d(h)}} \\ \underline{I}_{N_{i(h)}} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{N_{A(h)}} \\ \underline{I}_{N_{B(h)}} \\ \underline{I}_{N_{C(h)}} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

На овај начин се фазне струје у свим деловима кабла (за све сегменте) и за све релевантне хармонике (од 1. до 50.) трансформишу у одговарајуће струје у d, i и 0 систему.

Напони на крају сваког дела кабла (на прикључцима даљег стуба) и за све хармонике могу се израчунати коришћењем следећих једначина:

– за први стуб:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{1_{0(h)}} \\ \underline{U}_{1_{d(h)}} \\ \underline{U}_{1_{i(h)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{DB_{0(h)}} \\ \underline{U}_{DB_{d(h)}} \\ \underline{U}_{DB_{i(h)}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{Z}_{1_{0(h)}} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_{1_{d(h)}} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_{1_{i(h)}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{1_{0(h)}} \\ \underline{I}_{1_{d(h)}} \\ \underline{I}_{1_{i(h)}} \end{bmatrix} \quad (24)$$

– за N-ти стуб ($N > 1$):

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{N_{0(h)}} \\ \underline{U}_{N_{d(h)}} \\ \underline{U}_{N_{i(h)}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{N-1_{0(h)}} \\ \underline{U}_{N-1_{d(h)}} \\ \underline{U}_{N-1_{i(h)}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{Z}_{N_{0(h)}} & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_{N_{d(h)}} & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_{N_{i(h)}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_{N_{0(h)}} \\ \underline{I}_{N_{d(h)}} \\ \underline{I}_{N_{i(h)}} \end{bmatrix}. \quad (25)$$

где матрице импеданси садрже редне импедансе напојног кабла. Пошто је претпостављено да постоји симетрија у каблу, вандијагонални елементи су једнаки нули и постоје следеће релације између импеданси у 0, d, i систему и у систему А, В, С: $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$, $\underline{Z}_{AB} = \underline{Z}_{BC} = \underline{Z}_{CA}$, $\underline{Z}_0 = \underline{Z}_A + 2\underline{Z}_{AB}$ и $\underline{Z}_d = \underline{Z}_i = \underline{Z}_A - \underline{Z}_{AB}$ [1].

Применом представљеног математичког модела, комплексне вредности напона (његов основни и његови виши хармоници), које садрже информације о ефективној вредности и фазном углу, могу се израчунати у сваком од чворова у d, i и 0 системима. Коначно, применом инверзне трансформације из d, i, 0 у А, В, С систем (једначина 20), могу се израчунати све хармонијске компоненте фазних напона у свим чворовима.

Развијени софтвер је написан у MATLAB-у. Рачунање се врши за свако растојање између стубова (сваки сегмент) посебно, због чега прорачун не траје дуго чак и за велики број стубова и не захтева посебне рачунарске ресурсе. Напомене:

1. Утицај изобличења напона напајања на дисторзију струје LED светиљке је занемарено. То може бити истражено експериментално или моделовањем електричног кола LED светиљки, које садржи електронски драјвер и диоде, што је ван оквира овога истраживања.

2. Напон на прикључцима LED светиљке може се лако утврдити додавањем пада напона на каблу светиљке постављеном кроз стуб напону напојног кабла на дну стуба. Овакав прорачун напона на прикључцима LED светиљки примењен је у анализи у поглављу 4.5.

4.4 Експерименти изведени на инсталацији уличног осветљења

4.4.1 Експериментална поставка

Експерименти су извршени на два дела инсталације уличног осветљења коју карактерише једнострани распоред светилки (фотографије са терена су представљене на слици 5). Попречни пресек алуминијумских проводника у напојном каблу (који спаја стубове и који се напаја из разводног ормана), који се напајају из разводног ормана јавног осветљења, износио је 35 mm^2 . Кабл овог типа и попречног пресека је стандардизован за инсталације осветљења улица/путева у Републици Србији. Пракса која траје деценијама показала је да задовољава захтеве у погледу укупног оптерећења, падова напона и заштите од електричног удара, због чега његов пресек није израчунат (уместо тога, проверава се само да ли је сваки од ових захтева испуњен). Употреба каблова са фиксним попречним пресеком олакшава одржавање инсталација осветљења улица/путева и представља уобичајену праксу широм света.



Слика 5. Фотографије усликане на месту извођења експеримента

а) Једнострани распоред инсталације уличног осветљења спојене на једну фазу, б) разводни орман инсталације осветљења са Circutor MYeBOX 1500 са CP-5 струјним сензорима, в) Circutor AR5L са CP-5 струјним сензорима за мерење електричних параметара појединачних светилки, г) Fluke 434 анализатор за мерење електричних параметара светилке постављене на последњи стуб

Свака светиљка се напајала са прикључака смештених на дну стуба једнофазним проводником $3 \times 2,5 \text{ mm}^2$, дужине 7 m.

Постојале су две групе мерења, једна на делу улице са 6 LED светиљки придружене температуре боје 4000 K, свака снаге 85 W и друга на делу улице са 5 LED светиљки придружене температуре боје 3000 K, свака снаге 80 W (светиљке са LED пакетима хладно-беле боје нису тестиране због негативних реакција јавности у вези са оваквим инсталацијама уличног осветљења [31]). У оба случаја свака светиљка постављена је на посебном стубу. За време експеримента само су LED светиљке биле повезане до напојног кабла. Растојање између стубова било је око 30 m. Дужина напојног кабла између разводног ормана и првог стуба дела улице са светиљкама неутралне беле боје износила је 79 m, а између разводног ормана и првог стуба дела улице са светиљкама топло-беле боје 349 m.

Конвенционални драјвер је типа PISE-A110A (LG Innotek). Његове излазне електричне карактеристике су: 110 W, 68–110 Vdc, 1 A. THD износи 20% при назначеној снази. Опсег улазног напона је веома широк (износи до 120–277 Vac), због чега фактор снаге може бити пасти и до 0.4 при 90% смањеној излазној снази. Драјвер са побољшаним карактеристикама при димовању је типа Xi FP 150 W 0.3–1.0 A SNLDAE 230 V S240 sXt (PHILIPS Xitanium). Опсег излазног напона је 186–250 Vdc, а THD износи само 7% при назначеној снази. Опсег улазног напона је 202–254 Vac (много ужи него у случају конвенционалног драјвера). Детаљне карактеристике оба типа драјвера могу се наћи у техничким подацима произвођача. И један и други комерцијални драјвер имају CE сертификат, што значи да су произведени у складу са стандардима електромагнетске компатибилности, од којих се један (61000-3-2) бави хармонијском емисијом струје (његово последње издање је из 2018. [32]).

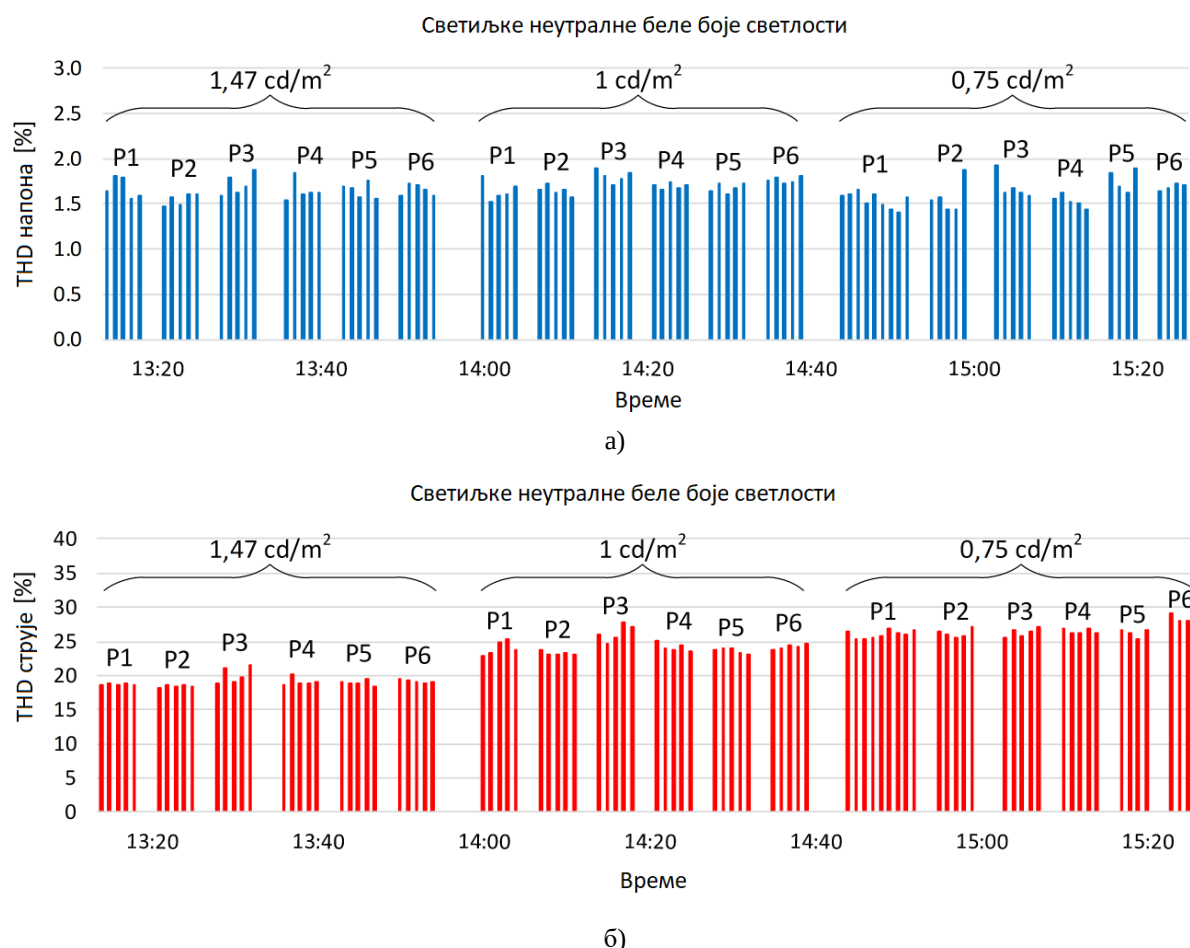
У оквиру сваке од две групе мерења извршена су три експеримента. Први се односио на нормални режим осветљења (ниво сјајности је био $1,47 \text{ cd/m}^2$ у делу улице са светиљкама неутралне беле боје, и $1,49 \text{ cd/m}^2$ у делу са светиљкама топло-беле боје, оба одговарају светлотехничкој класи улице M2 [12]). Преостала два експеримента односе се на смањене нивое сјајности (1 cd/m^2 и $0,75 \text{ cd/m}^2$, који одговарају светлотехничким класама M3 и M4, респективно [12]). Треба напоменути да су већа смањења (за више од две светлотехничке класе) изузетно ретка, чак и током касних ноћних сати. Сви нивои сјајности су подешени помоћу Owllet телеменаџмент система, развијеног од стране Schröder групе [20]. Све светиљке у сваком од два дела улице биле су прикључене на исту фазу напојног кабла.

За потребе мерења коришћена су три мрежна анализатора (уређаји обезбеђују мерење просечне снаге и ефективних вредности напона и струја у оквиру одређеног периода, као и снимање таласних облика напона и струја и хармоника (до 50. хармоника) на крају периода узорковања). Мрежни анализатор Circutor MYeBOX 1500 са CP-5 струјним сензорима био је постављен у разводном орману и мерио је струју у каблу који напаја светиљке и напон у разводном орману (напон мреже). Други мрежни анализатор, Circutor AR5L са CP-5 струјним сензорима, коришћен је за мерење струје и напона, у трајању од 4 до 9 min. за сваку појединачну светиљку у сваком од три режима. Трећи уређај (Fluke 434 Energy Analyzer) коришћен је за мерење струја и напона на LED светиљкама неутралне беле и топло-беле боје постављених на стубовима најудаљенијим од разводног ормана. Период мерења са Circutor мрежним анализаторима (и MYeBOX 1500 и AR5L) износио је 1 min, док је за Fluke мрежни анализатор износио 5 s.

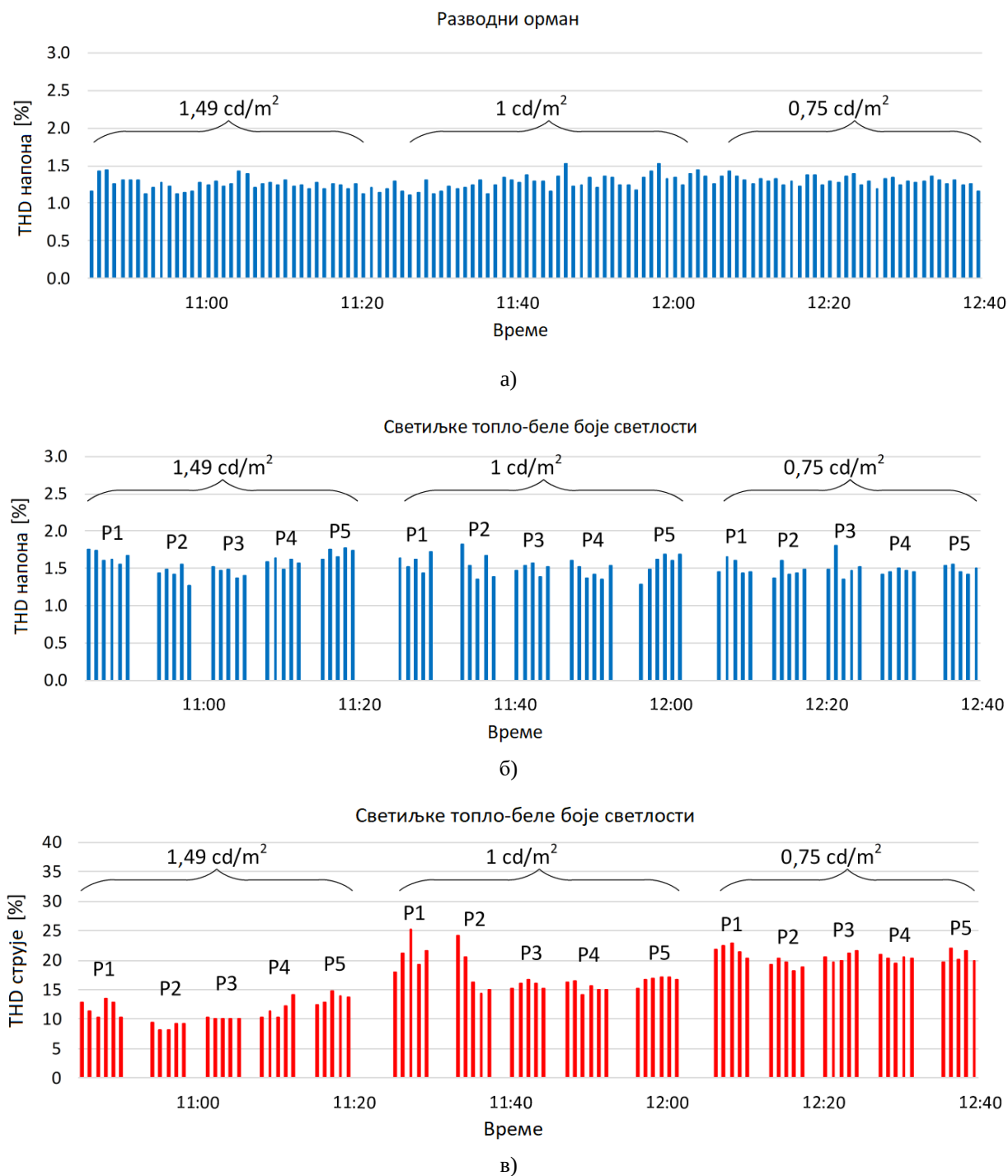
4.4.2 Резултати мерења

Први мерни уређај (Circutor MYeBOX 1500) био је прикључен на разводни орман, други (Fluke) на најудаљенији стуб од разводног ормана, док је трећи (Circutor AR5L) померан са једног стуба на други, почевши од најближег разводном орману. У мерним записима

добијеним трећим мерним уређајем постоје периоди са нултим оптерећењем (5 периода за део улице са светиљкама неутралне беле боје и 4 периода за део улице са светиљкама топло-беле боје), који одговарају периодима када је уређај померен од једног до другог стуба. Као квантитативно важни подаци, THD напона и струје измерени у експерименту са светиљкама неутралне беле боје приказани су на слици 6, а за светиљке топло-беле боје на слици 7. Табела 27 садржи податке за светиљке неутралне беле и топло-беле боје у сваком од три разматрана режима осветљења. Дате просечне активне, реактивне и привидне снаге основног хармоника (P , Q и S , респективно) добијене су читавањем инструмената. Преостале снаге су израчунате на основу измерених напона и струја, у складу са стандардима IEEE 1459 [22], DIN 40110 [23] и теорији физичких компоненти струја (CPC – Currents' Physical Components) [33, 34]. Укупна реактивна снага је последица компонената реактивне струје при основној фреквенцији и при фреквенцијама виших хармоника, док је расипна снага проузрокована променом еквивалентне кондуктансе потрошача при различитим фреквенцијама хармоника. На основу резултата приказаних у табели 27, може се приметити значајан утицај хармоника на повећање укупне реактивне снаге и смањење фактора снаге, у поређењу са вредностима основног хармоника. Такође, значајно смањење нивоа сјајности праћено је значајним смањењем фактора снаге светиљке.



Слика 6. THD (изражен у %) напона и струје на стубовима у експерименту са LED светиљкама неутралне беле боје постављеним на стубове P1–P6



Слика 7. THD (изражен у %) напона и струје у експерименту са LED светиљкама топло-беле боје постављеним на стубове P1–P5

Табела 27. Снаге светиљки са факторима снаге у разматраним режимима осветљења

Тип LED чипова	Снага	1,47 (1,49) cd/m ²	1 cd/m ²	0,75 cd/m ²
Неутрална бела боја	Фундаментална активна снага P (W)	84,7	50,3	34,0
	Фундаментална реактивна снага Q (var)	20,6	19,5	18,7
	Фундаментална привидна снага S (VA)	87,2	54,0	38,8
	Фундаментални фактор снаге (капацитиван)	0,971	0,932	0,876
	Укупна активна снага P_{tot} (W)	84,8	50,3	34,0
	Укупна реактивна снага Q_{tot} (var)	25,0	22,5	21,2
	Снага дисторзије D_s (VA)	8,5	6,5	3,9
	Укупна привидна снага S_{tot} (VA)	88,8	55,6	40,3
	Фактор снаге	0,954	0,905	0,844
Топло-бела боја	Фундаментална активна снага P (W)	80,3	45,9	30,6
	Фундаментална реактивна снага Q (var)	21,2	19,7	18,6
	Фундаментална привидна снага S (VA)	83,1	49,9	35,8
	Фундаментални фактор снаге (капацитиван)	0,967	0,919	0,855
	Укупна активна снага P_{tot} (W)	80,3	45,9	30,6
	Укупна реактивна снага Q_{tot} (var)	22,5	20,9	19,1
	Снага дисторзије D_s (VA)	6,4	5,4	4,5
	Укупна привидна снага S_{tot} (VA)	83,6	50,7	36,5
	Фактор снаге	0,960	0,905	0,836

Коментари резултата мерења:

- Пошто је укупна снага светиљки веома мала (у пуном режиму отприлике износи $6 \times 85 \text{ W} = 510 \text{ W}$ (неутралне беле боје) и $5 \times 80 \text{ W} = 400 \text{ W}$ (топло-беле боје)), THD напона на разводној кутији практично не зависи од режима рада светиљки (видети слику 7а). Чак и за мали дистрибутивни трансформатор номиналне снаге 400 kVA, ова оптерећења представљају само око 0,1%, што значи да би постојао врло мали пад напона на импеданси трансформатора узрокован вишим струјним хармоницима. Импеданса нисконапонских водова од трансформатора до разводног ормана такође се може сматрати веома малом, а одговарајући падови напона занемарљивим.
- Слика 8 представља спектре наизменичне струје LED драјвера за светиљке неутралне беле и топло-беле боје светлости које се налазе на првом стубу одговарајућих делова улице за сваки од разматраних режима осветљења ($R1$ = пун режим, $R2$ = режим са 1 cd/m^2 и $R3$ = режим са $0,75 \text{ cd/m}^2$) – за детаље видети коментар 5. Разлика у спектрима светиљки неутралне беле и топло-беле боје светлости је очигледна и претежно узрокована различитим типовима драјвера инсталираним у светиљкама.
- Производ импедансе напојног кабла између суседних стубова (за 5. хармоник износила је $(57,4 + j21,8) \text{ m}\Omega$) и сваког од струјних хармоника (у амперима) је мала. То значи да се хармонијско изобличење напона не мења много дуж стубова.
- Слике 6б и 7в показују да се THD_i генерално повећава са смањењем снаге светиљке.
- Не може се уочити утицај THD-а напона (слике 6а и 7б) на вредности THD струје у стубу (слике 6б и 7в). Сходно томе, дефинисане су карактеристике хармоника струје независно од напона и коришћене у поглављима 4.4.3 и 4.5. Средње вредности измерених струјних хармоника (у mA) израчунате су за сваки од три разматрана режима осветљења, како за део улице са светиљкама неутралне беле боје, тако и за део улице са светиљкама топло-беле боје. Сви струјни хармоници (од 1. до 50.) за свих 6 разматраних режима осветљења (3 режима за сваки од две деонице улице) приказани су на слици 8. Сваки податак приказан на слици 8 одређен је као средња вредност одговарајућих измерених узорака; на пример, за режим неутрална бела боја/ $1,47 \text{ cd/m}^2$

- било је 30 узорака (5 за сваки од 6 стубова), док је за режим топло-бела боја $1,49 \text{ cd/m}^2$ било 26 узорака (6 измерених на стубу 1 и 5 измерених на сваком од 4 преостала стуба).
6. THD_u и значајни појединачни хармоници напона у разводном орману приказани су у табели 28 (појединачни хармоници напона (до 25. према EN 50160 [35]) већи од 0.1% у односу на основни хармоник сматрани су значајним).



(a)



(б)

Слика 8. Средње вредности хармоника наизменичне струје LED драјвера за деонице улице са светилкама неутралне беле и топло-беле боје (у mA)

Табела 28. Средња вредност THD_u и уочљиви хармоници напона (реда h), изражени у % у односу на основни хармоник, измерени у разводном орману

THD_u	$h = 3$	$h = 5$	$h = 7$	$h = 11$
1,15	0,22	0,71	0,84	0,15

4.4.3 Провера тачности развијеног софтвера

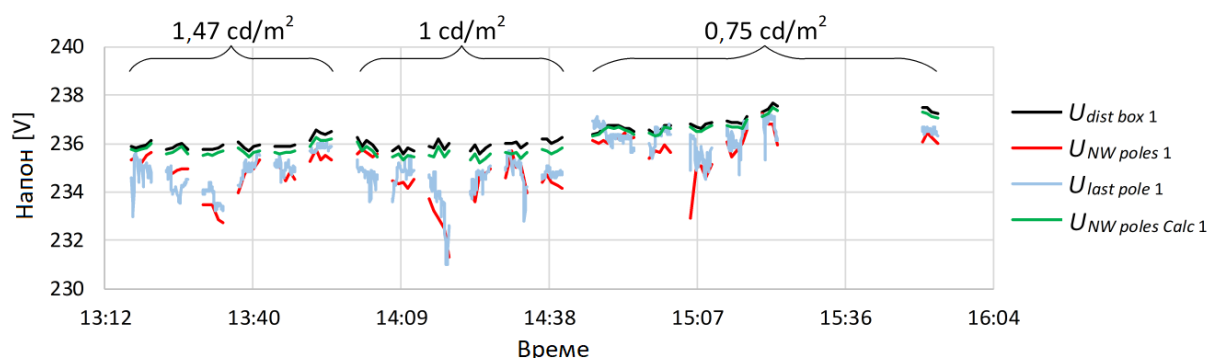
Анализа резултата мерења представљена у поглављу 4.4.2 представља добар увод за дефинисање улазних података развијеног модела и његову оцену. На основу података представљених у поглављу 4.4.2, усваја се следеће:

1. Напон у тачки прикључка на мрежу (разводни орман) постављен је да буде једнак напону добијеном од континуираног мерења које је извршио мрежни анализатор смештен у разводном орману. Ова мерења се врше кроз цео експеримент који се користи за проверу тачности развијеног софтвера. На овај начин тестирање модела је практично извршено за део разматране електричне инсталације од разводног ормана до сваке светилке повезане на напојни кабл.
2. Ефективне вредности струја струјних генератора који представљају LED светилке неутралне беле и топло-беле боје једнаке су њиховим вредностима датим на слици 8.

Фазни углови струјних генератора у односу на основни хармоник напона напајања $\Psi_{meas,h}$ такође се одређују из измерених вредности и одржавају константним. Треба напоменути да је исти принцип усредњавања примењен и на ефективне вредности (погледати објашњење слике 8). Фазни углови ових генератора су различити на различитим стубовима. Сваки од њих је једнак збиру $\Psi_{meas,h}$ и производа хармонијског реда и разлике ($\theta_{Pole\ i,1}$) између фазног угла фундаменталног напона одређеног прорачуном основних хармоника и фазног угла фундаменталног напона измереног у експерименту изведеном у циљу одређивања $\Psi_{meas,h}$.

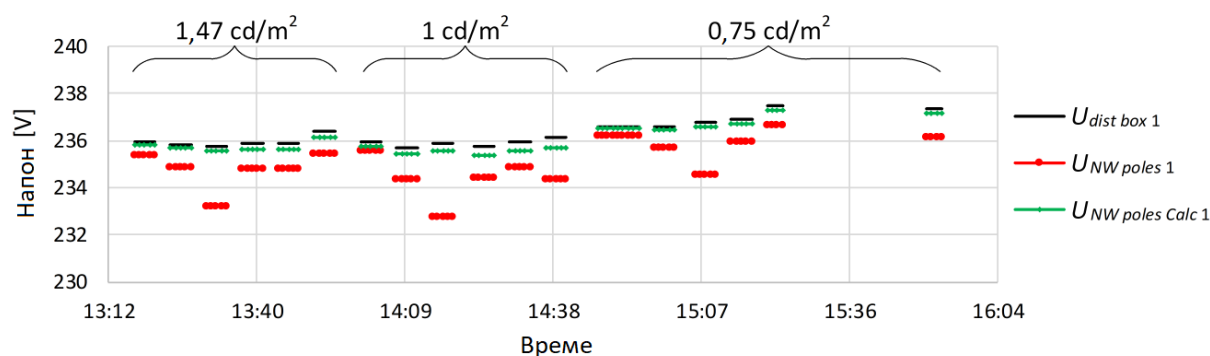
3. За потребе провере тачности развијеног софтвера, одлучено је да се упореди фундаментални са хармоницима реда 3, 5, 7 и 11 који су значајно присутни у спектру напона (видети табелу 29).

На слици 9 су приказане измерене (помоћу AR5L мрежног анализатора) и израчунате вредности основног хармоника напона за експеримент са LED светиљкама неутралне беле боје. Уз то, потврђене су поузданост и тачност AR5L мрежног анализатора, који је коришћен за мерења на стубовима дуж обе деонице улице. Посматрањем упоредивих вредности које се односе на последњи стуб (последња група вредности за сваки од режима (1,47 cd/m², 1 cd/m² и 0,75 cd/m²)), може се закључити да постоји сагласност резултата мерења добијених помоћу AR5L и Fluke мрежних анализатора. Исто је потврђено и на деоници улице са LED светиљкама топло-беле боје.

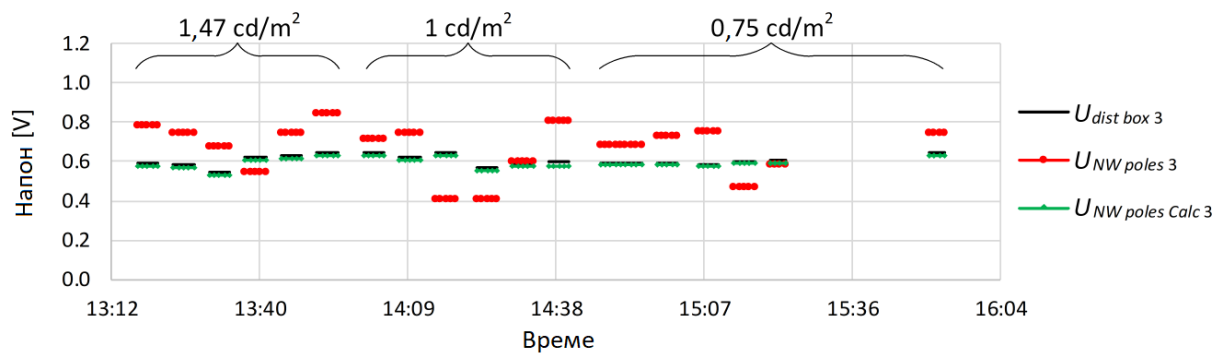


Слика 9. Измерене и израчунате вредности основног хармоника напона за LED светиљке неутралне беле боје (у волтима)

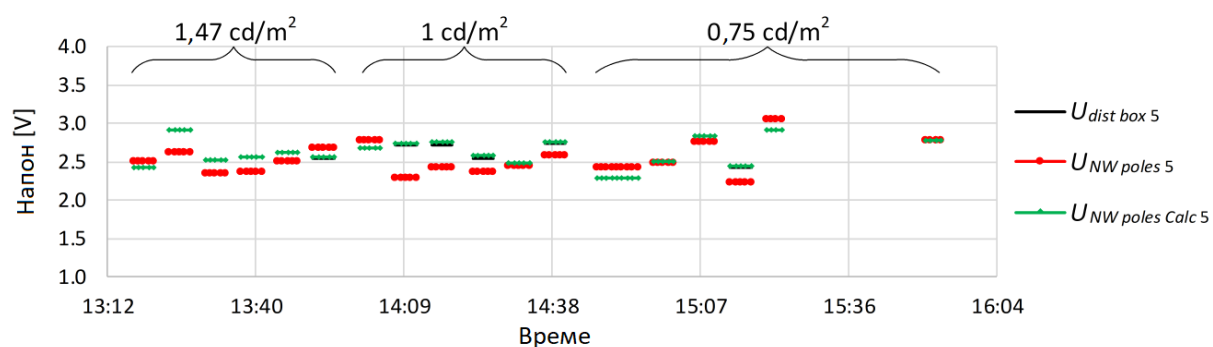
Детаљни резултати који се односе на деоницу улице са LED светиљкама неутралне беле боје, приказани на слици 10, односе се на средње вредности основног и виших хармоника напона током периода мерења.



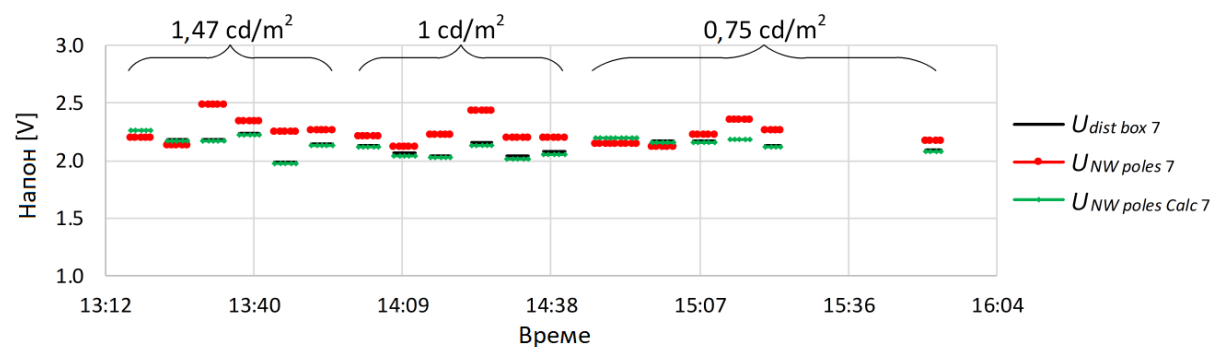
(a)



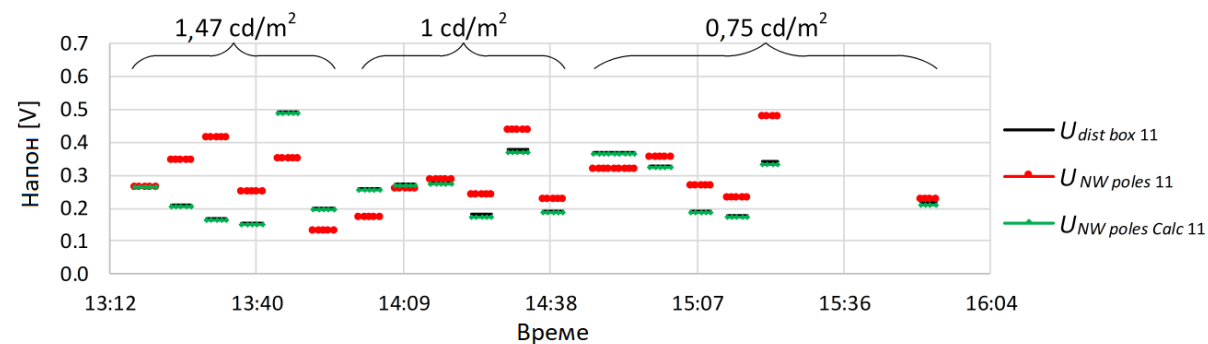
(б)



(в)



(г)



(д)

Слика 10. Поређење средњих основних ($h = 1$) и виших хармонијских напона ($h = 3, 5, 7, 11$) за LED светилке неутралне беле боје (у волтима)

Легенда важи за слике 9 и 10 (број у индексу означава основни хармоник (1) или ред вишег хармоника):

$U_{dist\ box}$ – напон измерен у разводном орману (помоћу инструмент MYеBOX 1500).

$U_{NW\ poles}$ – напони измерени на свим стубовима на разматраној деоници улице (инструментом AR5L).

$U_{last\ pole}$ – напон измерен на последњем стубу (помоћу FLUKE инструмента).

$U_{NW\ poles\ Calc}$ – напон израчунат на стубовима.

Систематско одступање између израчунатих и измерених вредности основних и разматраних виших напонских хармоника дуж стубова није примећено ни у експерименту са LED светилкама неутралне беле боје (слика 10) ни у експерименту са LED светилкама топло-беле боје. Очигледно је да постоји мерни шум у резултатима добијеним мрежним анализатором коришћеним за мерења која се врше на различитим стубовима. Ово је било очекивано не само због грешке мерења инструментом, већ и због грешке узроковане обрадом сигнала, посебно при одређивању малих компоненти виших хармоника. У неким случајевима било је грешака с једне стране (на пример, одређени измерени хармоници су увек били већи од израчунатих, као што је то био случај за трећи хармоник код LED светилки топло-беле боје), али никада се није догодило да грешка за било који од разматраних појединачних хармоника буде на истој страни за LED светилке како неутралне беле, тако и за светилке топло-беле боје светлости. Постојала је само систематична грешка за основни хармоник напона, али је она била мања од $100 \times 4,5/235,5 = 1,91\%$ (ова максимална разлика појавила се за LED светилке топло-беле боје у 11:38). Вредности претходно разматраног мерног шума представљене су у табели 29.

Табела 29. Вредности стандардне девијације за разматране режиме осветљења (израчунате за све стубове, у % у односу на измерену вредност, за основне и хармонике реда 3, 5, 7 и 11)

Хармоник	Фундаментални	3	5	7	11
Неутрална бела боја, 1,47 cd/m ²	0,62	29,57	10,67	7,80	25,12
Топло-бела боја, 1,49 cd/m ²	0,93	34,41	11,95	4,70	50,60
Неутрална бела боја, 1 cd/m ²	0,51	21,65	7,41	7,95	42,36
Топло-бела боја, 1 cd/m ²	1,11	46,40	9,52	5,59	34,93
Неутрална бела боја, 0,75 cd/m ²	0,46	18,30	5,00	4,53	21,93
Топло-бела боја, 0,75 cd/m ²	1,02	60,00	20,74	4,14	42,32

Као што је и очекивано, израчунати напони на стубовима су приближни напону измереном у разводном орману (видети слику 10), због малог броја и мале снаге LED светилки, као и због ниске импедансе алуминијумског напојног кабла 35 mm² (разлике су веће за LED светилке топло-беле боје, што је последица много већег растојања између разводног ормана и првог стуба са светилком топло-беле боје). Стога, ове мале разлике, мерни шум и грешка обраде сигнала узрокују високе стандардне девијације (видети табелу 29). Очигледно, експериментални услови нису били довољно одговарајући да понуде квантитативну оцену модела. Према томе, проверу модела би требало радије окарактерисати као квалитативну него квантитативну. Ипак, из провера извршених на 6 LED светилки неутралне беле боје повезаних на фазу А и 5 LED светилки топло-беле боје прикључених на фазу В, које раде у асиметричном

режиму, може се закључити да се модел може сматрати обећавајућим за анализу виших хармоника у инсталацијама осветљења улица/путева које раде у асиметричним режимима, а прикључене су на трофазни систем (случајеви представљени на слици 2). Резултати такве примене приказани су у следећем поглављу.

4.5 Анализа квалитета електричне енергије у инсталацији уличног осветљења са великим бројем LED светиљки

Као у прорачунима објашњеним у поглављу 4.4, спроведеним да би се проверила тачност модела, подаци дати на слици 8 коришћени су као улазни за струјне хармонике (струјни извори који представљају нелинеарна оптерећења LED светиљки). Напони еквивалентних Тевененових генератора су фиксирани на напоне измерене у разводном орману када су светиљке биле угашене (слика 11). Импеданса еквивалентних Тевененових генератора узета је као импеданса кратког споја трансформатора напајања снаге 400 kVA (за основни хармоник она износи $\underline{Z}_t = (3,677 + j25,739) \text{ m}\Omega$).



Слика 11. Напони еквивалентних Тевененових генератора, изражени у % основног хармоника напона

За потребе ове анализе, изабрана су четири примера типичних улица (путева): један светлотехничке класе М3 и један светлотехничке класе М5 [12] (они представљају градске улице са већом и мањом густином саобраћаја, респективно), које карактерише једностранни распоред стубова и две саобраћајне траке, као и један светлотехничке класе М1 и један светлотехничке класе М2 [12] (они представљају аутопут и главну градску улицу, респективно), које карактерише централни распоред стубова и три саобраћајне траке. Фотометријски прорачуни, потребни за одређивање типа светиљке и угла нагиба, висине стубова и растојања између њих, итд., изведени су коришћењем професионалног софтвера Ulysse [36] (развијен од стране Schröder Group), који је у складу са релевантним CIE документом [12]. Пошто су Voltana 3 светиљке (коришћене у анализи квалитета електричне енергије представљеној у поглављу 4.4) биле неадекватне за централни распоред стубова због њихове мале снаге (измерене вредности су износиле 85 W (неутралне беле) и 80 W (топло-беле)), у овој анализи коришћене су светиљке Voltana 5 (212 W), које поседују исти тип драјвера са могућношћу димовања као и Voltana 3 (сваки од улазних података за светиљке који су представљени у поглављу 4.4 помножени су са односом одговарајућих снага светиљки – 212/85 и 212/80, респективно). Улазни подаци примењени у фотометријским прорачунима су следећи:

- висина стуба: 7–8 m (светлотехничке класе улице М3 и М5), 8–10 m (М2) и 12–13 m (М1) – корак је био 1 m,
- стандардна рефлексiona класа површине коловоза: R3 ($Q_0 = 0,07 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$),
- ширина саобраћајне траке: 3,5 m за улице светлотехничке класе М1, М2 и М3 и 3 m за улице светлотехничке класе М5,

- ширина централног појаса (за централни распоред стубова): 3 m,
- удаљеност стуба од ближе ивице коловоза улице: 1 m за једнострану и 1,5 m за централни распоред стубова,
- угао нагиба светилке: 0° – 10° (корак = 5°),
- превес: $L_b + L_{lum}/2 - 1$ (m) за једнострану и $L_b + L_{lum}/2 - 1,5$ (m) за централни распоред стубова, где су L_b дужина лире (до 2 m, корак = 0,5 m) и L_{lum} дужина светилке (0,655 m за светилку Voltana 3 и 0,705 m за светилку Voltana 5), и
- фактор одржавања светилке: 0,76 (фактор опадања светлосног флукса: 0,9 и фактор запрљања светилке: 0,85).

У обзир су узета само светлотехничка решења која испуњавају следеће услове:

- ниво сјајности улице (пута) (L_{av}) одступа мање од 5% од препоручене вредности,
- равномерности сјајности (општа и подужна) прелазе 97% од препоручене вредности,
- релативни пораст прага (који указује на степен ограничења физиолошког бљештања) је мањи од препоручених граница, и
- коефицијент окружења је већи од препоручене вредности.

За сваки од разматраних случајева изабрано је светлотехничко решење са максималним односом растојања између стубова и висине стубова (s/H). Израчунати нивои сјајности (cd/m^2), висине стубова (m) и растојања између стубова (m) приказани су у табели 30.

Табела 30. Главни резултати фотометријских прорачуна за све разматране случајеве

	Једнострану распоред						Централни распоред					
	МЗ			М5			М1			М2		
	L_{av}	H	s	L_{av}	H	s	L_{av}	H	s	L_{av}	H	s
Неутрална бела боја	0,96	8	32	0,49	8	52	1,92	12	31	1,45	10	41
Топло-бела боја	0,96	8	29	0,49	8	51	1,97	12	28	1,43	9	38

Затим су растојање између стубова и њихова висина искоришћени за израчунавање следећих дужина каблова:

- између разводног ормана и првог стуба (рачунато као два пута растојање између стубова плус 2 m),
- између свака два суседна стуба (рачунато као растојање између стубова плус 2 m), и
- између прикључака LED драјвера светилке и напојног кабла (рачунато као висина стуба плус дужина лире плус 1 m).

Користећи ове податке као улазне у развијеном софтверу, број светилки у разматраној инсталацији осветљења улице (пута) је вариран (повећаван) до максималне (дозвољене) вредности достигнуте за сваки од следећа 3 утицајна параметра: пад напона (8%, као препоручена граница када се користе LED светилке [37]), THD_u (према EN 50160 [35]) и проценат појединачних хармоника напона (према EN 50160). Резултати су приказани у табелама 31–33. Табела 33 такође садржи ред критичног хармоника напона, који је дат у заградама. Све основне и више хармонијске вредности односе се на прикључке LED светилке (погледати напомену 2 на крају поглавља 4.3).

Табела 31. Максимални дозвољени број светиљки према дозвољеном паду напона

	Једнострани распоред стубова						Централни распоред стубова					
	М3			М5			М1			М2		
	Режим			Режим			Режим			Режим		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Неутрална бела боја	103	135	168	81	107	132	46	61	75	40	53	66
Топло-бела боја	111	149	186	84	113	142	48	65	82	41	56	70

Табела 32. Максимални дозвољени број светиљки према дозвољеном THD_u

	Једнострани распоред стубова						Централни распоред стубова					
	М3			М5			М1			М2		
	Режим			Режим			Режим			Режим		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Неутрална бела боја	118	122	143	93	96	113	52	54	63	45	47	55
Топло-бела боја	131	142	170	100	108	130	55	60	72	48	52	62

Табела 33. Максимални дозвољени број светиљки према дозвољеним процентуалним вредностима појединачних хармоника напона

	Једнострани распоред стубова						Централни распоред стубова					
	М3			М5			М1			М2		
	Режим			Режим			Режим			Режим		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Неутрална бела боја	101 (3)	106 (21)	125 (21)	80 (3)	84 (21)	99 (21)	45 (3)	46 (21)	55 (21)	39 (3)	40 (21)	48 (21)
Топло-бела боја	92 (15)	88 (15)	80 (15)	70 (15)	67 (15)	61 (15)	39 (15)	37 (15)	33 (15)	33 (15)	32 (15)	29 (15)

Треба напоменути да су падови напона израчунати у односу на основни хармоник, што је у складу са инжењерском праксом.

У погледу падова напона из табеле 31 може се видети да се за сваку од разматраних светлотехничких класа и за светиљке неутралне беле и топло-беле боје број светиљки повећава при смањивању нивоа сјајности, што је у складу са мањом снагом у режимима 2 и 3. Такође се може закључити да у свим разматраним режимима инсталација осветљења са светиљкама топло-беле боје (које садрже LED драјвере са побољшаним карактеристикама у условима димовања) омогућава већи број светиљки од инсталације осветљења са светиљкама неутралне беле боје (које садрже конвенционалне LED драјвере).

Исти закључак се такође може извести из табеле 32 у погледу THD_u : за сваку од разматраних светлотехничких класа и за светиљке неутралне беле и топло-беле боје број светиљки се повећава када се смањи ниво сјајности, што је последица мањих снага у режимима 2 и 3. Мање струје него у нормалном режиму (због димовања) изазвале су мање ефективне вредности хармоника у амперима, иако већи проценат струјних хармоника одговара режимима 2 и 3.

Из истог разлога (због мање снаге светиљки у режимима 2 и 3), у погледу процента појединачних хармоника датих у табели 33 у сваком од разматраних случајева са LED светиљкама неутралне беле боје број светиљки се повећава при повећању редног броја режима (од 1 до 3). Изненађујуће, за LED светиљке топло-беле боје се са повећањем броја режима

повећава 15. хармоник у амперима. Такође, 15. хармоник је већи у случају светилки топло-беле боје него у случају светилки неутралне беле боје.

Максимални дозвољени број светилки у инсталацији осветљења улице (пута) узимајући у обзир сваку од дозвољених вредности за пад напона, THD_u и проценат појединачних хармоника напона једнак је најмањем од одговарајућих бројева датих у табелама 31–33. Ове вредности су дате у табели 34.

Табела 34. Максимални дозвољени број светилки у разматраним инсталацијама осветљења улица (путева)

	Једнострани распоред стубова		Централни распоред стубова	
	M3	M5	M1	M2
Неутрална бела боја	101	80	45	39
Топло-бела боја	80	61	33	29

Табела 32 показује да су LED светилке топло-беле боје (које садрже драјвер са побољшаним карактеристикама у условима димовања) повољније од светилки неутралне беле боје (са конвенционалним драјвером) узимајући у обзир THD_u вредности. Ипак, због релативно високог 15. хармоника струје LED светилке топло-беле боје, може се повезати мањи број светилки овог типа (као што је приказано у табели 34).

4.6 Пад напона као утицајни фактор у инсталацијама осветљења

Циљ истраживања је било поређење инсталација осветљења улица/путева реализованих помоћу натријумових и LED извора светлости неутралне беле боје у погледу пада напона. Основни улазни подаци спроведене анализе били су:

- растојање између суседних стубова,
- снага и фактор снаге светилке са предспојним уређајем (баластом у случају светилке са натријумовим извором светлости, односно драјвером у случају LED светилке), и
- тип и пресек кабла за напајање инсталације осветљења.

Поређење предметних инсталација осветљења реализованих помоћу натријумових и LED извора светлости извршено је уз претпоставку о примени трофазних струјних кола осветљења, каква се стандардно примењују широм света. Од свих случајева осветљења улица/путева за које су већ урађени фотометријски прорачуни (представљени у Прилогу 1) изабрано је 6 типичних случајева са фотометријски упоредивим светлотехничким решењима са натријумовим и LED светилкама (по два случаја за централни, двострани наспрамни и једнострани распоред стубова, којима одговарају светлотехничке класе улице/пута M1, M2 и M3, и који су представљени у табелама 35 и 36). Треба напоменути да се, у погледу израчунавања пада напона, двострани наспрамни распоред стубова може свести на 2 једнострани распореда (по један на свакој страни улице/пута), за које се примењују одвојена струјна кола.

Табела 35. Основни подаци о светлотехничким решењима разматраних улица/путева реализованим помоћу светиљки са натријумовим светиљкама

Распоред	Светло-техничка класа	Критеријум	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lamp} (W)	kW/km
Централни 3 траке (аутопут)	M1	s_{max}/P_{min}	42	13	0,87	0	1,91	41	68	9,5	0,56	250	11,9
Двострани наспрамни 4 траке	M1	s_{max}	28	8	0,37	5	2,46	61	68	9,9	0,52	150	10,7
Централни 3 траке (градске улице)	M2	s_{max}/P_{min}	31	10	0,87	10	1,43	40	74	9,9	0,47	150	9,7
Двострани наспрамни 3 траке	M2	s_{max}	29	8	-0,63	10	1,79	68	68	10,0	0,51	100	6,9
Једнострани 2 траке	M3	s_{max}	37	8	0,87	10	1,25	55	60	14,1	0,62	150	4,1
	M3	P_{min}	36	8	1,37	10	1,08	46	60	14,6	0,42	100	2,8

Табела 36. Основни подаци о светлотехничким решењима разматраних улица/путева реализованим помоћу LED светиљки

Распоред	Светло-техничка класа	Критеријум	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lamp} (W)	kW/km
Централни 3 траке (аутопут)	M1	s_{max}/P_{min}	40	13	0,45	0	1,93	39	80	9,2	0,47	165	8,3
Двострани наспрамни 4 траке	M1	s_{max}	32	8	-0,66	0	2,33	60	69	9,8	0,70	136	8,5
Централни 3 траке (градске улице)	M2	s_{max}	36	10	-0,66	10	1,43	40	70	10,0	0,45	136	7,6
Двострани наспрамни 3 траке	M2	s_{max}	30	8	-0,66	0	1,55	65	73	9,9	0,52	70	4,7
Једнострани 2 траке	M3	s_{max}	43	8	0,34	0	1,08	53	59	14,6	0,60	103	2,4
	M3	P_{min}	36	8	1,29	0	0,98	45	77	12,3	0,30	53	1,5

Анализа је обухватила инсталације осветљења на деоницама дужине 1000 m, реализоване помоћу конвенционалних светиљки (типа Опух 2) са натријумовим изворима високог притиска, снаге 100 W, 150 W и 250 W, односно помоћу LED светиљки (типа Ampera), снаге 53 W, 70 W, 103 W, 136 W и 165 W. За прорачун падова напона претпостављена је употреба каблова са алуминијумским проводницима пресека 10 mm², 16 mm² или 25 mm², као и следеће вредности фактора снаге: $\cos \varphi = 0,85$ за конвенционалне светиљке са електромагнетским баластима [38], односно $\cos \varphi = 0,95$ за LED светиљке са драјвером [39].

Фотометријски прорачуни су за потребе даље анализе обезбедили само један излазни податак – растојање између суседних стубова.

Коришћењем формула представљених у референци [40], за сваку од 6 изабраних саобраћајница извршени су прорачуни пада напона, с циљем да се на деоници од 1000 m за сваки пресек кабла одреди максималан дозвољени број стубова, n_{max} , за који пад напона није већи од максималног дозвољеног пада напона, ΔU_{max} .

Према подацима Philips Lighting-а [41], максимална дозвољена вредност пада напона за светиљке са натријумовим изворима високог притиска износи 8%. Према референци [42], иста

вредност се препоручује и за LED светиљке. Пошто се у пракси за пад напона од трансформаторске станице до разводног ормана и од плочице у стубу до светиљке оставља 3%, Δu_{max} износи 5%.

У табели 37 дате су вредности подужних активних и индуктивних отпорности разматраних алуминијумских каблова.

Табела 37. Подужне активне и индуктивне отпорности разматраних алуминијумских каблова

	10 mm ²	16 mm ²	25 mm ²
r_{Al} (Ω /km)	3,00	1,89	1,20
x_{3f} (Ω /km)	0,094	0,090	0,086

Пошто је за прорачун пада напона неопходан податак о укупној снази светиљке, за натријумове светиљке је усвојено да је она 15% већа од снаге извора светлости, док наведена снага сваке LED светиљке укључује и снагу одговарајућег драјвера.

Број стубова на деоници од 1000 m (n), максимално дозвољени бројеви стубова (n_{max}) и одговарајући падови напона (Δu) за све разматране случајеве (за трофазни систем напајања) дати су у табелама 38 и 39.

Табела 38. Максимално дозвољени бројеви стубова и одговарајући падови напона за инсталацију осветљења са натријумовим светиљкама

Тип светиљке	Распоред стубова	Растојање између суседних стубова (m)	n	Број стубова (n_{max}) и пад напона (Δu)					
				Al (mm ²)					
				10		16		25	
				n_{max}	Δu (%)	n_{max}	Δu (%)	n_{max}	Δu (%)
Onyx 2 250 W	централни	42	24	12	4,68	16	4,97	20	4,82
Onyx 2 150 W	двострани	28	36	28	4,91	36	4,91	36	3,16
Onyx 2 150 W	централни	31	33	19	4,80	24	4,69	31	4,88
Onyx 2 100 W	двострани	29	35	34	4,80	35	3,22	35	2,07
Onyx 2 150 W	једностранни	37	28	24	4,82	28	4,05	28	2,61
Onyx 2 100 W	једностранни	36	28	28	4,14	28	2,63	28	1,69

Табела 39. Максимално дозвољени бројеви стубова и одговарајући падови напона за инсталацију осветљења са LED светиљкама

Тип светиљке	Распоред стубова	Растојање између суседних стубова (m)	n	Број стубова (n_{max}) и пад напона (Δu)					
				Al (mm ²)					
				10		16		10	
				n_{max}	Δu (%)	n_{max}	Δu (%)	n_{max}	Δu (%)
LED Ampere 80	централни	40	26	17	4,71	22	4,75	26	4,16
LED Ampere 64	двострани	32	32	30	4,84	32	3,46	32	2,21
LED Ampere 64	централни	36	28	20	4,72	26	4,85	28	3,55
LED Ampere 32	двострани	30	34	34	2,96	34	1,87	34	1,20
LED Ampere 48	једностранни	43	24	24	3,24	24	2,05	24	1,31
LED Ampere 24	једностранни	36	28	28	1,87	28	1,18	28	0,76

Напомена: у случајевима када је пад напона на целој деоници од 1000 m био мањи од Δu_{max} , узето је да је $n_{max} = n$.

Поређењем максимално дозвољених бројева стубова у разматраним случајевима представљеним у табелама 38 и 39, може се закључити да је инсталацију са LED светиљкама карактерисао или већи максимално дозвољени број стубова или приметно нижи пад напона (у односу на инсталацију са натријумовим светиљкама) у сваком од разматраних случајева пресека кабла за исту дужину деонице од 1000 m.

4.7 Ефикасност TN система заштите у случају квара као утицајни фактор у инсталацијама осветљења

На основу броја стубова (n) на деоници дужине 1000 m одређује се максимална вредност фазне струје (I_f) на тој деоници (на излазу из разводног ормана), која се одређује помоћу следеће формуле:

$$I_f = \frac{n \cdot P}{3 \cdot U_f \cdot \cos \varphi} \quad (26)$$

где је n број стубова, P укупна снага светиљке (две светиљке на истом стубу код централног распореда), а $\cos \varphi$ фактор снаге светиљке.

На основу максималне вредности фазне струје одређује се назначена струја улошка осигурача (I_{os}), која се пореди са максимално дозвољеним струјним оптерећењем кабла (I_{td}), одређеним уз уважавање услова заједничког вођења каблова и температуре тла, након чега се одређује импеданса петље квара и проверава да ли инсталација задовољава услове TN система заштите.

Импеданса петље квара је одређена формулом [40]:

$$\underline{Z}_k = \underline{Z}_{ID} + \underline{Z}_{NK} + \underline{Z}_T + \underline{Z}_M, \quad (27)$$

у којој су:

$\underline{Z}_{ID}$ – импеданса изводне (кабловске) деонице од РО до места квара (критичан је квар на најудаљенијој светиљци),

$\underline{Z}_{NK}$ – импеданса напојног кабла од ТС до РО,

$\underline{Z}_T$ – импеданса енергетског трансформатора, и

$\underline{Z}_M$ – импеданса електроенергетске мреже.

Уз претпоставку да је растојање од РО до најближег стуба једнако растојању између суседних стубова, импеданса изводне деонице се одређује помоћу формуле [40]:

$$\underline{Z}_{ID} = 2 \cdot k \cdot L \cdot (r_{ID} + jx_{ID}) \quad (28)$$

(k је редни број стуба на коме се десио квар, L је растојање између суседних стубова увећано за 2 m, а r_{ID} и x_{ID} су подужна активна и индуктивна отпорност изводне деонице).

Импеданса напојног кабла РО одређује се коришћењем формуле [40]:

$$\underline{Z}_{NK} = 2 \cdot D \cdot (r_{NK} + jx_{NK}) \quad (29)$$

(D је дужина напојног вода, а r_{NK} и x_{NK} су подужна активна и индуктивна отпорност напојног кабла РО).

За одређивање импедансе напојног кабла бира се најмањи пресек напојног кабла који је уобичајено заступљен у инсталацијама јавног осветљења. Сви већи пресеци кабла су мање критични са становишта ефикасности TN система заштите, јер имају мање импедансе. Кабл најмањег пресека који се користи за ову намену је кабл типа PP00-AY 4 x 50 mm², чије су подужне отпорности $r_{NK} = 0,628 \Omega/\text{km}$ и $x_{NK} = 0,083 \Omega/\text{km}$.

Дужина кабла између ТС и РО обично није већа од $D = 300 \text{ m}$, па ће се прорачуни вршити са овом вредношћу као критичном.

Укупна импеданса од ТС до места квара дата је формулом [40]:

$$Z_l = \sqrt{(R_{ID} + R_{NK})^2 + (X_{ID} + X_{NK})^2} \quad (30)$$

Приликом израчунавања импедансе петље квара треба узети у обзир и:

- импедансу електроенергетске мреже од места производње електричне енергије до трансформације СН/НН ($Z_M < 0,001 \Omega$), и
- импедансу енергетског трансформатора (она је највећа (критична) за трансформатор снаге 250 kVA (најмања снага трансформатора који се уобичајено користе за потребе јавног осветљења), за коју је $Z_T = 0,024 \Omega$).

Иако су у питању комплексне величине, код којих вредност импедансе зависи и од активне и од реактивне (индуктивне) компоненте, због веома мале вредности збира импеданси $Z_T + Z_M (\leq 0,025 \Omega)$, укупна импеданса петље квара (Z_k) може да се израчуна као прост збир $Z_l + Z_T + Z_M = Z_l + 0,025 (\Omega)$ [40].

На основу вредности импедансе петље квара израчунава се струја која се успоставља у петљи квара (са U_f је означен фазни напон) [40]:

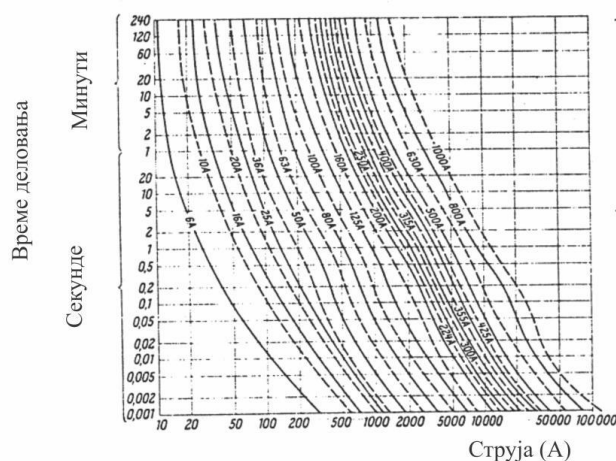
$$I_k = \frac{U_f}{Z_k}. \quad (31)$$

Сматра се да је у TN систему заштита од једнополног кратког споја ефикасна уколико се квар елиминише у оквиру временског интервала прописаног одговарајућим стандардом [42].

Време искључења до 5 s дозвољава се за напојне водове, у које спадају и струјна кола јавног осветљења. За проводник мањег пресека који повезује плочу са осигурачем у стубу (6 A) и светиљку максимално дозвољено време искључења износи 0,4 s [42].

Како је назначена струја уметка осигурача у стубу најмање 2 степена нижа од назначене струје уметака високоуичинских осигурача или аутоматских прекидача који штите изводну деоницу, може да се закључи да ће уметак осигурача мање назначене струје који се налази у стубу и штити инсталацију светиљке сигурно задовољити у погледу ефикасности заштите уколико задовољи заштитна компонента инсталирана у разводном орману. Заправо, струја у петљи квара не разликује се много уколико се, уместо испред прикључне плоче у стубу, квар деси после прикључне плоче на каблу мањег пресека. Пошто је осигурач у стубу мање назначене струје, он ће много брже реаговати него заштитна компонента значајно веће назначене струје за исту (сличну) струју кратког споја.

На основу вредности претходно одређене номиналне струје осигурача I_{os} , са дијаграма на слици 12 за максимално дозвољено време реаговања (искључења) осигурача од 5 s може да се одреди струја I_a , која представља најмању струју која обезбеђује да се изводна деоница у којој је настао квар искључи унутар 5 s.



Слика 12. Криве струјног оптерећења топливих уметака високоуичинских осигурача (осигурача типа NV)

На апсциси дијаграма са слике 12 могу се очитати вредности струја I_a за очекиване назначене струје уметака NV осигурача од 10 – 25 A.

На крају се проверава да ли је испуњен услов:

$$I_k \geq I_a. \quad (32)$$

Уколико је он испуњен, заштита је ефикасна.

Ефикасност заштите се испитује за сваку од 6 изабраних саобраћајница, као и за све разматране пресеке каблова.

Резултати прорачуна су дати у табелама 40–45. Оне садрже број стубова на деоници од 1000 m (n), максималну фазну струју (I_f), процентуални однос максималне фазне и трајно дозвољене струје кабла (I_f/I_{td}), назначену струју осигурача (I_{os}), струју квара (I_k), минималну струју реаговања (I_a) за осигураче типа NV и максималан број стубова (n_{max}) на деоници од 1000 m за који је TN систем заштите ефикасан.

Табела 40. Максимално дозвољени број стубова (n_{max}) за ефикасну TN заштиту инсталације осветљења са натријумовим светиљкама напајану алуминијумским каблом пресека 10 mm²

Тип светиљке	P (W)	Распоред	s (m)	n	I_f (A)	I_f/I_{td} (%)	I_{os} (A)	I_k (A)	I_a (A)	n_{max}
HPS Опух 2	250	централни	42	24	23,53	58,82	25	34,11	100	15
HPS Опух 2	150	двострани	28	36	5,29	13,24	10	33,40	40	29
HPS Опух 2	150	централни	31	33	19,41	48,53	20	33,14	75	21
HPS Опух 2	100	двострани	29	35	3,43	8,58	10	33,25	40	28
HPS Опух 2	150	једностранни	37	28	8,24	20,59	10	33,05	40	22
HPS Опух 2	100	једностранни	36	28	5,49	13,73	10	33,87	40	23

Табела 41. Максимално дозвољени број стубова (n_{max}) за ефикасну TN заштиту инсталације осветљења са натријумовим светиљкама напајану алуминијумским каблом пресека 16 mm²

Тип светиљке	P (W)	Распоред	s (m)	n	I_f (A)	I_f/I_{td} (%)	I_{os} (A)	I_k (A)	I_a (A)	n_{max}
HPS Опух 2	250	централни	42	24	23,53	45,25	25	52,27	100	16
HPS Опух 2	150	двострани	28	36	5,29	10,18	10	51,21	40	36
HPS Опух 2	150	централни	31	33	19,41	37,33	20	50,83	75	27
HPS Опух 2	100	двострани	29	35	3,43	6,60	10	51,00	40	35
HPS Опух 2	150	једностранни	37	28	8,24	15,84	10	50,70	40	28
HPS Опух 2	100	једностранни	36	28	5,49	10,56	10	51,91	40	28

Табела 42. Максимално дозвољени број стубова (n_{max}) за ефикасну TN заштиту инсталације осветљења са натријумовим светиљкама напајану алуминијумским каблом пресека 25 mm²

Тип светиљке	P (W)	Распоред	s (m)	n	I_f (A)	I_f/I_{td} (%)	I_{os} (A)	I_k (A)	I_a (A)	n_{max}
HPS Опух 2	250	централни	42	24	23,53	35,65	25	78,09	100	20
HPS Опух 2	150	двострани	28	36	5,29	8,02	10	76,59	40	36
HPS Опух 2	150	централни	31	33	19,41	29,41	20	76,04	75	33
HPS Опух 2	100	двострани	29	35	3,43	5,20	10	76,28	40	35
HPS Опух 2	150	једностранни	37	28	8,24	12,48	10	75,86	40	28
HPS Опух 2	100	једностранни	36	28	5,49	8,32	10	77,58	40	28

Табела 43. Максимално дозвољени број стубова (n_{max}) за ефикасну TN заштиту инсталације осветљења са LED светилкама напајану алуминијумским каблом пресека 10 mm²

Тип светилке	P (W)	Распоред	s (m)	n	I_f (A)	I_f/I_{td} (%)	I_{os} (A)	I_k (A)	I_a (A)	n_{max}
Ampera 80	165	централни	40	26	16,82	42,06	20	33,05	75	16
Ampera 64	136	двострани	32	32	4,27	10,67	10	33,17	40	26
Ampera 64	136	централни	36	28	14,93	37,33	16	33,87	50	18
Ampera 32	70	двострани	30	34	2,33	5,83	10	33,17	40	27
Ampera 48	103	једнострани	43	24	4,85	12,12	10	33,40	40	19
Ampera 24	53	једнострани	36	28	2,91	7,27	10	33,87	40	23

Табела 44. Максимално дозвољени број стубова (n_{max}) за ефикасну TN заштиту инсталације осветљења са LED светилкама напајану алуминијумским каблом пресека 16 mm²

Тип светилке	P (W)	Распоред	s (m)	n	I_f (A)	I_f/I_{td} (%)	I_{os} (A)	I_k (A)	I_a (A)	n_{max}
Ampera 80	165	централни	40	26	16,82	32,35	20	50,70	75	24
Ampera 64	136	двострани	32	32	4,27	8,21	10	50,87	40	32
Ampera 64	136	централни	36	28	14,93	28,72	16	51,91	50	28
Ampera 32	70	двострани	30	34	2,33	4,49	10	50,87	40	34
Ampera 48	103	једнострани	43	24	4,85	9,32	10	51,21	40	24
Ampera 24	53	једнострани	36	28	2,91	5,60	10	51,91	40	28

Табела 45. Максимално дозвољени број стубова (n_{max}) за ефикасну TN заштиту инсталације осветљења са LED светилкама напајану алуминијумским каблом пресека 25 mm²

Тип светилке	P (W)	Распоред	s (m)	n	I_f (A)	I_f/I_{td} (%)	I_{os} (A)	I_k (A)	I_a (A)	n_{max}
Ampera 80	165	централни	40	26	16,82	25,49	20	75,86	75	26
Ampera 64	136	двострани	32	32	4,27	6,46	10	76,10	40	32
Ampera 64	136	централни	36	28	14,93	22,63	16	77,58	50	28
Ampera 32	70	двострани	30	34	2,33	3,54	10	76,10	40	34
Ampera 48	103	једнострани	43	24	4,85	7,34	10	76,59	40	24
Ampera 24	53	једнострани	36	28	2,91	4,41	10	77,58	40	28

Напомена: у случајевима када је заштита на целој деоници од 1000 m била ефикасна, усвојено је да је $n_{max} = n$.

Из табела 40–45 може се видети да за скоро половину разматраних случајева (сви случајеви кабла пресека 10 mm², централни распоред у случају натријумових светилки и кабла пресека 16 mm², централни распоред у случају LED светилки снаге 165 W и кабла пресека 16 mm² и централни распоред у случају натријумових извора снаге 250 W и кабла пресека 25 mm²) TN систем не представља ефикасну заштиту ($I_a > I_k$, односно $n_{max} < n$).

Табеле 40–45 такође показују да односи максималне фазне и максималне трајно дозвољене струје кабла (I_f/I_{td}) имају такве вредности да утицај заједничког вођења каблова не доводи до недозвољених термичких оптерећења.

4.8 Уважавање пада напона и ефикасности TN система заштите у случају квара као утицајних фактора

У циљу адекватног поређења максималног броја стубова у инсталацијама уличног осветљења реализованих помоћу натријумових и LED извора, било је потребно уважити и

критеријум пада напона и критеријум TN заштите (уз кориговање дужине деонице, по потреби).

Табеле 46 и 47 садрже максималне вредности новог (коригованог) броја стубова за које су испуњена оба услова.

Табела 46. Кориговани максимално дозвољени број стубова који испуњава оба услова (случај натријумових светиљки)

Тип светиљке	Распоред стубова	Растојање између стубова	n	Коригован максималан број стубова		
				Al (mm ²)		
				10	16	25
				n _{max}		
Onyx 2 250 W	централни	42	24	12	16	20
Onyx 2 150 W	двострани	28	36	28	36	46
Onyx 2 150 W	централни	31	33	19	24	31
Onyx 2 100 W	двострани	29	35	28	44	56
Onyx 2 150 W	једнострани	37	28	22	31	40
Onyx 2 100 W	једнострани	36	28	23	37	50

Табела 47. Кориговани максимално дозвољени број стубова који испуњава оба услова (случај LED светиљки)

Тип светиљке	Распоред стубова	Растојање између стубова	n	Коригован максималан број стубова		
				Al (mm ²)		
				10	16	25
				n _{max}		
Ampera 165 W	централни	40	26	16	22	26
Ampera 136 W	двострани	32	32	26	39	49
Ampera 136 W	централни	36	28	18	26	29
Ampera 70 W	двострани	30	34	27	44	69
Ampera 103 W	једнострани	43	24	19	31	49
Ampera 53 W	једнострани	36	28	23	37	58

Анализом одговарајућих вредности максимално дозвољених бројева стубова у инсталацијама са натријумовим и LED светиљкама, види се да није могуће извести општи закључак који се односи на све случајеве.

У половини (девет од осамнаест) случајева инсталације са LED светиљкама, максимално дозвољени број стубова је већи него у случајевима инсталације са натријумовим светиљкама. И у случајевима код којих је максимално дозвољени број стубова мањи у случају инсталације са LED светиљкама него у случају инсталације са натријумовим светиљкама, реч је о приближно једнаким или нешто дужим деоницама у случају LED инсталације.

Иако је инсталацију са LED светиљкама карактерисао или већи максимално дозвољени број стубова или приметно нижи пад напона у односу на инсталацију са натријумовим светиљкама у сваком од разматраних случајева пресека кабла за исту дужину деонице од 1000 m, након узимања у обзир и другог ограничавајућег услова (ефикасност TN система заштите) може се видети да су највеће разлике у максимално дозвољеном броју стубова у корист инсталације са LED светиљкама постигнуте за алуминијумски кабл пресека 25 mm² (те разлике износе: 6 стубова у случају централног распореда са светиљкама веће снаге (светлотехничка класа улице/пута M1), 3 и 13 стубова у случајевима двостраног наспрамног распореда, а 9 и 8 стубова у случајевима једностраног распореда – видети табеле 46 и 47). Мање разлике у максимално дозвољеном броју стубова у корист инсталације са LED светиљкама постигнуте су за алуминијумски кабл пресека 16 mm² (6 и 2 стуба у случајевима централног распореда, а 3 стуба у случају двостраног наспрамног распореда са светиљкама веће снаге (светлотехничке класе улице/пута M1)). За алуминијумски кабл пресека 10 mm² већи број стубова у случају инсталације са LED светиљкама постигнут је само код централног

распореда са светилкама веће снаге (светлотехничке класе улице/пута M1), док је у свим осталим случајевима (изузев једног) већи број стубова постигнут са натријумовим светилкама.

4.9 Правци даљег истраживања

За развијање модела за одређивање изобличења напона у случају нелинеарног и несиметричног уличног LED осветљења коришћена је претпоставка да сваки од струјних извора који представљају LED светилке (нелинеарно оптерећење) карактерише константна струја (струје су дате на слици 8). Експерименти извршени с циљем утврђивања ових струја нису покривали широк спектар изобличења напона (оно је било ограничено на 1–2,5%). Потребан је шири опсег изобличења напона да би се успоставила зависност између спектра струје и спектра напона напајања. Овакво експериментално истраживање се може спровести у лабораторијским условима, сличним онима приказаним у референци [16].

Не може се понудити једноставан метод за одређивање својстава хармонијске емисије LED светилки у широком опсегу виших хармоника у напону напајања. Потребно је претходно мерење у лабораторијским условима или симулација електричног кола LED светилки које садржи драјвер и диоде. Разлог томе је огромна разлика у струјним хармоницима који се односе на различите типове LED драјвера [16]. Бројни тестови на LED светилкама са различитим типовима драјвера и проучавање њихових својстава емитовања могу довести до класификације LED драјвера у погледу њихових својстава хармонијске емисије и одређивања хармонијске емисије за сваку класу, омогућавајући развој једноставне методе за одређивање својстава хармонијске емисије LED светилки.

Други проблем се односи на карактеристике мреже на месту прикључка, односно на напон и импедансу еквивалентног Тевененовог генератора. Анализа различитих услова у погледу хармонијског загађења у дистрибутивној мрежи напајања довела би до општијих закључака и препорука за максимални дозвољени број LED светилки у осветљењу улица (путева) прикључених на одређене тачке мреже.

Трећа идеја за даље истраживање је извођење тестова на инсталацијама осветљења путева са знатно већим број стубова и са светилкама веће снаге него што је то било у експериментима извршеним у овом истраживању. Овакви тестови би омогућили бољу проверу тачности развијеног модела.

4.10 Закључци

Поређењем одговарајућих вредности THD-а напона сваке од тестираних светилки у свим разматраним режимима није било могуће квантификовати утицај додате отпорности и пригушнице на ред са светилком. Међутим, додавање отпорности и пригушнице на ред тестираним светилкама довело је до малог повећања вредности THD-а струје сваке светилке, због чега је закључено да промена у вредности THD-а напона постоји, али да је врло мала. Смањивањем светлосног флукса LED светилки уочено је опадање активне снаге за приближно исти проценат, као и опадање вредности фактора снаге свих разматраних светилки. Најнижи фактор снаге, који се односи на максимално димовање светилке, констатован је код једне од две тестиране LED светилке, чиме је илустрован утицај употребе драјвера различитих карактеристика. За уочене ниске вредности фактора снаге светилки (испод 0,9), а у циљу његове поправке, односно сузбијања виших хармоника, предложена је употреба пригушнице због капацитивног карактера фактора снаге светилки.

Анализом сценарија јавног осветљења са три режима рада, за четири типичне саобраћајнице одређене су процентуалне разлике утрошене активне и реактивне електричне

енергије на годишњем нивоу у случају инсталирања LED уместо конвенционалних (натријумових и метал-халогених) светиљки. Примена LED светиљки обезбедила је преко 50% уштеда активне електричне енергије у односу на конвенционалне (натријумове или метал-халогене) светиљке на свим разматраним саобраћајницама, осим у случају осветљења аутопута, где је уштеда активне електричне енергије износила 42%.

Главни циљ развијеног модела био је да се установе квантитативни индикатори изобличења напона дуж стубова различитих инсталација LED осветљења улица (путева) у нормалном и режимима редукованог осветљења.

Прво су развијени модел прорачуна и одговарајући софтвер, омогућавајући израчунавање хармонијске дисторзије у инсталацијама осветљења улица (путева) које карактерише једностранни или централни распоред стубова у случају несиметричног и нелинеарног LED оптерећења (модел се може сматрати општим, јер се сви остали стандардни распореди стубова (светиљки) могу третирали као једностранни распоред стубова). Новина модела је у комбиновању две технике које се широко користе у електроенергетици и њихова примена на сваки од хармоника у трофазном систему: (1) трансформација несиметричних трофазних величина у одговарајуће директне, инверзне и нулте симетричне компоненте и обрнута трансформација, и (2) модел импедансе за симетричне системе (примењује се у сваком од d , i , 0 система).

Процедура почиње од једначина у несиметрично оптерећеном трофазном систему и њихове трансформације у директне, инверзне и нулте (d , i , 0) компоненте. Ово је примењено на сваки релевантни појединачни хармоник. Након тога се формира модел импедансе по фази, који се обично користи за проучавање хармонијских проблема у симетричним трофазним системима, и решавају одговарајуће једначине за сваки од хармоника у сваком d , i , 0 систему. Последњи корак је одређивање струја и напона у A , B , C фазама инсталације уличног осветљења коришћењем трансформације из d , i , 0 у A , B , C систем. Модел је општи и може се применити на било коју инсталацију осветљења улице/пута. То значи да се софтвер може користити за друге LED драјвере, уз претпоставку поседовања њиховог спектра струја у нормалном и режиму редукованог осветљења. Битан детаљ у моделу је да се фазни углови струјних хармоника мењају са променом фазе основног хармоника напона дуж стубова. Ипак, још увек је неопходно свеобухватно тестирање модела, и то претежно његовог дела који се бави параметрима модела. Тестирање обављено у овом истраживању не може се сматрати довољним да гарантује потребну тачност модела и одговарајућег софтвера у пракси. Како је наведено у поглављу 4.9, утврђивањем везе између спектра струје и спектра напона напајања за различите LED драјвере може се повећати укупна тачност прорачуна. Увођење ове везе захтевало би нови итеративни поступак решавања у софтверу, што представља правац за даља истраживања.

Друго, на оба дела пилот инсталације уличног осветљења (једне реализоване са LED светиљкама неутралне беле боје које садрже конвенционалне драјвере, а друге са LED светиљкама топло-беле боје које садрже драјвере са побољшаним карактеристикама у погледу емисије виших хармоника) мерени су $THDi$, $THDu$ и појединачни хармоници струје и напона у нормалном и два режима редукованог осветљења. Мерења су обезбедила хармонијски струјни спектар LED светиљки потребан за проучавање изобличења напона у пилот инсталацији. Тада су развијени модел и софтвер проверени упоређивањем израчунате и измерене дисторзије напона у пилот инсталацији. Као што је разматрано у поглављу 4.4.3, пилот инсталација је садржала мали број стубова (укупна оптерећења су била 510 W (светиљке неутралне беле боје) и 400 W (светиљке топло-беле боје)), који су напајани каблом великог пресека (35 mm²). Стога, укупна промена напона дуж обе деонице улице била је мала. Због тога није било могуће извршити статистичку анализу у погледу тачности модела. Иако је мерни шум за више хармонике био приметан, сагласност између израчунате и измерене

дисторзије напона у оба дела пилот инсталације делује прихватљиво, због чега развијени модел и софтвер обећавају у погледу анализе виших хармоника у инсталацијама уличног осветљења које карактерише трофазна асиметрија.

Практични циљ овог истраживања био је да се утврди максимални дозвољени број LED светилки (са драјверима како стандардних, тако и побољшаних карактеристика) у трофазним инсталацијама уличног осветљења у погледу квалитета електричне енергије. Пад напона за основни хармоник, као и THD_u и проценат појединачних хармоника напона (истраживање је разматрало и нормални и режиме редукованог осветљења), израчунати су помоћу развијеног софтвера. Хармоници струје LED светилки (улазни подаци) одређени су мерењима извршеним на пилот инсталацији уличног осветљења. Резултати су показали да је употреба LED драјвера са побољшаним карактеристикама утицала на мање падове напона и вредности THD_u у свим разматраним случајевима. Ово је и било очекивано, али релативно висок 15. хармоник LED светилки топло-беле боје проузроковао је да овај хармоник напона буде ограничавајући фактор за максималан дозвољен број LED светилки топло-беле боје. Као последица тога, у свим разматраним случајевима граница у погледу броја светилки била је нижа за светилке топло-беле него за светилке неутралне беле боје. Максималан дозвољен број LED светилки топло-беле боје опада у режимима редукованог осветљења пошто се 15. хармоник струје у амперима повећава када се смањи светлосни флуks и снага светилке.

За 6 типичних случајева са фотометријски упоредивим светлотехничким решењима са натријумовим и LED светилкама (по два случаја за централни, двострани наспрамни и једнострани распоред стубова, којима одговарају стандардне светлотехничке класе улице/пута M1, M2 и M3) анализиран је и утицај примене LED светилки на пресек кабла струјног кола осветљења, ефикасност заштите од електричног удара (у случају кvara) и пад напона. Анализа је обухватила инсталације осветљења на деоницама иницијалне дужине 1000 m, реализоване помоћу конвенционалних светилки са натријумовим изворима високог притиска и LED светилки, применом каблова са алуминијумским проводницима пресека 10 mm², 16 mm² или 25 mm², за следеће вредности фактора снаге: $\cos \varphi = 0,85$ за конвенционалне светилке са електромагнетским баластима, односно $\cos \varphi = 0,95$ за LED светилке са драјвером. Поређењем максимално дозвољених бројева стубова у разматраним случајевима са аспекта пада напона, закључено је да је инсталацију са LED светилкама карактерисао или већи максимално дозвољени број стубова или приметно нижи пад напона на деоници дужине 1000 m (у односу на инсталацију са натријумовим светилкама) у сваком од разматраних случајева пресека кабла. У погледу TN система заштите је, за исту дужину деонице од 1000 m, закључено да за скоро половину разматраних случајева TN систем заштите не представља ефикасно решење. У циљу адекватног поређења максималног дозвољеног броја стубова у инсталацијама уличног осветљења реализованих помоћу натријумових и LED извора, било је потребно уважити и критеријум пада напона и критеријум TN заштите (уз кориговање дужине деонице, по потреби). Анализом одговарајућих вредности максималног дозвољеног броја стубова у инсталацијама са натријумовим и LED светилкама, није било могуће извести општи закључак који се односи на све случајеве. У половини случајева максимално дозвољени број стубова у инсталацијама са LED светилкама био је већи него у случајевима инсталације са натријумовим светилкама. И у случајевима код којих је максимално дозвољени број стубова био мањи за инсталације са LED светилкама радило се о приближно једнаким или нешто дужим деоницама у случају LED инсталације. Иако је инсталацију са LED светилкама карактерисао или већи максимално дозвољени број стубова или приметно нижи пад напона у односу на инсталацију са натријумовим светилкама у сваком од разматраних случајева пресека кабла, након узимања у обзир и ефикасности TN система заштите, уочено је да су највеће разлике у максимално дозвољеном броју стубова у корист инсталације са LED светилкама постигнуте за алуминијумски кабл пресека 25 mm².

5 LED ОСВЕТЉЕЊЕ УЛИЦА И ПУТЕВА ТОПЛО-БЕЛЕ И НЕУТРАЛНЕ БЕЛЕ БОЈЕ СВЕТЛОСТИ: СУБЈЕКТИВНИ ДОЖИВЉАЈИ ПЕШАКА

Ово поглавље дисертације је посвећено субјективном доживљају видљивости и видног комфора пешака при коришћењу LED пакета топло-беле и неутрално беле боје у уличном осветљењу. Истраживање је засновано на поређењу субјективних доживљаја релевантних параметара квалитета осветљења тротоара улице осветљене помоћу LED пакета придружене температуре боје 3000 K и 4000 K.

5.1 Преглед публикованих резултата у вези са субјективним доживљајима пешака

Примена LED технологије у уличном осветљењу брзо се повећава. Ово истраживање је посвећено једном од стратешких питања у вези употребе LED пакета у уличном осветљењу: преферираној боји светлости. Придружена температура боје комерцијално доступног LED пакета беле светлости углавном је у опсегу 2700–10000 K. LED пакете са високом придруженом температуром боје светлости (хладно-бела боја светлости, богата светлошћу плаве боје) карактеришу највеће светлосне искористивости постигнуте о трошку нижих општих индекса репродукције боје [43]. Као енергетски најефикаснији међу свим LED пакетима, LED пакети хладно-беле боје светлости су коришћени у првобитним инсталацијама LED уличног осветљења, обично замењујући претходно инсталиране натријумове изворе светлости високог притиска жућкасте боје светлости. Међутим, реакције јавности су показале да многи грађани нису били задовољни новоинсталираним осветљењем, углавном због непријатне (хладне, плавичасте) боје светлости, повећаног светлосног загађења и бљештања [37, 44, 45]. Поједини становници Бруклина, Сијетла и Хјустона у САД придружили су се организацији International Dark-Sky Association (IDA) у акцијама против уличног LED осветљења које је богато светлошћу плаве боје [37]. Једно истраживање је показало да се атмосфера коју ствара улично LED осветљење које карактерише светлост богата плавом бојом доживљава као мање пријатна [46], док је друго истраживање [47] открило да улично LED осветљење придружене температуре боје од 5500 K до 6000 K изазива туробно и непријатно окружење, док оно са мањом придруженом температуром боје 4100–4300 K ствара пријатнију атмосферу.

Због тврдњи у вези са негативним ефектима плаве светлости на сјај неба, ноћне пејзаже и ноћне животиње, IDA је недавно препоручила да би у уличном осветљењу требало примењивати само LED пакете чија придружена температура боје не прелази 3000 K [48]. Сличну препоруку је дало и удружење American Medical Association (AMA), али из другог разлога – у циљу смањења штетних ефеката на човеково здравље при излагању светлости мањих таласних дужина током ноћи [49].

Ове препоруке нису остале незапажене. Објављен је документ [50] који анализира бројне факторе излагања светлости који негативно утичу на здравље људи. Ако је мрежњача изложена краткоталасној светлости високог интензитета у дужем трајању, може доћи до њеног трајног оштећења [51, 52], због чега је удружење American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) одредило границе излагања опасности од плаве светлости (blue-light hazard) [53]. Међутим, из недавно објављеног извештаја [54] може се закључити да светлост уличних LED светиљки високе придружене температуре боје (до 6400 K) не треба сматрати небезбедном како за пешаке, тако и за возаче. Овај закључак заснива се на запажању да се на удаљености од 2 m (која је углавном прекорачена у пракси уличног осветљења), приближавање границама излагања плавој светлости [53] постиже само приликом стабилне

фиксације у трајању од преко 2,5 сата. У референци [50] је такође закључено да ако у спектру најчешће коришћеног LED пакета од индијум галијум нитрида (In-Ga-N) доминирају кратке таласне дужине, оне имају већи потенцијал за сузбијање синтезе мелатонина ноћу. Пошто се обе препоруке [48, 49] заснивају само на придруженој температури боје, што представља поједностављење спектралне расподеле снаге зрачења извора светлости важне за процену утицаја светлости на човеков невизуелни систем, у референци [50] је истакнуто да придружену температуру боје никада не би требало користити за евалуацију таквих ефеката. Слична критика постоји и у референци [55] у којој се наводи да се фотобиолошка моћ спектра извора светлости не може адекватно описати једним бројем (придруженом температуром боје).

Упркос овом аргументу који се односи на последице коришћења различитих придружених температура боје у уличном осветљењу по здравље и животну средину, истраживања у вези са субјективним доживљајем уличног LED осветљења различитих придружених температура боје прилично је мало. У истраживању које се бавило осветљењем пешачке стазе [56] (светилке су постављене 4,2 m изнад тротоара), утврђено је да су испитаници преферирали придружену температуру боје од 3000 ± 200 K за осветљеност од 5 lx, и придружену температуру боје од 3500 ± 250 K за 50 lx, што значи да су придружене температуре боје мање од 4000 K пожељније за осветљење пешачке стазе независно од нивоа осветљености. У референци [57] тестирано је LED осветљење са различитим придруженим температурама боје (1870 K, 2490 K, 3007 K, 4075 K и 5020 K) и закључено је да се LED пакети придружене температуре боје од око 3000 K сматрају најпогоднијим за улично осветљење. Данас пројектанти уличног осветљења, у циљу избегавања поменутих негативних реакција јавности, не користе LED пакете хладно-беле боје, већ обично бирају LED пакете неутралне беле боје због веће светлосне искористивости у односу на LED пакете топло-беле боје. Међутим, разлика у светлосној искористивости између LED пакета придружене температуре боје 4000 K и LED пакета придружене температуре боје 3000 K (истог општег индекса репродукције боја од 80) износи само 6% [58] (2011. године, разлика је износила 20% [59]). Дакле, светлосну искористивост више не треба сматрати доминантним критеријумом при избору између LED пакета неутрално беле и топло-беле боје светлости који су намењени за улично осветљење. Избор треба да се заснива на субјективним доживљајима возача и пешака (односно само возача у случају улица (путева) намењених искључиво за моторни саобраћај).

5.2 Примењена метода

5.2.1 Експериментална поставка

Анкета је извршена у улици Милутина Миланковића у Београду, приказаној на слици 13. Главне карактеристике улице су:

- двосмерни саобраћај (две траке, широке по 3 m),
- средње растојање између стубова износи око 30 m (слика 14),
- растојање стубова од ближе ивице коловоза износи 2,7 m (слика 14),
- наспрамни тротоар је широк 3 m (слика 14),
- висина стубова је 8 m,
- светлотехничка класа улице је M3 ($L_{av} = 1$ cd/m²) [12], и
- површине коловоза и тротоара су од сличне врсте асфалта: стандардна рефлексиона класа површине коловоза је R3, а средњи коефицијент сјајности (Q_0) износи 0,08 cd/(m² lx).

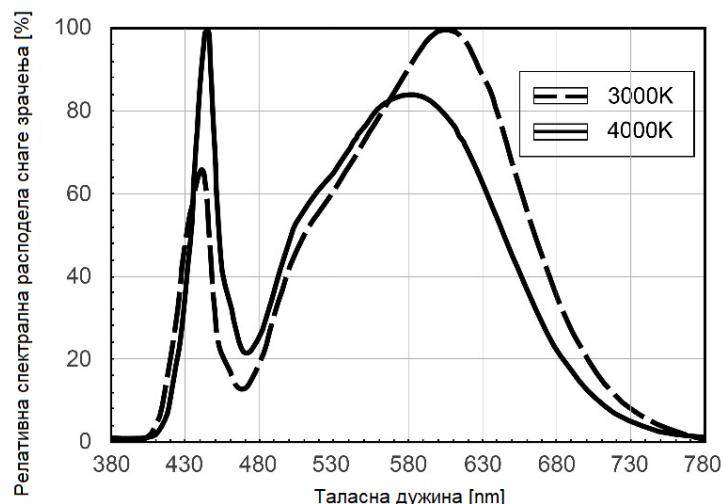


Слика 13. Део улице у којој је обављено истраживање

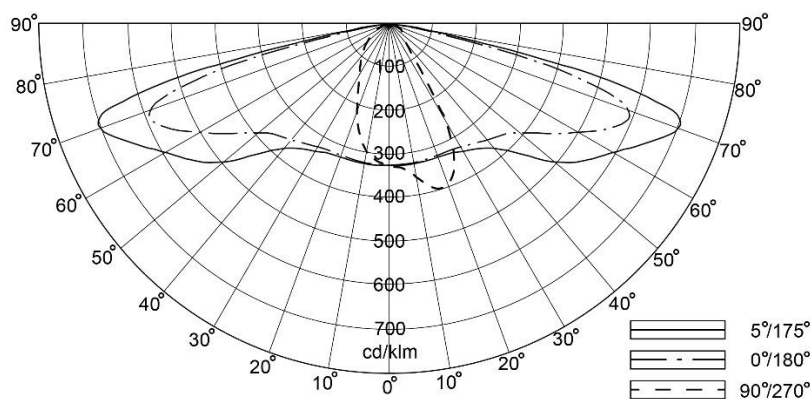


Слика 14. Геометрија улице и позиције стубова

Осветљење улице било је подељено на две тест зоне са “тампон” зоном између (слика 14). Једна тест зона је била осветљена са пет LED светиљки придружене температуре боје 3000 K, а друга са пет LED светиљки придружене температуре боје 4000 K (њихове спектралне расподеле снаге зрачења приказане су на слици 15). Светиљке у обе зоне биле су типа Voltana 3 (Schröder Group, 24 LEDs, 1 A, 80 W). Пошто су њихове расподеле светлосног интензитета практично исте, на слици 16 приказана је само спектрална расподела LED светиљке придружене температуре боје 3000 K. Светиљке које припадају зони придружене температуре боје 3000 K (инсталиране 2017. године) садрже LED пакете са општим индексом репродукције боја 80 и светлосног флукса 7814 lm, док оне из зоне придружене температуре боје 4000 K, инсталиране 2015. године, садрже LED пакете општег индекса репродукције боје 80 и светлосног флукса 7921 lm (испитаници нису имали информације о тренутку инсталације светиљки). Нагиб светиљки са LED пакетима од 3000 K износио је 9°, а код светиљки са LED пакетима од 4000 K 7°. Светиљке су са стубовима биле повезане лирама од 1,2 m. Тампон зона (слика 14), коју су чинила три стуба између две тест зоне, имала је за циљ да спречи било какав утицај светлости једне инсталације осветљења на другу (светиљке у тампон зони биле су искључене током анкете).



Слика 15. Спектрална расподела снаге зрачења LED пакета придружене температуре боје 3000 K и 4000 K коришћених у овом истраживању



Слика 16. Поларни дијаграм светиљке са LED пакетима придружене температуре боје 3000 K (правци са максималним светлосним интензитетом припадају C-полуравнинама од 5° и 175°)

Израчунате вредности осветљености тротоара (средња вредност (E_{av}) осветљености тротоара у 30 (=3·10) репрезентативних тачака одређених на основу стандарда CIE 140-2000 [60], минимална хоризонтална осветљеност (E_{min}), полуцилиндрична осветљеност (E_{sc}) и релативни пораст прага (TI) за обе испитне зоне дате су у табели 48 (њихове вредности, израчунате коришћењем професионалног софтвера Ulysse 3, намењеног уличном осветљењу, односе се на тротоар наспрам стубова, приказан на слици 14). Минималне хоризонталне осветљености односе се на вредности у две средишње тачке низа од 10 тачака поља вредновања који је најудаљенији од светиљки. Полуцилиндричне осветљености рачунате су за правце гледања од 0° и 180° – оба су паралелна оси симетрије улице, као и за правац гледања од 90°, док су вредности релативног пораста прага (TI) рачунате за правац гледања од 0° (180°) [60]. Из табеле 48 може се видети да су у обе уличне зоне постигнуте упоредиве средње осветљености тротоара. Остали фотометријски параметри су такође имали (скоро) једнаке вредности. Треба обратити пажњу на то да су осветљености измерене на површинама тротоара биле веома сличне израчунатим (4,2 lx према 4,1 lx, и 4,3 lx према 4,4 lx), као и на то да приказане израчунате средње осветљености представљају њихове почетне (иницијалне, а не погонске (експлоатационе)) вредности. Пошто су светиљке са LED пакетима од 4000 K, инсталиране две године раније, биле типа L80, сматрано је да је смањење светлосног флукса (за време од само 8000 сати) занемарљиво (светиљке су очишћене пре анкетирања).

Табела 48. Фотометријски параметри који описују осветљење тротоара испод обе инсталације осветљења

E_{av} [lx]	E_{min} [lx]	E_{sc} при 0° [lx]	E_{sc} при 90° [lx]	TI [%]
LED пакети придружене температуре боје 3000 K				
4,1	1,3	1,7	0,9	12,7
LED пакети придружене температуре боје 4000 K				
4,4	1,3	1,9	1,0	12,4

5.2.2 Анкета и упитник

Анкета је реализована путем упитника који се састоји од шест главних питања (1–6) и четири додатна питања (7–10) (видети Прилог 2). За питања 1–5 испитаници су замољени да оцене сваки од разматраних параметара квалитета осветљења и њихов општи утисак оценама 1–5 (бољи квалитет одговара већој оцени). Кроз питање 6, од испитаника је затражено да оцене свој утисак при излагању свакој од испитаних боја светлости.

Првобитни упитник за анкету је био исти као онај за оцену амбијенталног осветљења из референце [61]. Као што је предложено у референцама [62] и [63], формирана је фокус група за прилагођавање упитника новој експерименталној поставци. Фокус групу су чинили аутор и проф. др Миомир Костић са Електротехничког факултета, њихове колеге из академске заједнице и искусни пројектанти уличног осветљења. Чланови фокус групе су пажљиво анализирали свако питање и разговарали о његовој неопходности, јасноћи и потенцијално збуњујућим појмовима, што је резултирало бројним модификацијама упитника. На пример, пошто су обе инсталације осветљења практично идентичне и фотометријске карактеристике два типа светилки само незнатно различите, чланови фокус групе су препоручили да се питање у вези са равномерношћу осветљености изостави. Што се тиче осветљења људских лица, од учесника је затражено да оцене осветљеност лица пешака са удаљености од око 5 m, што се сматра најмањим растојањем довољним за брзу одбрамбену реакцију у случају напада [12]. Пошто је анкета била изведена на типичној градској улици која укључује пролазна и паркирана возила, растине на једној страни улице и пешаке у одећи различитих боја на другој, од испитаника је такође затражено да оцене репродукцију боја. Пошто су светилке постављене на стубове висине 8 m (4 m у референци [61]), као и услед чињенице да су израчунате вредности релативног пораста прага (TI) биле приближно исте у оба случаја (видети табелу 48), питање у вези са бљештањем је изостављено. Питање у вези са општим утиском о инсталацијама осветљења остало је исто. Пошто се анкета бавила уличним (а не амбијенталним) осветљењем, број главних питања смањен је на шест (видети Прилог 2).

Додатна питања из првобитног упитника остала су практично иста (питања 7–9 из Прилога 2). Ново, додатно питање (10) додато је с циљем да се одреди најзначајнији параметар квалитета уличног осветљења из перспективе пешака.

5.2.3 Процедура

Анкета је обављена 12. октобра 2017 (20–21h) по сувим временским условима. На уводном предавању одржаном непосредно пре анкетирања, истакнут је значај истраживања, истичући чињеницу да би резултати анкете могли допринети доношењу стратешке одлуке у вези са употребом одговарајуће боје светлости LED пакета намењених уличном осветљењу.

Ово је учињено с намером да се учесници потруде да дају искрене одговоре и концентришу при оцењивању разматраних инсталација уличног осветљења. Од учесника је затражено да одговоре на питања без сарадње са осталим учесницима. Кроз уводно предавање учесници су упознати са терминима који се користе у упитнику и са процедуром анкетирања. Организатори анкете су прошли кроз сва питања заједно са учесницима, који су скренули пажњу на неколико ствари које су помогле да се обезбеди додатно појашњење како терминологије, тако и процедуре. На пример, за питања 1–5 разјашњено је да се већа вредност на скали односи на бољи утисак, као и то да се оцене 1 и 5 односе на апсолутно неприхватљив, односно апсолутно прихватљив утисак о параметру осветљења. Учесницима је напоменуто да бројеви 1–5 у питању 6 немају ништа заједничко са оценама 1–5 које се користе у питањима 1–5. Током уводног предавања, учесници су стајали на почетку тест зоне придружене температуре боје 3000 K.

Учесници су потом замољени да посете обе зоне и да у њима проведу најмање 10 минута без прекида, како би имали довољно времена како за хроматску адаптацију, тако и за адаптацију очију на ниво сјајности. Такође су били упућени да посете сваку зону најмање два пута пре него што одговоре на било које питање, као и да одговарају на питања која се односе на сваку зону док стоје у тој зони. После отприлике сат времена, сви учесници су предали своје попуњене упитнике организаторима анкете. Између две тест зоне није било физичких разлика осим осветљења (свака тест зона је била дуга 120 m, а испитаницима је речено да током оцењивања избегавају кратке делове тротоара где је било благог доприноса светлости околних зграда).

5.2.4 Учесници анкете

Учесници анкете (61 мушког и 78 женског пола) били су студенти Универзитета у Београду (71 са Електротехничког факултета и 68 са Архитектонског факултета) старосне доби између 21 и 25 година. Студенти са ових факултета се могу сматрати одговарајућим испитаницима, јер припадају популацији која је способна да разуме веома специфична анкетна питања.

5.3 Резултати и дискусија

5.3.1 Општа анализа

Табела 49 садржи број испитаника који се односи на сваку од оцена (1–5) у вези са питањима 1–5. Као што се може видети из табеле 49, у вези са интензитетом осветљења тротоара (питање 1), велика већина испитаника оценила је 3000 K LED инсталацију осветљења са 4 и 5 (81 и 35, респективно, од 139 испитаника), док је 4000 K LED инсталација углавном оцењена са 3 и 4 (47 и 61 испитаник, респективно). Исто важи за све преостале параметре осветљења разматране у овом истраживању (осветљење људских лица, доживљај пријатности боје светлости и репродукција боја – питања 2–4), као и за општи утисак (питање 5). Пошто табела 49 показује да расподеле оцена нису равномерне, статистичка анализа је била заснована на вредностима медијана и интерквartilним опсезима, израчунатим коришћењем формула [64] важећих за групни третман података. У циљу провере статистичког значаја добијених резултата, примењен је Wilcoxon signed-rank тест. За свако од питања 1–5, индикатор статистичког значаја (p) израчунат је коришћењем IBM SPSS Statistics. Вредности свих ових параметара за оба типа осветљења дате су у табели 50.

Табела 49. Број испитаника који су изабрали понуђене оцене за питања 1–5

Питање	Инсталација осветљења	Оцена				
		1	2	3	4	5
1	LED пакети 3000 K	0	4	19	81	35
	LED пакети 4000 K	0	9	47	61	22
2	LED пакети 3000 K	0	4	21	74	40
	LED пакети 4000 K	1	9	52	49	28
3	LED пакети 3000 K	0	5	16	58	60
	LED пакети 4000 K	5	26	48	41	19
4	LED пакети 3000 K	1	4	24	74	36
	LED пакети 4000 K	0	14	47	52	26
5	LED пакети 3000 K	0	1	14	85	39
	LED пакети 4000 K	0	8	68	44	19

Табела 50. Вредности медијана, интерквартилних опсега и показатеља статистичког значаја

Питање		1	2	3	4	5
Вредност медијане	LED пакети 3000 K	4,07	4,10	4,33	4,04	4,13
	LED пакети 4000 K	3,72	3,65	3,29	3,66	3,40
Интерквартилни опсег	LED пакети 3000 K	3,59–4,51	3,63–4,64	3,65–4,84	3,68–4,43	3,71–4,53
	LED пакети 4000 K	3,04–4,14	2,95–4,14	2,62–3,91	2,93–4,06	2,89–3,96
<i>p</i>		<0,001	<0,001	<0,001	0,001	<0,001

Према вредностима медијана датих у табели 50, испитаници су оценили 3000 K LED инсталацију осветљења као боље решење по питању сваког од разматраних параметара осветљења, а посебно по питању боје светлости (питање 3) и општег утиска (питање 5). Мали интерквартилни опсези, који указују на расподелу централне половине вредности у оквиру скупа података, показују доследност у оцењивању свих разматраних параметара осветљења и општег утиска. Пошто је $p < 0,01$ за свако од питања 1–5, може се закључити да се добијени резултати могу сматрати статистички веома значајним за све разматране параметре осветљења, као и за општи утисак.

Чињеница да је инсталација осветљења са LED пакетима придружене температуре боје 3000 K окарактерисана као светлија (иако су оба нивоа осветљености била скоро иста) и са бољом репродукцијом боја (иако оба извора светлости имају једнак општи индекс репродукције боја од 80) заслужује додатна објашњења. Доживљај интензитета осветљења тротоара не зависи само од његове осветљености као дефинисаног фотометријског параметра осветљења. На доживљај осветљености утичу и рефлексиона својства асфалта, спектрална расподела снаге зрачења извора светлости и величина видног поља, због чега сама осветљеност (као фотометријски параметар) није довољна да се предвиди доживљај осветљености. Доживљај разлике у репродукцији боја може се евентуално објаснити чињеницом да општи индекс репродукције боја представља поједностављени приказ способности извора светлости да репродукује боје, јер она зависи од његове спектралне расподеле снаге зрачења. Треба напоменути да су разлике између одговарајућих вредности медијана инсталација осветљења са LED пакетима од 3000 K и 4000 K у вези са питањима 1 и 4 (прво се односи на интензитет осветљења тротоара, а друго на репродукцију боја) мање од оних које се односе на друга питања. Анкета је рађена под истим нивоима фотопских сјајности коловоза (1 cd/m^2) у обе тест зоне, што значи да мезопски ефекти нису узети у обзир (оба нивоа сјајности су подешена коришћењем Owllet телеменаџмент система [20] и савремене фотометријске камере – луминансметра LMK 98-4 [65]). Укључивање мезопских ефеката би изазвало нижи ниво фотопске сјајности коловоза (и, самим тим, и нижи ниво осветљености тротоара) у зони са LED пакетима од 4000 K него у зони са LED пакетима од 3000 K. Стога би се могло очекивати да са уважавањем мезопских ефеката, опредељење за LED пакете

придружене температуре боје 3000 K у вези интензитета осветљења тротоара (питање 1) буде израженије.

Што се тиче питања 6, скоро 62% испитаника (86/139) оценило је LED инсталацију придружене температуре боје 3000 K као адекватну у погледу боје светлости, док је сличан број испитаника (81/139) оценио LED инсталацију придружене температуре боје 4000 K хладнијом него што треба.

Табела 51 садржи резултате који се односе на додатна питања. Анализом одговора на прво додатно питање (питање 7 из табеле 51), може се видети да је огромна већина испитаника (76%) дала предност инсталацији осветљења са LED изворима светлости топло-беле боје. У вези са питањима 8 и 9, мора се напоменути да постоје два случаја у зависности од одговора на питање 7:

- када је одговор на питање 7 осветљење са LED изворима светлости топло-беле боје, питање 8 се односи на предности LED пакета топло-беле боје које су изабрали испитаници опредељени за LED пакете топло-беле боје, док се питање 9 односи на предности LED пакета неутралне беле боје издвојене од исте групе испитаника, и
- када је одговор на питање 7 осветљење са LED изворима светлости неутралне беле боје, питање 8 се односи на предности LED пакета неутралне беле боје које су истакли испитаници опредељени за LED пакете неутралне беле боје, док се питање 9 односи на предности LED пакета топло-беле боје издвојене од стране исте групе испитаника.

Табела 51. Број испитаника који су изабрали понуђене одговоре који се односе на додатна питања

Питање	Инсталација осветљења	Избор испитаника			
7	LED пакети топло-беле боје	105			
	LED пакети неутралне беле боје	33			
		1	2	3	4
8	LED пакети топло-беле боје	39	40	79	34
	LED пакети неутралне беле боје	14	10	21	9
9	LED пакети топло-беле боје	6	4	8	4
	LED пакети неутралне беле боје	17	18	9	11
10		46	27	57	4

Према мишљењу испитаника опредељених за инсталацију осветљења са LED пакетима топло-беле боје, два најбоља параметра осветљења која карактеришу ову врсту осветљења (питање 8) били су боја светлости (79/105) и изглед људских лица (40/105). Релативно мали број ових испитаника је скоро подједнако оценио изглед људских лица и интензитет осветљења тротоара (18 и 17, респективно) као параметре осветљења по којима је LED инсталација неутралне беле боје била боља (питање 9) – скоро половина испитаника није увидела никакву предност LED инсталације неутралне беле боје.

Испитаници опредељени за LED инсталацију неутралне беле боје одабрали су боју светлости (21/33) и интензитет осветљења тротоара (14/33) као два најбоља параметра осветљења који карактеришу LED инсталацију неутралне беле боје (питање 8). Мали број ових испитаника (8) оценио је боју светлости као параметар по ком је LED инсталација топло-беле боје била боља (питање 9).

Што се тиче питања 10, најзначајнији параметар квалитета осветљења из перспективе пешака била је боја светлости (57/139), док је интензитету осветљења дат нешто мањи значај (46/139).

5.3.2 Анализа по полу

Због присутности великог броја испитаника мушког и женског пола (61 и 78, респективно), изведена је додатна анализа резултата по полу.

За свако од питања 1–5, велика већина мушкараца и жена дали су LED инсталацији топло-беле боје оцене 4 и 5, док је LED инсталација неутралне беле боје углавном оцењена оценама 3 и 4.

Скоро 69% мушкараца и преко 56% жена оценили су LED инсталацију топло-беле боје адекватном у погледу боје светлости, а преко 57% (59%) мушкараца (жена) оценили су LED инсталацију неутралне беле боје хладнијом него што треба. И мушкарци и жене изабрали су боју светлости као најзначајнији параметар квалитета осветљења.

Табела 52 садржи вредност медијане, интерквартилни опсег и индикатор статистичког значаја за свако од питања 1–5 за мушкарце/жене за обе тест зоне. Из табеле 52 може се видети да су, према вредностима медијана, и мушкарци и жене оценили LED инсталацију топло-беле боје као бољу у погледу свих разматраних параметара осветљења, као и општег утиска. Као и у случају целокупне групе испитаника, највеће разлике одговарајућих медијана односе се на боју светлости (питање 3). У већини случајева разматраних вредности медијана (седам од десет), мање медијане одговарају женској групи, што сугерише да жене имају израженије критичко мишљење по питању уличног осветљења него мушкарци. За обе групе и за сва питања, одговарајући интерквартилни опсези су ужи за зону са LED пакетима од 3000 K, показујући већу доследност у оцењивању параметара осветљења и општег утиска зоне са LED пакетима топло-беле боје. Док су резултати у вези са питањима 1–5 на која је одговорила мушка група статистички веома значајни ($p < 0,01$), ово не важи за резултате питања 1 и 4 на која је одговорила женска група, који су само статистички значајни ($0,01 < p < 0,05$). Одговори ове групе на остала питања су доследни и статистички веома значајни.

Табела 52. Средње вредности, интерквартилни опсези и индикатори статистичког значаја који се односе на мушко/женске групе испитаника

Питање		1	2	3	4	5
Вредност медијане	LED пакети 3000 K	4,13/4,02	4,20/4,02	4,47/4,23	4,09/3,99	4,26/4,05
	LED пакети 4000 K	3,60/3,80	3,75/3,57	3,40/3,23	3,63/3,68	3,30/3,49
Интерквартилни опсег	LED пакети 3000 K	3,66–4,49/ 3,53–4,42	3,72–4,68/ 3,66–4,39	3,75–4,70/ 3,57–4,72	3,66–4,52/ 3,37–4,35	3,83–4,68/ 3,63–4,42
	LED пакети 4000 K	2,98–4,09/ 3,10–4,46	3,00–4,22/ 2,91–4,08	2,49–4,13/ 2,54–3,80	2,91–4,13/ 2,95–4,03	2,85–3,92/ 2,91–3,99
p		0,001/ 0,023	0,001/ 0,010	<0,001/ <0,001	0,006/ 0,028	<0,001/ <0,001

5.4 Закључак

Пошто пешаци представљају важне учеснике у саобраћају на градским улицама, њихови субјективни доживљаји су неопходни за одлуку о одговарајућој боји светлости LED пакета намењених за улично осветљење. Стога, тема овог дела дисертације били су субјективни доживљаји пешака у вези са инсталацијама уличног осветљења реализованих помоћу LED пакета придружене температуре боје 3000 K и 4000 K. Да би две тест инсталације биле упоредиве с тачке гледишта пешака, оне су подешене тако да су следећи објективни фотометријски параметри упоредиви: средња осветљеност тротоара (потврђено мерењима),

минимална хоризонтална осветљеност, полуцилиндрична осветљеност и релативни пораст прага.

Субјективни доживљаји релевантних параметара осветљења обе инсталације уличног осветљења упоређени су коришћењем упитника. Репрезентативан број од 139 студената (61 мушкарац и 78 жена), старосног доба 21–25 година, учествовао је у анкети оцењујући сваки од разматраних параметара квалитета осветљења (интензитет осветљења (ниво осветљености) тротоара, изглед људских лица, боја светлости и репродукција боја), као и општи утисак, оценама од 1 до 5. Резултати анкете су статистички анализирани за целокупну групу испитаника, као и по групама одређених по полу.

Резултати ове анкете су показали да су, што се тиче боје светлости из перспективе пешака, LED пакети придружене температуре боје 3000 К били конзистентно преферирани у односу на LED пакете придружене температуре боје 4000 К. Међутим, због ограничених услова анкете, добијене резултате треба сматрати првостепеном подршком за широку употребу LED пакета топло-беле боје у уличном осветљењу. Другим речима, пре давања коначне препоруке потребна су додатна истраживања, која укључују како доживљаје испитаника других узраста, тако и возача.

6 LED ОСВЕТЉЕЊЕ УЛИЦА И ПУТЕВА ТОПЛО-БЕЛЕ И НЕУТРАЛНЕ БЕЛЕ БОЈЕ СВЕТЛОСТИ: ИСПИТИВАЊЕ ОБЈЕКТИВНИХ ПАРАМЕТАРА ОСВЕТЉЕЊА И СУБЈЕКТИВНИ ДОЖИВЉАЈИ ВОЗАЧА

Овај део докторске дисертације имао је за циљ да одреди преферирану боју светлости LED пакета из перспективе возача. Стога је извршена оцена релевантних параметара квалитета осветљења како објективно, тако и субјективно. Прво је подразумевало два испитивања заснована на уочавању (детекцији) малих мета и пешака, а друго анкету са стварном вожњом. Анкете које истражују субјективне доживљаје возача приликом стварне вожње су веома ретке [61, 66, 67]. Иако је било истраживања које је показало да је понашање возача приликом стварне вожње улицом слично оном у симулатору вожње (до овог закључка се дошло разматрањем различитих опасних сценарија) [68], у овом истраживању сматрано је да симулатори вожње не могу заменити стварну вожњу приликом анализирања утицаја боје светлости на перформансе у вожњи.

6.1 Преглед публикованих резултата у вези са испитивањем објективних и субјективних параметара осветљења

LED технологија која се примењује у уличном осветљењу константно напредује током последње деценије. Светлосне искористивости LED пакета су се већ приближиле 200 lm/W [69], светлосна расподела LED светиљки може да се прилагоди скоро сваком коловозу, и LED адаптивни системи обезбеђују највећи проценат уштеда електричне енергије [13]. Иако зависи од многих утицајних параметара, од којих су најважнији струја и температура [70], животни век LED пакета далеко превазилази онај који карактерише конвенционалне изворе светлости.

Субјективни параметри осветљења, као што су боја светлости, репродукција боја и бљештање, такође су веома важни, јер утичу на општи утисак који се ствара код посматрача. Опште је познато да се осветљења две улице намењене за моторни или мешовити саобраћај, које одликују упоредиве вредности објективних параметара осветљења (ниво сјајности, општа и подужна равномерност сјајности, релативни пораст прага (TI) и коефицијент окружења (SR)), могу описати као очигледно различита од стране посматрача [71, 72]. Супротно објективним параметрима уличног осветљења, захтеви за субјективне параметре су ретко дати у стандардима и препорукама.

LED пакети поседују и додатни проблем. Због чињенице да се спектралне расподеле снаге зрачења LED пакета знатно разликују од оних које карактеришу конвенционалне сијалице (натријумови извори високог притиска, метал-халогени извори, итд.), потребан је нов систем вредновања како за изглед LED боје светлости, тако и за репродукцију боја. Међутим, такви параметри не постоје (било је неколико покушаја у вези са репродукцијом боје [73, 74], али ниједан у погледу изгледа боје светлости).

Радови који истражују доживљаје људи у вези са уличним LED осветљењем различитих придружених температура боје прилично су ретки. У референци [56] утврђено је да су у опсегу придружене температуре боје 1850–10000 K испитаници преферирали придружену температуру боје 3000 ± 200 K при нивоу осветљености од 5 lx (приближно $0,3 \text{ cd/m}^2$), и придружену температуру боје 3500 ± 250 K при 50 lx (око 3 cd/m^2). На основу чињенице да је јавност преферирала топло-белу боју светлости, препоручене су LED светиљке придружене температуре боје 2400 K за замену 194 декоративне уличне светиљке са натријумовим изворима високог притиска у оквиру пилот пројекта у граду Нантакету, САД [75]. Извршено

је неколико тестова ефеката LED осветљења различите придружене температуре боје од 1870 K, 2490 K, 3007 K, 4075 K и 5020 K [76]. Донесени су следећи закључци: у осветљењу путева адаптација ока на мрак је много лакша након излагања светлости LED пакета топло-беле него високе придружене температуре боје, као и да LED пакети ниске придружене температуре боје утичу на мањи сјај неба и боље простирање светлости у магли или измаглици. Уз то, испитаници су одабрали придружену температуру боје од око 3000 K као најпогоднију за осветљење путева. У оквиру пилот пројекта спроведеног у кампусу Станфорд Универзитета [77] тестирано је седам LED светиљки, четири светиљке са метал-халогеним изворима са керамичким гориоником и светиљка са индукционим извором светлости, чији су опсежи придружене температуре боје од 2700 K до 4000 K. Најбоље оцењена светиљка је била LED придружене температуре боје 2700 K.

Приликом пројектовања осветљења улице намењене за моторни или мешовити саобраћај, пројектант мора да одабере боју светлости. Међутим, не постоји упутство у вези са овим параметром. Удружења International Dark-Sky Association (IDA) [48] и American Medical Association (AMA) [49], прво због наведених негативних ефеката плаве светлости на сјај неба, ноћне пејзаже и ноћне животиње, а друго у циљу смањења негативних ефеката на људско здравље приликом излагања краткоталасној светлости, недавно су препоручила да би само LED пакети придружене температуре боје која не прелази 3000 K требало да се користе у уличном осветљењу. Међутим, изнети су убедљиви разлози против ових препорука [50, 51]. Представљено је неколико примера градова (Њујорк, Сијетл, Хјустон и Монтреал) [37, 44] у којима су бројне улице осветљене првобитним LED светиљкама хладно-беле боје светлости (богате плавом бојом), које су вероватно изабране због највеће светлосне искористивости међу свим LED пакетима. У овим случајевима реакције јавности су показале да многи грађани нису задовољни постигнутим ефектима осветљења, које је по њиховим речима прејаког интензитета, изазива јако бљештање и проблеме са спавањем. Такође су пријављени и непријатна (хладна, плавичаста) боја светлости и повећано светлосно загађење.

Да би се спречиле негативне реакције јавности, пројектанти уличног осветљења избегавају коришћење LED пакета хладно-беле боје светлости. Уместо њих, обично бирају LED пакете неутралне беле боје, енергетски ефикасније од LED пакета топло-беле боје. Међутим, разлика између светлосних искористивости комерцијално доступних LED пакета неутралне беле (4000 K) и топло-беле боје (3000 K) (оба са истим општим индексом репродукције боја 80) износи само 6% [58]. Предвиђено је постизање једнаке светлосне искористивости LED пакета топло-беле, неутралне беле и хладно-беле боје 2025. године [78]. Треба напоменути да разматрање мезопских нивоа сјајности који одговарају фотопским нивоима сјајности који се најчешће примењују у уличном осветљењу ($0,5\text{--}1\text{ cd/m}^2$) омогућавају уштеде енергије које не прелазе 5% када се уместо LED пакета неутралне беле користе они топло-беле боје [21]. Дакле, енергетска ефикасност (светлосна искористивост) више не би требало да буде одлучујући критеријум при избору између LED пакета неутралне беле и топло-беле боје намењених за улично осветљење, већ би избор требало да се заснива на преференцијама (опредељењу) возача и пешака (односно, само возача ако је улица (пут) искључиво намењена за моторни саобраћај). Наравно, много већи значај треба дати резултатима оцене параметара који се односе на безбедност у саобраћају.

У Београду је спроведено истраживање које се бави поређењем доживљаја пешака у погледу видљивости и видног комфора у два дела улице осветљене LED светиљкама придружене температуре боје 3000 K и 4000 K [79]. Релевантни параметри квалитета осветљења тротоара (интензитет осветљења (ниво осветљености), осветљеност људских лица, пријатност боје светлости и репродукција боја), као и општи утисак, субјективно су упоређени коришћењем упитника. Испитаници су оценили LED осветљење придружене температуре боје од 3000 K као боље решење у погледу сваког од разматраних параметара осветљења, а посебно

у погледу боје светлости и општег утиска. Међутим, закључено је да су пре коначног закључка потребна додатна истраживања, која укључују доживљаје испитаника других узраста, као и доживљаје возача.

6.2 Примењена метода

6.2.1 Експериментална поставка

Истраживање (пилот пројекат) је реализовано у улици Милутина Миланковића у Београду (слика 17) намењеној за двосмерни саобраћај. Цела улица је претходно била осветљена натријумовим изворима високог притиска. За потребе овог истраживања, један део улице био је осветљен LED светиљкама придружене температуре боје 3000 K, а други LED светиљкама придружене температуре боје 4000 K.



Слика 17. Део улице изабран за пилот пројекат

Свака деоница улице (тест зона) била је осветљена са пет светиљки. Средње растојање између стубова било је 30 m (слика 18), а висина стуба 8 m (светиљке су на стубове постављене помоћу лира дужине 1,2 m). Густина саобраћаја у улици је ниска током ноћи, што је омогућило извођење свих потребних фотометријских мерења (помоћу CCD камере). Обезбеђена је тампон зона са три стуба (светиљке) (слика 18) између две инсталације уличног осветљења ради спречавања утицаја једне тест зоне на другу (светиљке у тампон зони биле су искључене током сваког од три испитивања). На корисничком веб интерфејсу примењеног телеменаџмент система (Owlet [20]) светиљке са LED пакетима придружене температуре боје 4000 K биле су означене бројем 1–5, светиљке у тампон зони 6–8, и светиљке са LED пакетима придружене температуре боје 3000 K 9–13 (слика 18).



Слика 18. Геометрија улице са позицијама стубова и мета (П – пешаци, СЗ – светлосива коцка и ТП – тамноплава коцка)

Све светиљке су биле истог типа (24 LEDs, 1 A, 80 W, IP66, IK08, са стакленим протектором, са кућиштем од алуминијума ливеног под високим притиском, подесивог нагиба) које карактеришу практично једнаке расподеле светлосног интензитета. Светиљке из прве тест зоне (придружене температуре боје 3000 K, општег индекса репродукције боје 80 и светлосног флукса 7800 lm) су недавно постављене, док су светиљке из друге тест зоне (придружене температуре боје 4000 K, општег индекса репродукције боје 80 и светлосног флукса 7900 lm) постављене 2015. године (учесници нису знали када су које светиљке уграђене). Угао нагиба првог типа светиљки износио је 9°, а другог 7°. Све светиљке биле су опремљене димабилним драјвером и контролером, тиме омогућавајући исти ниво сјајности у обе тест зоне, што је било важно и за објективну и субјективну оцену.

Почетни (иницијални) ниво сјајности коловоза (L_{av}), општа и подужна равномерност сјајности (U_o и U_l , респективно), релативни пораст прага (TI) и коефицијент окружења (SR), израчунати под претпоставком стандардне рефлексионе класе коловоза R3 и средњег коефицијента сјајности коловоза (Q_o) од 0,08 cd/(m²·lx) [11], приказани су у табели 53 за обе тест зоне (њихове вредности су израчунате коришћењем професионалног софтвера за улично осветљење Ulysse 3, који је развио Schréder Group, и на основу препорука CIE 115-2010 [12] и CIE 140-2000 [60]). По инсталирању светиљки, нивои сјајности (мерени CCD камером) били су веома близу израчунатим: 1,46 cd/m² (LED пакети 3000 K) и 1,50 cd/m² (LED пакети 4000 K) [11].

Табела 53. Фотометријски параметри који описују обе инсталације осветљења

L_{av} [cd/m ²]	U_o [%]	U_l [%]	TI [%]	SR
LED пакети придружене температуре боје 3000 K				
1,49	40	80	11,4	0,53
LED пакети придружене температуре боје 4000 K				
1,47	46	82	11,4	0,54

6.2.2 Испитивања која се односе на објективну (квантитативну) евалуацију

Изведена су два испитивања заснована на квантитативним показатељима уличног осветљења: прво посвећено видљивости (детекцији) малих мета, и друго уочавању пешака.

Деведесетих година прошлог века концепт уличног осветљења заснован на видљивости малих мета (Small Target Visibility – STV), који углавном промовише Адриан [80–82], усвојили

су и CIE [83] и ANSI/IESNA [84]. Истичући да је у оба документа усвојена ниска рефлектанса предмета од 20%, препоручене STV вредности су се кретале од 5,0 до 7,5 (за нивое сјајности између $0,5 \text{ cd/m}^2$ и $1,0 \text{ cd/m}^2$) у CIE документу, и од 1,6 до 4,9 (за нивое сјајности у опсегу од $0,3 \text{ cd/m}^2$ до $1,0 \text{ cd/m}^2$) у ANSI/IESNA документу.

Иако безбедност у саобраћају у великој мери зависи од способности возача да уочи и препозна мале препреке на путу, STV концепт никада није био широко коришћен. Као последица тога, препоручене STV вредности нису биле укључене у ажурирани CIE документ из 2010. године [12], а 2006. године IESNA комитет за осветљење путева повукао је STV као обавезан параметар у пројектовању. Међутим, у исто време IESNA је задржала STV као алат за фино подешавање инсталација осветљења улица/путева пројектованих по стандардним критеријумима сјајности.

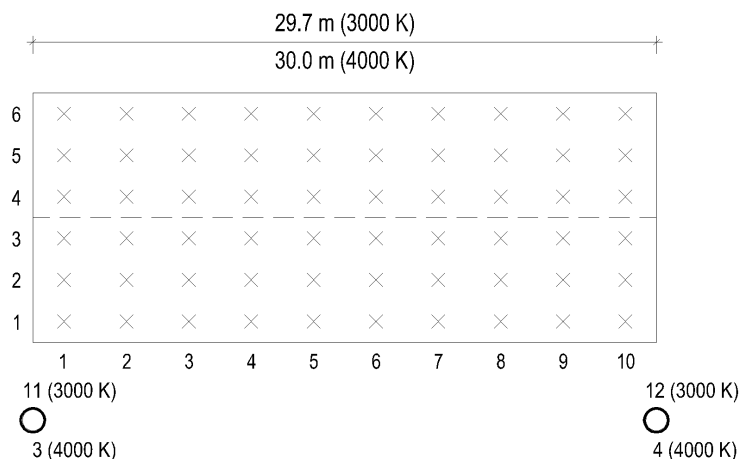
Пошто је пројектовање уличног осветљења засновано на критеријуму сјајности у обе зоне (видети табелу 53), прво испитивање које се односило на објективну оцену било је посвећено поређењу STV вредности две деонице улице са осветљењем придружене температуре боје 3000 K и 4000 K. У оквиру другог испитивања (такође посвећеног објективној оцени) тест зоне су упоређене у погледу способности возача да уоче пешаке.

6.2.2.1 Испитивање засновано на STV концепту

Ово испитивање је засновано на ANSI/IESNA условима из 2000. године (када је рефлектанса мете промењена са 0,2 на 0,5 [85]), потврђеним 2014. године [86]. Услови су следећи:

- равна мета (димензија $18 \text{ cm} \times 18 \text{ cm}$), дифузне рефлектансе од 0,5, поставља се нормално на осу улице у свакој од стандардних тачака поља вредновања,
- линија посматрач-мета је паралелна оси улице,
- посматрач је увек позициониран 83 m од мете (угао гледања је фиксиран на 7,45 мин), висина посматрања је 1,45 m, а правац гледања је скоро хоризонталан (угао гледања надолу је 1°),
- посматрач има 60 година,
- праг контраста се израчунава према Адријановом моделу [81], под претпоставком да је време посматрања 0,2 s, и
- позадинска сјајност се израчунава као средња вредност сјајности централних тачака на доњој и горњој линији мете (последње се односи на тачку коловоза позиционирану 11,77 m иза циља).

Између стубова 11 и 12 у зони придружене температуре боје 3000 K, односно између стубова 3 и 4 у зони придружене температуре боје 4000 K (видети слику 18), изабрано је 60 (= $6 \cdot 10$) стандардних (регуларних) тачака поља вредновања приказаних на слици 19 (постоје две саобраћајне траке на посматраној улици и ниједно од два растојања између стубова не прелази 30 m) [60]. Светлозелена мета ($18 \text{ cm} \times 18 \text{ cm}$), израђена од картона (дифузне рефлектансе 0,46 (приближно 0,5), измерене спектрометром GL Spectis 1.0 који поседује халогену сијалицу температуре боје 2854 K и улазни оптички систем са фиксираним визуелним углом од 2° [87]), постављена је у свакој тачки поља вредновања. Посматрач (CCD камера (луминансметар) LMK 98-4 [88]) позициониран је у складу са горе наведеним ANSI/IESNA условима [86], при чему се његова позиција прилагођава свакој тачки поља вредновања.



Слика 19. 60 тачака поља вредновања у којима је постављена мала мета (камера је била постављена лево од стуба 3 (11))

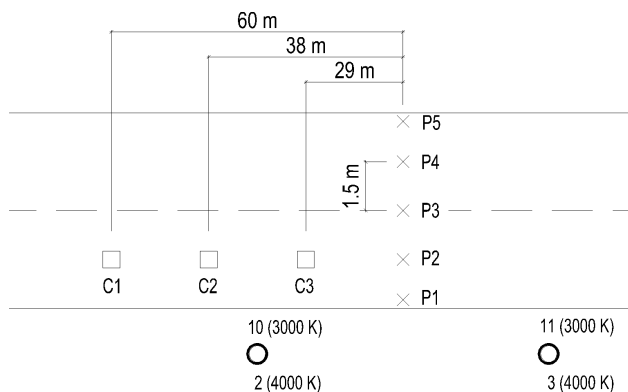
Пре фотографисања, помоћу CCD камере и телеменаџмент система, нивои сјајности у обе зоне били су подешени на вредност од 1 cd/m^2 , што одговара светлотехничкој класи улице МЗ [12]. Исто подешавање осветљења урађено је и за друга два испитивања. Сва испитивања су изведена када је улица била сува.

Направљена је фотографија за сваки положај мете, коришћењем high-dynamic range imaging технологије (HDRI), која омогућава снимање сцена/кадрова које карактерише и висок и низак ниво сјајности (камером се фотографише неколико слика са различитим временима експозиције које се потом конвертују у јединствену слику са подацима о сјајности).

6.2.2.2 Испитивање које се односи на уочавање пешака

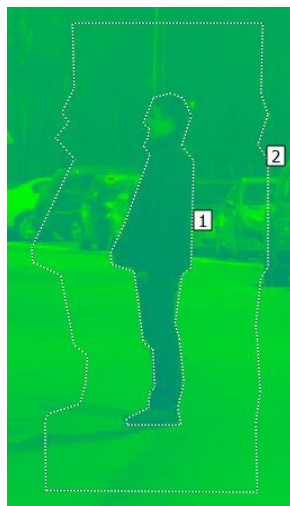
Примењена је процедура представљена у референци [89], заснована на анализи фотографија пешака који прелази улицу и прорачуну две врсте параметара вредновања, односно разлика у сјајности (контраста).

Симулирајући пешака који прелази улицу, особа обучена у тамну одећу била је постављена у пет тачака дуж средње линије између стубова 10 и 11 у зони придружене температуре боје 3000 K, односно између стубова 2 и 3 у зони придружене температуре боје 4000 K (као што је приказано на слици 20).



Слика 20. Позиције пешака и камере

Посматрач (CCD камера) је био постављен на 29 m, 38 m и 60 m од пешака (дужине зауставног пута при брзини од 50 km/h, 60 km/h и 80 km/h, респективно, и под претпоставком да време размишљања износи 1 s [90, 91]). Симулирајући положај очију возача, камера је била постављена у оси симетрије саобраћајне траке ближе стубовима (видети слику 20) на висини од 1,5 m. Камера је била усмерена ка пешаку у тачкама 1 m изнад коловоза. Снимљена је фотографија за сваки положај мете и камере (15 фотографија за сваку тест зону). Фотографија која се односи на позицију пешака P2 и позицију камере C2 у зони придружене температуре боје 3000 K дата је као пример (слика 21).



Слика 21. Фотографија пешака

Свака фотографија је обрађена помоћу софтвера камере и у складу са поступком датим у референци [89]. Прво је пешак оивичен линијом, а затим је нацртана још једна линија која окружује претходну (растојање између најближе тачке две линије било је приближно једнако ширини фигуре пешака). Након тога су одређене вредности сјајности мете (средња вредност сјајности површине коју прекрива фигура пешака), сјајности позадине (средња вредност сјајности површине одређене унутрашњом и спољашњом линијом), као и стандардне девијације сјајности мете и сјајности позадине.

Први примењени параметар вредновања контраста био је стандардни (Веберов) контраст, који је дао корисне информације о знаку вредности контраста. Дефинише се као:

$$\text{Веберов контраст} = \frac{L_t - L_b}{L_b}, \quad (33)$$

где су L_t и L_b средње сјајности мете и позадине, респективно. Други параметар вредновања је представљао Дојлов контраст, дефинисан као:

$$\text{Дојлов контраст} = \left[(L_t - L_b)^2 + (\sigma_t - \sigma_b)^2 \right]^{1/2}, \quad (34)$$

(σ_t и σ_b су стандардне девијације вредности пиксела мета и позадине, респективно [89]).

Дојлов параметар вредновања контраста узима у обзир неравномерност сјајности како унутар пешака, тако и сцене иза њега. Овај параметар вредновања контраста је важан за ово испитивање због постојања значајне неравномерности сјајности у испитном пољу.

6.2.3 Испитивање које се односи на субјективну оцену

Испитивање је засновано на анкети спроведеној кроз упитник помоћу ког је од возача тражено да изабере погодније светлотехничко решење у вези са шест параметара, као и са општом видљивошћу. Испитаници су такође замољени да одговоре на три додатна питања. Прва два су се односила на избор најбољих параметара осветљења у свакој од две инсталације осветљења, а треће на избор најзначајнијег параметра осветљења из перспективе возача.

Упитник коришћен у референци [61] служио је као почетни упитник за анкету. Финализован је од стране фокус групе коју су сачињавали аутор и проф. др Миомир Костић са Електротехничког факултета, њихове колеге из академске заједнице и искусни пројектанти уличног осветљења. На састанку фокус групе, детаљно је анализирано свако питање из почетног упитника и дискутовано је о његовој неопходности, јасноћи и коришћеној терминологији који би могли да збуне испитанике, након чега је фокус група направила неколико измена у почетном упитнику. Пре свега, разматран је само субјективни доживљај интензитета осветљења коловоза (а не општи интензитет осветљења коловоза и тротоара), јер је у корелацији са нивоом сјајности улице. Фокус група је уклонила питање које се односи на равномерност светлости (сјајности) коловоза, јер су геометрија обе инсталације осветљења и фотометријске карактеристике оба типа светилки били скоро идентични. На овај начин је смањен број питања, што је било пожељно због кратког излагања возача тест зонама (један циклус вожње (у оба правца) трајао је око 1,5 min). Уз то, због кратке дужине обе тест зоне, није било потребе узети у обзир подужну равномерност сјајности. Друга основна питања из почетног упитника (у вези са бојом светлости, бљештањем и уочавањем пешака и препрека) нису измењена. Коначно, упитник је садржао шест главних питања која покривају разматране параметре квалитета осветљења (који се могу запазити приликом вожње). Уместо питања у вези са општим утиском (почетни упитник), седмо питање је модификовано да се односи на општу видљивост. Два додатна питања из почетног упитника била су мало измењена: од испитаника је затражено да изабере два (уместо једног) најбоља параметра квалитета уличног осветљења од шест понуђених. Да би се утврдио најзначајнији параметар квалитета уличног осветљења из перспективе возача, фокус група је креирала ново (треће) додатно питање.

Коначан облик упитника коришћеног у анкети дат је у Прилогу 3.

Пошто квантитативно оцењивање параметара осветљења није сматрано могућим због кратког времена излагања тест зонама, сви чланови фокус групе су се сложили да испитаници треба да изабере само боље од два светлотехничка решења по питању сваког параметра.

Да би се поступак анкетирања и терминологија коришћена у упитнику објаснили испитаницима, непосредно пре вожње одржано је уводно предавање. Упитник је прочитан и учесници су поставили неколико питања (о значењу коловоза (одговор: он не укључује тротоар) и видљивости (одговор: она не укључује видни комфор), као и о улози сувозача), што је допринело потпуном разумевању како појмова, тако и целе процедуре. У циљу повећања мотивације испитаника да дају искрене одговоре и концентришу се приликом оцењивања разматраних параметара уличног осветљења, речено им је да би резултати анкете могли да допринесу усвајању стратешке одлуке у вези са употребом одговарајуће боје светлости LED пакета у уличном осветљењу.

6.2.3.1 Учесници анкете

Старосно доба учесника анкете (45 мушкараца и 8 жена) било је између 21 и 67 година (22 су били млађи од 25 година, а 23 су били старости између 25 и 35 година). Поред

поседовања важеће возачке дозволе, сваки учесник је потврдио да је активан возач са нормалним видом. Организатори истраживања нису сматрали неопходним спровођење било какве провере вида учесника, јер су, уместо категорисања учесника у неке одређене групе у погледу њиховог вида, желели да они представљају широку популацију возача. Због тога је старосно доба учесника припадало широком спектру и ангажована су оба пола.

6.2.3.2 Процедура

Договорено је да брзина вожње буде око 50 km/h, што одговара најчешћем брзинском ограничењу на градским улицама. За разлику од пилот пројекта представљеног у референци [22], део улице у коме је вршено испитивање није затворен за саобраћај. Међутим, због локације разматране улице (комерцијална зона) и доба дана, густина саобраћаја је била веома ниска.

Светлост друге боје могла се видети само из даљине и, стога, практично није утицала на амбијент вожње.

У референци [92] проучаван је утицај димовања на промену боје светлости белих LED пакета. Откривено је да ни димовање регулацијом струје нити модулацијом пулсне ширине (pulse width modulation (PWM)) (коришћено у овом истраживању) није изазвало приметну промену трихроматских координата (боје светлости) фосфорних LED пакета који су коришћени и у овом истраживању. Стога се може закључити да смањење стварних нивоа сјајности на 1 cd/m^2 у обе тест зоне није изазвало приметну промену трихроматских координата извора светлости ни у једној од њих.

Иако је анкета укључивала само вожњу десном страном, њени резултати се могу сматрати општим, јер садашњи стандарди и препоруке [60, 93] не праве никакву разлику између вожње десном и левом страном у погледу положаја возача при прорачуну објективних параметара уличног осветљења (возач се поставља у осу сваке саобраћајне траке).

Док су чекали свој ред за вожњу, учесници су стајали близу тест зоне са LED пакетима придружене температуре боје 3000 K, из које је почињао сваки циклус вожње. Испитаници су возили или аутомобил обезбеђен од стране организатора анкете или, у циљу скраћења укупног трајања анкете, сопствени аутомобил. Коришћени су само аутомобили са фаровима који садрже халогене сијалице, које су и даље доминантне у саобраћају. Током сваке вожње на возилима су била укључена оборена светла.

Унутрашње амбијентално осветљење у свим аутомобилима било је искључено (што представља уобичајену ситуација у пракси), остављајући само ефекат осветљења инструмент табле на возача. Међутим, овај ефекат се може сматрати занемарљивим [94].

У студији о комбинованом ефекту осветљења пута и фарова аутомобила [95], изведени су експерименти на осветљеном и неосветљеном путу у циљу утврђивања утицаја бљештања (који је изазван фаровима надолazeћих аутомобила) на возачеву видљивост. Као што је и очекивано, закључено је да осветљење путева смањује ефекат бљештања надолazeћег аутомобила због побољшане визуелне адаптације возача. Друга студија [96] је истраживала ефекат димовања осветљења пута (100%, 71% и 49% почетног светлосног флукса) на бљештање изазвано кратким (обореним) светлима надолazeћег аутомобила. Супротно очекивањима, није пронађена статистички значајна разлика у бљештању. У овом истраживању, само шест учесника имало је надолazeћи аутомобил током вожње, због чега бљештање фарова аутомобила практично није утицало на одговоре.

Од возача је затражено да пажљиво прочитају питања пре вожње и обрате пажњу на релевантне параметре осветљења (интензитет осветљења, боја светлости, бљештање итд.).

Задатак сувозача је био да подсети возача на ове параметре неколико пута током вожње. По завршеној вожњи (док су доживљаји били свежи), возач би попунио упитник и предао га организаторима анкете. Само возачи, а не и сувозачи, попуњавали су упитник, јер је спроведено истраживање [97] показало да су перформансе возача биле ниже него код путника.

Као што је већ поменуто, вожња је увек почињала из дела за окупљање учесника, који је био осветљен и удаљен 20 m од првог стуба зоне са светилкама придружене температуре боје 3000 K (означено са 13 на слици 18) – на овај начин су возачи у ову зону улазили из већ осветљеног подручја. Напуштајући зону са светилкама придружене температуре боје 3000 K, возач је пролазио кроз тампон (тамну) зону из које је улазио у зону са светилкама придружене температуре боје 4000 K. Након вожње кроз ову зону и полукружног окретања назад, возач је још једном улазио у зону од 4000 K (овог пута из већ осветљеног подручја). Коначно, након поновног проласка кроз тампон зону, возач је улазио у зону са светилкама придружене температуре боје 3000 K (овог пута из неосветљеног (тамног) подручја). Треба нагласити да када би возач кроз зоне пролазио обрнутим редом, резултати би били практично исти.

На основу њихових временских карактеристика, идентификоване су три компоненте хроматске адаптације: спора, брза и тренутна хроматска адаптација, од којих прве две утичу на боју светлости и хроматску дискриминацију, а трећа искључиво на боју светлости [98]. Утврђено је да потпуна хроматска адаптација обично траје до 40 секунди, што је постигнуто у овом истраживању.

Пошто се једно од питања односило на уочавање пешака током вожње, од возача се очекивало да примете учеснике обучене у тамну одећу, који су стајали на ивичњаку у обе тест зоне (њихов положај је приказан на слици 18).

Истичући важност уочавања малих препрека на улици [43, 99], две идентичне коцке (једна светлозелена, а друга тамноплава) биле су постављене у оси коловоза у свакој тест зони (позиције ове четири коцке такође су приказане на слици 18). Према STV концепту, возач треба да уочи препреку (коцку) под угловима нагнутим изнад 7.45° ($1' = \pi / (180 \cdot 60)$ rad). Узимајући у обзир да зауставни пут (растојање пређено за време размишљања и кочења) који одговара брзини од 55 km/h (која је нешто већа од 50 km/h, колико је договорено за експеримент) износи 33 m (под претпоставком да време размишљања износи 1 s) [90, 91], дужина ивице коцки потребних за овај експеримент износила је:

$$a = 33 \text{ m} \cdot 7.45 \cdot \frac{\pi}{180 \cdot 60} = 7.2 \text{ cm}, \quad (35)$$

због чега су направљене коцке дужине ивице 8 cm (на слици 22 приказана је фотографија светлозелене коцке на коловозу). Пошто STV концепт, који је заснован на једној рефлектанси, понекад може довести до погрешних закључака [43], тестиране су коцке и светле и тамне боје. Све коцке су направљене од картона и напуњене песком. Мерење рефлектансе (ρ) обе врсте картона извршено је помоћу спектрометра GL Spectis 1.0 [87]. Измерена рефлектанса тамноплавог картона била је 0.12, а светлозеленог 0.43.



Слика 22. Светла коцка постављена на коловозу у зони придружене температуре боје 3000 K

Од возача је затражено да што пре обавести сувозача о уочавању препреке или пешака. На крају војње, неколико возача је пријавило да уопште нису видели пешаке ни коцке тамне боје (током теста, две коцке тамне боје су прегажене точковима возила, а затим замењене резервним).

6.3 Резултати и дискусија

6.3.1 Истраживање засновано на STV концепту

За сваку од тест зона табела 54 садржи нивое видљивости мета који се односе на свих 60 тачака поља вредновања. У зони са светиљкама придружене температуре 3000 K, за 29 тачака ниво видљивости је био између 0 и 1, за 16 тачака између 1 и 2, за 10 тачака између 2 и 3, и за 5 тачака између 3 и 4, док је у зони са светиљкама придружене температуре 4000 K за 34 тачке ниво видљивости био између 0 и 1, за 16 тачака између 1 и 2, за 8 тачака између 2 и 3 и за две тачке између 3 и 4. STV вредности (пондерисани средњи нивои видљивости) за зоне са светиљкама придружене температуре 3000 K и 4000 K, израчунате по поступку датом у референци [86], износили су 1,14 и 1,01, респективно. Иако је разлика између ове две вредности мала, обе STV вредности су ниске (близу 1). Стога, ово истраживање указује на потребу за додатним тестовима по овом питању (са различитим светиљкама и нивоима сјајности, као и са малим метама других боја и рефлектанси), неопходним за доношење закључка о односу између LED пакета и видљивости малих мета.

Табела 54. Нивои видљивости који одговарају за свих 60 тачка на мрежи (према њиховој нотацији примењеној на слици 19)

LED CCT	Тачке	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3000 K	1	-1,16	0,25	0,25	0,86	1,70	0,30	-1,96	-3,26	0,76	0,10
4000 K		-1,77	-0,72	0,67	0,24	-0,67	-1,54	-2,40	-3,01	-3,30	-2,43
3000 K	2	-1,30	-0,16	0,25	0,45	-0,08	-1,51	-2,14	-2,59	-2,40	-2,57
4000 K		-0,82	0,73	0,65	0,02	-1,25	-1,51	-2,86	-2,80	-2,96	-2,42
3000 K	3	-1,58	0,25	0,42	0,11	0,06	-1,30	-2,10	-2,83	-2,80	-3,88
4000 K		0,09	1,33	1,19	0,58	0,00	-0,95	-1,19	-1,62	-1,67	-2,05
3000 K	4	-1,40	0,43	0,56	-0,18	0,06	-0,96	-2,21	-3,12	-3,04	-3,47
4000 K		0,68	1,56	1,56	0,74	-0,05	-0,16	-0,72	-1,29	-0,38	-0,71
3000 K	5	0,22	0,28	1,22	0,36	0,53	0,08	-1,37	-1,93	-1,80	-2,77
4000 K		0,92	1,45	2,13	1,25	0,45	0,26	0,04	0,07	0,05	-0,07
3000 K	6	-2,34	-1,09	-1,21	0,99	0,69	0,35	-0,51	-0,37	-1,33	-1,18
4000 K		0,99	1,60	1,54	0,98	0,50	0,53	0,19	0,24	0,38	-0,37

6.3.2 Истраживање посвећено уочавању пешака

У табели 55 дата су два показатеља контраста сјајности за сваку од пет позиција пешака и три позиције камере за обе тест зоне.

Табела 55. Веберове и Дојлове дозе контраста за све позиције пешака и камере

Позиција пешака	Позиција камере	C1 (60 m)		C2 (38 m)		C3 (29 m)	
	Тип контраста	Вебер	Дојл	Вебер	Дојл	Вебер	Дојл
1	3000 K	-0,02	0,05	-0,03	0,09	-0,05	0,41
	4000 K	-0,02	0,03	-0,03	0,04	-0,05	0,11
2	3000 K	-0,02	0,05	-0,03	0,05	-0,04	0,07
	4000 K	-0,02	0,03	-0,03	0,10	-0,05	0,12
3	3000 K	-0,02	0,02	-0,04	0,19	-0,05	0,13
	4000 K	-0,02	0,13	-0,04	0,54	-0,05	0,36
4	3000 K	-0,03	0,01	-0,04	0,71	-0,04	0,02
	4000 K	-0,02	0,03	-0,03	0,01	-0,03	0,01
5	3000 K	-0,02	0,01	-0,03	0,01	-0,05	0,05
	4000 K	-0,02	0,01	-0,03	0,07	-0,04	0,01

Повећањем удаљености са које се слика пешак, његов лик је изгледао мањи. С циљем да се подаци о контрастима нормализују, израчунати Веберови и Дојлови контрасти су помножени са коефицијентом дозирања светлости, који се дефинише као однос између висине пешака (1,9 m) и удаљености камере [97]. На овај начин су добијене Веберове и Дојлове дозе контраста и, као што је то предложено у референци [97], поређење између две инсталације осветљења било је на основу њихових вредности, а не на основу вредности Веберовог (Дојловог) контраста.

Што се тиче вредности Веберових и Дојлових доза контраста, из табеле 55 може се закључити да све ове вредности имају негативан знак, као и да инсталација осветљења са светиљкама придружене температуре боје 3000 K пружа нешто бољу могућност уочавања пешака (у 4 случаја (од 15) апсолутна вредност Веберове дозе контраста већа је код зоне са светиљкама придружене температуре боје 3000 K, док супротно важи само у једном случају). Међутим, у погледу Дојлове дозе контраста ниједна од две инсталације осветљења није у предности (у 7 случајева Дојлова доза контраста већа је за зону са светиљкама придружене температуре боје 4000 K, док у других 7 случајева важи супротно).

6.3.3 Истраживање које се односи на субјективну оцену

Резултати анкете приказани су у табели 56. Што се тиче питања 1–7, из табеле 56 може се видети да се већи број испитаника определио за инсталацију осветљења са LED пакетима придружене температуре боје 3000 K у погледу интензитета осветљења коловоза (његовог нивоа сјајности), боје светлости, ограничења бљештања, уочавања малих препрека тамне боје и опште видљивости, док су LED светиљке придружене температуре боје 4000 K оцењене као погодније за уочавање пешака и уочавање малих препрека светле боје, која су важна за безбедност у саобраћају. Међутим, убедљива већина је постојала само у погледу боје светлости LED пакета придружене температуре боје 3000 K (41:12) и бољег уочавања препрека светле боје у зони са светиљкама придружене температуре боје 4000 K (35:17). Првим је потврђено очигледно опредељење за светлост топло-беле боје из перспективе возача у погледу видног комфора, док је друго у складу са закључцима представљеним у референци [100], који наводе да је боља видљивост зелених предмета у складу са већом придруженом температуром боје због већег доживљаја осветљености и перцепције изгледа предмета зелене боје.

Табела 56. Број испитаника који су одабрали сваки од понуђених одговора

Главна питања	Понуђени одговори					
	А (LED пакети 3000 К)			Б (LED пакети 4000 К)		
1	27			26		
2	41			12		
3	28			23		
4	22			28		
5 (p = 43%)	17			35		
6 (p = 12%)	27			22		
7	29			23		
Додатна питања	Понуђени одговори					
	1	2	3	4	5	6
8 (LED пакети 3000 К)	15	27	18	14	6	8
9 (LED пакети 4000 К)	15	7	13	20	20	11
10	16	4	7	14	6	/

Испитаници су две тест зоне оценили практично једнако у погледу интензитета осветљења коловоза (његовог нивоа сјајности) (27:26), док је мало већи број испитаника (28:22) био опредељен за LED пакете придружене температуре боје 4000 К у погледу уочавања пешака. У оба случаја осветљени објекти (коловоз сачињен од асфалта и одећа пешака) били су тамни, што представља могући разлог одсуства значајног опредељења за осветљење веће придружене температуре боје (у референци [101] показано је да осветљење са већом придруженом температуром боје карактерише јачи доживљај осветљења простора од оног са мањом придруженом температуром боје, без разматрања тамних простора). Исто објашњење важи и за резултате који се односе на уочавање малих препрека тамне боје (мало већи део испитаника (27:22) изабрао је осветљење мање придружене температуре боје).

Што се тиче питања 8, два најбоља параметра осветљења која карактеришу инсталацију са LED светиљкама придружене температуре 3000 К били су боја светлости (27 од 53 испитаника) и ограничење бљештања (18/53). Два најбоља параметра осветљења са LED светиљкама придружене температуре 4000 К (питање 9) су уочавање пешака (20/53) и откривање малих препрека светле боје (20/53).

Што се тиче питања 10, два најзначајнија параметра квалитета уличног осветљења из перспективе возача су интензитет осветљења (ниво сјајности) коловоза (16/53) и уочавање пешака (14/53), што је и било очекивано. Знатно мањи број испитаника је сматрао друге параметре важним. Пошто је најмањи број испитаника навео боју светлости, очигледно је занемарен значај видног комфора у поређењу са безбедношћу у саобраћају.

Треба напоменути да је мали број испитаника био неодлучан у вези одређених питања.

Да би се проверило колико су добијени резултати који се односе на питања 1–7 статистички значајни, примењен је z-тест једног узорка за пропорције чији су резултати приказани у табели 57. За свако од питања израчунате су z-вредности разлика између посматране и претпостављене пропорције од 0,5, показатељ статистичког значаја (p) и интервали поузданости од 95% (њихове доње и горње границе) коришћењем IBM SPSS Statistics.

Табела 57. Z-вредности кориговане у континуитету, показатељи статистичког значаја и доње и горње границе поузданости од 95%

Главна питања		Број испитаника	z	p	Доња граница поузданости од 95%	Горња граница поузданости од 95%
1	LED пакети 3000 K	27	0,00	1,00	0,37	0,64
	LED пакети 4000 K	26	0,00		0,36	0,63
2	LED пакети 3000 K	41	3,85	< 0,01	0,66	0,89
	LED пакети 4000 K	12	-3,85		0,11	0,34
3	LED пакети 3000 K	28	0,56	0,58	0,41	0,69
	LED пакети 4000 K	23	-0,56		0,31	0,59
4	LED пакети 3000 K	22	-0,71	0,48	0,30	0,58
	LED пакети 4000 K	28	0,71		0,42	0,70
5 ($p = 43\%$)	LED пакети 3000 K	17	-2,36	0,02	0,20	0,45
	LED пакети 4000 K	35	2,36		0,55	0,80
6 ($p = 12\%$)	LED пакети 3000 K	27	0,57	0,57	0,41	0,69
	LED пакети 4000 K	22	-0,57		0,31	0,59
7	LED пакети 3000 K	29	0,69	0,49	0,42	0,69
	LED пакети 4000 K	23	-0,69		0,31	0,58

Као што се може видети из табеле 57, z-тест једног узорка за пропорције није показао статистички значајне разлике у субјективним доживљајима инсталација са LED пакетима придружене температуре боје 3000 K и 4000 K у погледу већине разматраних параметара (случајеви које карактерише $p > 0,05$). Једини изузеци су боја светлости ($p < 0,01$ (статистички веома значајно), у корист инсталације са светилкама придружене температуре боје 3000 K) и уочавање препреке светле боје ($0,01 < p < 0,05$ (статистички значајно), у корист инсталације са светилкама придружене температуре боје 4000 K). Ови показатељи су у складу са подацима датим у табели 56.

Занимљиво је да је у истраживању спроведеном у референци [61], које се бавило поређењем инсталација уличног осветљења реализованих помоћу светилки са натријумовим изворима светлости (придружена температура боје 2000 K) и LED светилки придружене температуре боје 4000 K, откривено да је већина испитаника преферирала боју светлости LED пакета придружене температуре боје 4000 K. Међутим, испитаници који су учествовали у овом истраживању сматрали су да је боја светлости LED пакета придружене температуре боје 3000 K прикладнија од LED пакета придружене температуре боје 4000 K. Могуће објашњење би се могло извести из значајне разлике у боји светлости између натријумових извора и LED пакета придружене температуре боје 3000 K (први се не могу описати као извори који емитују светлост беле боје).

Испитаници су дали следеће коментаре:

- коцке тамне боје нису могле да се виде ни у једној од тест зона (четири испитаника су дала коментаре сличне наведеном),
- интензитет осветљења је требало да буде већи у обе зоне (један испитаник), и светлост неутралне беле боје је омогућавала бољу видљивост и већу сличност возњи при дневној светлости, док је светлост топло-беле боје давала утисак вештачке светлости која негативно утиче на услове у возњи (један испитаник).

Из ових коментара се могу извести следећа два закључка:

- коментари (иако су их дала два учесника) су били у корист инсталације са LED пакетима придружене температуре боје 4000 K, и
- четири коментара на лошу видљивост тамноплавих коцки (у обе тест зоне) потврдили су да мале препреке са веома ниском рефлектансом нису прикладне за процену перформанси возача у ноћним условима.

6.4 Закључци

Једно од стратешких питања у LED уличном осветљењу је одређивање префериране боје светлости. С тим циљем, ово истраживање је било посвећено поређењу како објективних (квантитативних) параметара, тако и субјективних доживљаја возача (приликом стварне вожње) инсталација уличног осветљења реализованих помоћу LED пакета придружене температуре боје 3000 K (топло-бела боја светлости) и 4000 K (неутрална бела боја светлости). Две тест инсталације, које карактеришу упоредиви фотометријски параметри (првенствено ниво сјајности коловоза (који одговара М3 светлотехничкој класи улица)) и једнаки општи индекси репродукције боја, постављене су у истој улици.

Што се тиче објективне оцене, идентификована је незнатна предност у корист инсталације са светилкама придружене температуре боје 3000 K у вези са уочавањем малих препрека и пешака.

Субјективно поређење релевантних параметара осветљења обе инсталације изведено је коришћењем упитника. Од учесника, старости између 21 и 67 година (45 мушкараца и 8 жена), затражено је да изаберу погоднију од две инсталације у вези са сваким од шест разматраних параметара осветљења, као и да упореде њихове опште видљивости.

Већи број испитаника је оценио инсталацију осветљења са светилкама придружене температуре боје 3000 K као ону која обезбеђује донекле бољу општу видљивост. Предност LED пакета придружене температуре боје 3000 K такође је изражена за већину анализираних параметара, истичући да се оба изузетка – уочавање пешака и уочавање малих препрека светле боје на коловозу – односе на безбедност саобраћаја. Међутим, убедљива већина постојала је само у погледу избора боје светлости (у корист инсталације са светилкама придружене температуре боје 3000 K) и детекције препреке светле боје (у корист инсталације са светилкама придружене температуре боје 4000 K), што је потврђено статистичком анализом.

Сprovedено истраживање је имало неколико ограничења/изазова:

- истраживање у погледу објективне и субјективне оцене изведено је под сувом површином коловоза; резултати који се могу добити у условима мокре коловозне површине могу бити другачији,
- примењен је само ниво сјајности од 1 cd/m^2 ,
- за објективну евалуацију коришћена је мала мета само једне боје и рефлектансе; уз то, иако се користи деценијама и као таква је примењена у овом истраживању, STV метода представља само теоријску процену видљивости,
- коришћени су само фарови са халогеним сијалицама,
- истраживање је обављено у условима веома мале густине саобраћаја,
- старост возача није разматрана, иако знатно утиче на бљештање, и
- примењени су LED пакети једне спектралне расподеле снаге зрачења која се односи на придружене температуре боје од 3000 K (4000 K).

Као што је објашњено у поглављу 6.3.3, због кратког временског трајања вожње која је подразумевала субјективну оцену бројних параметара осветљења, могућност за квантификацијом визуелних перформанси није постојала. Међутим, експерименти с циљем прикупљања квантитативних података о визуелним перформансама учесника у вези са уочавањем малих мета и пешака могу и треба да буду спроведени у будућим студијама како би се обезбедили неопходни подаци за коначан закључак. Такви експерименти би могли засновани на времену и стопи уочавања предмета на коловозу. Постоје две могућности: да се користе симулатори вожње (који представљају знатно једноставнији приступ) или стварна вожња. Последње би дало поузданије резултате, али би било компликованије за реализацију. Највећи проблем би био како прецизно регистровати време појављивања предмета и време

његовог уочавања од стране возача, како би се добило време уочавања предмета. Додатни проблем би представљало утврђивање положаја аутомобила у тренутку појављивања објекта.

Због ових ограничења и чињенице да су резултати истраживања показали благу преференцију LED пакета придружене температуре боје 3000 K, представљени пилот пројекат може се сматрати почетним кораком ширег истраживања потребног за доношење коначне одлуке о одговарајућој боји светлости из угла возача, нудећи смернице за будућа истраживања у овој области.

7 ПОРЕЂЕЊЕ ЕНЕРГЕТСКЕ ЕФИКАСНОСТИ И ТРОШКОВА КОЈИ СЕ ОДНОСЕ НА КОНВЕНЦИОНАЛНЕ И LED ИНСТАЛАЦИЈЕ ОСВЕТЉЕЊА УЛИЦА И ПУТЕВА

Овај део докторске дисертације посвећен је адекватном поређењу LED светиљки са светиљкама са натријумовим изворима високог притиска или метал-халогеним изворима са керамичким гориоником (због њихове релативно високе цене, последње се углавном користе у богатим земљама), које се примењују за осветљење улица или путева намењених за моторизовани или мешовити саобраћај. Поређење је извршено са становишта потрошње електричне енергије и економских показатеља.

У погледу методологије, ово истраживање представља значајну надоградњу оног које је представљено у референци [102]. Први део методологије, намењен за одређивање оптималног (енергетски најефикаснијег) светлотехничког решења улица/путева, сада је уопштен. Његов други део, који се односи на прорачун трошкова, представљен је на општији начин него што је то урађено у референци [103]. Поред тога, дат је скуп нових и одговарајућих формула за прорачун свих трошкова одржавања LED светиљки. Из разлога наведених у претходним поглављима, разматране су LED светиљке и неутралне беле и топло-беле боје, а не само неутралне беле као у референци [102]. Будући да је због брзог развоја LED технологије потребно редовно ажурирати студије овог типа, ово истраживање се бавило тренутно доступним LED светиљкама са висококвалитетном оптиком и LED пакетима са животним веком од 100000 сати [104, 105] (у претходном истраживању коришћени су они са животним веком од 50000 сати [102]) и светлосне искористивости до 160 lm/W (у претходном истраживању коришћени су они од 90 lm/W). Поред стандардних LED пакета који се данас користе у светиљкама намењеним за осветљење улица/путева, узети су у обзир и они које карактерише светлосна искористивост од 190 lm/W, који се комерцијално могу очекивати у блиској будућности. Што се тиче економске анализе, поред утицаја стопе актуелизације и цене електричне енергије, спроведена анализа осетљивости обухватила је и утицај животног века LED пакета. Предностима које се могу остварити применом адаптивних система такође је посвећена пажња. За разлику од претходног истраживања, које је било засновано на препорукама CIE [12], ово истраживање је узело у обзир недавне светлотехничке захтеве које је наметнуо European Committee for Standardization [106]. С обзиром на то да се примена нових енергетски ефикасних технологија (као што је LED технологија) сматра примарном методом за смањење негативних утицаја на животну средину [107], изабрана су само светлотехничка решења са минималном инсталисаном снагом (а не и она са максималним растојањем између стубова као у претходном истраживању). Прорачун инсталисаних снага (потрошњи електричне енергије) упоредивих светлотехничких решења реализованих помоћу LED пакета (неутралне беле и топло-беле боје) и натријумових извора високог притиска, као и упоредивих решења реализованих помоћу LED пакета топло-беле боје и метал-халогених извора светлости (последње поређење није разматрано у претходном истраживању), обезбедио је податке о тренутно остваривим уштедама електричне енергије.

7.1 Преглед публикованих резултата у вези са енергетском ефикасношћу и трошковима у инсталацијама LED осветљења

Због енергетске ефикасности и уштеде трошкова, у току је масовни прелазак са конвенционалног на LED осветљење. У осветљењу улица/путева, које учествује са око 1,3% у укупној потрошњи електричне енергије у Европи [108] и са око 1% у глобалној потрошњи електричне енергије [109], LED пакети се генерално пореде са изворима светлости са

електричним пражњењем (натријумови извори високог притиска или метал-халогени извори) с циљем процене енергетске ефикасности, трошкова, квалитета осветљења и утицаја њихове примене на животну средину. Неке од бројних студија које се баве овим питањима представљене су у наставку, с циљем да се представе њихови доприноси и недостаци.

Град Ковентри је недавно заменио 29701 уличну светиљку са натријумовим изворима светлости LED светиљкама [110]. Економска анализа која је имала за циљ да упореди уштеде подразумевала је следећа два сценарија: замену постојећих светиљки LED светиљкама и увођење парцијалног система ноћног осветљења у постојеће инсталације осветљења. Анализа је извршена уз претпоставку периода експлоатације од 20 година (2010–2030), стопе актуелизације (годишња стопа приноса коју инвеститори очекују) од 3,5% и стопе инфлације од 2,4%. Показано је да би имплементација система парцијалног ноћног осветљења, који може бити од користи у краткорочном периоду, обезбедила уштеду енергије од 21% у односу на тренутну потрошњу електричне енергије, док би примена LED светиљки, која је повољна у дугорочном периоду, смањила потрошњу електричне енергије за 44%. Међутим, треба нагласити да недостају информације о релевантним параметрима који описују замењене и нове светиљке (избор (не)адекватних светиљки), као и о нивоима сјајности/осветљености улице/пута постигнутим пре и после замене. Очигледно је да акције замене светиљки које нису засноване на фотометријски еквивалентним светлотехничким решењима могу довести до увећаних или умањених уштеда било које врсте.

Испуњавајући светлотехничке захтеве дате у италијанском стандарду за класификацију путева, у студији случаја општине Комисо анализирана су следећа три сценарија за постизање уштеда енергије у уличном осветљењу: уградња система за регулацију светлосног флуksа (који обезбеђује 75% и 50% светлосног флуksа у односу на нормални режим осветљења) у постојећим инсталацијама (са 7674, претежно светиљки са натријумовим изворима високог притиска), замену постојећих LED светиљкама и истовремену примену оба наведена сценарија [111]. Закључено је да је уштеда енергије износила 45%, 37% и 66%, респективно. Иако су аутори применили поједностављени прорачун периода повраћаја новца, извршен тако што се нето капитална инвестиција подели са годишњим уштедама трошкова, њихови закључци су убедљиви: трећи сценарио је знатно повољнији од другог (периоди повраћаја су 10 и 16 година, респективно), док је први сценарио најповољнији (период повраћаја је само 4 године).

У референци [112] је извршена анализа трошкова животног циклуса (life cycle cost (LCC)) за инсталације осветљења путева са светиљкама са натријумовим изворима светлости и LED светиљкама. LCC анализа је узела у обзир инвестиционе трошкове, трошкове експлоатације (утрошена електрична енергија и одржавање) и преосталу вредност (трошкове на крају животног века, као што су трошкови рециклаже и демонтаже). Предвиђено је да светиљке раде 4000 сати годишње на путевима светлотехничке класе М4 [12] током периода експлоатације од 30 година. Као оптимална изабрана су растојања стубова од 50 m за светиљке са натријумовим изворима и 36 m за LED светиљке. Осим основног случаја, проучавано је шест различитих сценарија: удвостручење трошкова електричне енергије (основни случај: 0,1 €/kWh), искључење појединачне замене сијалица/светиљки, смањење цене LED светиљки, смањење животног века натријумовог извора светлости, повећање животног века LED светиљке и модуларност LED светиљке (замена делова светиљке који су у квару (LED модула и/или драјвера) уместо замене целе светиљке). Показано је да би LED светиљка постала економски повољнија (мањи LCC) од светиљке са натријумовим извором светлости, сви сценарији би морали да се одвијају истовремено. Иако је Финска агенција за саобраћај одобрила обе светиљке за употребу на путевима које карактерише светлотехничка класа М4, недостатак релевантних фотометријских параметара (ниво сјајности и равномерности, итд.) који одговарају одабраним растојањима између стубова спречава да се две инсталације

осветљења третирају као упоредиве. Уз то, LCC анализа није узела у обзир ниједну другу светлотехничку класу путева.

Користећи и традиционалну и методологију прилагођену разматраном случају, која је укључивала варијацију цене трошкова електричне енергије и имплементацију пројекта у фазама, у референци [113] процењена је замена 193045 конвенционалних светиљки намењених уличном осветљењу LED светиљкама. Израчунато је да је годишња уштеда енергије износила 70%. Уз претпоставку стопе трошкова електричне енергије од 0,19 €/kWh, годишње коришћење јавног осветљења од 4167 сати у оквиру пројектног периода од 12 година, очекивани животни век комерцијалних LED светиљки од 50000 сати и стопу актуелизације од 6,9% за традиционалну анализу, показано је да је вредност пројекта добијена анализом прилагођеном разматраном случају већа од оне добијене традиционалном анализом, јер је друга оптимистично претпостављала константну цену трошкова електричне енергије током дугог века трајања LED пакета (LED пакет садржи LED чип окружен пластичним кућиштем које може бити прекривено фосфором). Међутим, кратак период трајања пројекта од само 12 година и одсуство података о фотометријским параметрима осветљења улица/путева пре и после замене чине резултате студије упитним.

У пројекту реконструкције спроведеном у универзитетском кампусу у Палерму (Италија), који укључује улице, пешачке стазе, баште, итд., анализирани су енергетски, економски и социјални аспекти замене постојећих светиљки натријумовим и живиним изворима високог притиска LED светиљкама [114]. Показано је да се уштеде енергије до 84%, праћене значајним уштедама трошкова, могу постићи ако се примени димовање у новоизведеним инсталацијама осветљења. Спроведена анкета је показала одређеност за LED светиљке неутралне беле боје придружене температуре боје 4000 K (у поређењу са топло-белом бојом светлости), посебно међу возачима. Основни недостатак истраживања лежи у чињеници да није потврђена фотометријска (најважнија) адекватност замене натријумових извора високог притиска снаге 250 W и живиних извора високог притиска снаге 400 W LED изворима од 78 W, односно 118 W.

У студији случаја представљеној у референци [115] разматрано је седам путева намењених за моторизовани саобраћај осветљених LED светиљкама. Упоредјена су два сценарија који се баве уштедом електричне енергије. Први је подразумевао прилагођавање минималном нивоу сјајности који одговара тренутној М светлотехничкој класи или спуштање на нижу М класу [12], док се други заснивао на примени временског распореда димовања прилагођеног густини саобраћаја, због чега га карактерише мањи ризик од утицаја на безбедност у саобраћају него када се разматра нижа М светлотехничка класа. Резултати су показали да други сценарио има потенцијал за веће уштеде енергије (3445–5867 kWh/km годишње у поређењу са 2485–6299 kWh/km годишње).

У референци [116] је показано да је детекција објеката/предмета боља када се примењује осветљење широког спектра (LED) него када се користи осветљење са натријумовим изворима високог притиска при једнакој осветљености улице/пута или једнаком нивоу сјајности. Други закључак је био да би LED осветљење, чак и оно које карактерише нижи ниво сјајности/осветљености, обезбедило веће растојање детекције од осветљења са натријумовим изворима високог притиска.

Три система јавног осветљења (натријумови извори високог притиска, метал-халогени и LED извори) постављена на бетонској пешачкој стази упоређена су квантитативно и квалитативно [117]. Показано је да LED пакети представљају најбољу опцију у погледу енергетске ефикасности и безбедности (што се тиче последњег, локални корисници су оцењивали да ли се осећају безбедно када ноћу ходају сами по разматраној стази). Квантитативна анализа, која је укључивала мезопске ефекте, показала је да би повећање перцепције сјајности, коју обезбеђују LED или метал-халогени извори светлости, било мање

ако би се за прорачун користила метода представљена у референци [118] него када би се користила CIE метода [119]. Главни недостатак истраживања лежи у чињеници да су се упоређене средње хоризонталне осветљености знатно разликовале (њихов максимални однос износио је 1,46), као и у томе да су оне биле 3,1–4,6 пута веће од минималног потребног нивоа осветљености (10 lx за CIE светлотехничку класу P2 [12]). Такође, примењени LED пакети придружене температуре боје од чак 6500 K тешко се могу сматрати адекватним за осветљење пешачких стаза.

Иако сведено на LED осветљење једне (приградске) улице (са две саобраћајне траке, намењене за двосмерни саобраћај), истраживање које се бави могућношћу уштеда електричне енергије применом сценарија димовања и мезопских ефеката заслужује да се помене, јер делује да не поседује ни теоријске ни експерименталне недостатке [120]. Размотрена су три различита сценарија осветљења. У основном сценарију (сценарио број 3) остварени су услови за светлотехничку класу M4 и одржавани константним током периода укљученог осветљења. У првом сценарију нивои сјајности улице били су у складу са светлотехничким класама M4, M5 и M6 (износили су 0,75 cd/m², 0,5 cd/m² и 0,3 cd/m², респективно [12]), у зависности од доба ноћи. У другом сценарију ниво фотопске сјајности за сваку од три M светлотехничке класе смањен је узимајући у обзир мезопске ефекте (према CIE методи [119]). Резултати су показали да је потрошња електричне енергије у основном сценарију за око 82% већа него у првом сценарију, као и да је укључење мезопских ефеката омогућило додатне годишње уштеде електричне енергије од скоро 15%.

У истраживању представљеном у референци [121], које се бавило проценом потенцијала употребе LED пакета у јавном осветљењу, укратко је представљено 26 студија (2008–2012) које су се бавиле поређењем конвенционалних (углавном са натријумовим изворима високог притиска) са LED инсталацијама осветљења улица/путева. Међутим, уместо да задовоље услове еквивалентних (практично једнаких) нивоа фотопске или мезопске сјајности и све захтеве који одговарају разматраној светлотехничкој класи улице/пута, ове студије су углавном поредиле инсталације осветљења улица/путева реализоване помоћу постојећих (конвенционалног типа) и произвољно одабраних LED светиљки различитог типа и снаге. Ово је спречило постизање релевантних закључака у погледу енергетске ефикасности LED у односу на конвенционалне инсталације осветљења улица/путева.

У експерименталној студији случаја у референци [11] упоређени су релевантни параметри квалитета инсталација осветљења са натријумовим и LED светиљкама. Нивои фотопске или мезопске сјајности на разматраним деловима уличног осветљења били су упоредиви (практично једнаки) и били су испуњени сви фотометријски захтеви релевантни за разматрану светлотехничку класу M3 [12]. Ово истраживање је показало да примена LED уместо светиљки са натријумовим изворима високог притиска обезбеђује око 31% мању потрошњу електричне енергије у нормалном режиму осветљења. Укључивање различитих сценарија димовања омогућило је укупну уштеду електричне енергије од око 50%, која се повећава за додатних 10% ако се у обзир узму мезопски ефекти. Међутим, ова анализа се односила само на један тип улице/пута који припада светлотехничкој класи M3 (са једном саобраћајном траком за сваки смер и једностраним распоредом стубова).

У референци [122] извршена је анализа економске оправданости замене постојећих натријумових светиљки (са изворима светлости снаге 100 W) новим LED светиљкама (са светлошћу неутралне беле боје и снаге 80 W) на саобраћајници светлотехничке класе M3. Циљ истраживања је био да се провери да ли ће новац уштеђен смањеном потрошњом електричне енергије и мањим трошковима одржавања (који су последица дужег животног века LED пакета) бити довољан да покрије инвестиционе трошкове (куповину и монтажу нових LED светиљки), и то у периоду од 10 година (од тренутка замене до краја предвиђеног експлоатационог периода светиљки од 20 година). Због непромењене дужине напајане трасе,

односно броја стубова на њој, метода актуелизације трошкова је уместо на целу инсталацију уличног осветљења примењена на само једну светиљку. Поређењем два сценарија – замена натријумових светиљки (старих 10 година) LED светиљкама са и без имплементације телеменаџмент система – констатовано је да замена није оправдана са економског аспекта, односно да експлоатациони период од 10 година није довољан да се, чак и уз примену уређаја за редукцију светлосног флукса, инвестиција отплати кроз уштеде у потрошњи електричне енергије и одржавању.

У референци [102] упоређене су LED светиљке и светиљке са натријумовим изворима високог притиска намењене за осветљење улица/путева у погледу потрошње и трошкова електричне енергије, анализирајући две опције: ону где мезопски ефекти нису узети у обзир и другу где су они узети у обзир. Размотрене су све релевантне светлотехничке класе улица/путева (M1–M6) и сви распореди стубова. Закључено је да су уштеде енергије често занемарљиве ако се у обзир не узму мезопски ефекти. Почетни (инвестициони) трошкови, трошкови за утрошену електричну енергију и трошкови одржавања (сведени на крај периода експлоатације) израчунати су за сваки од разматраних случајева коришћењем формула које су изведене у референци [103]. Показано је да су укупни трошкови за LED светлотехничка решења (чак и када се у обзир узму мезопски ефекти) били 1,36–6,44 пута већи од одговарајућих трошкова који се односе на разматрана фотометријски еквивалентна светлотехничка решења са натријумовим изворима високог притиска. Примењена методологија није укључивала трошкове одржавања који се односе на периодичну групну замену LED драјвера. Из тог разлога и, што је још важније, због значајних побољшања LED технологије која су се догодила у међувремену, приказани резултати су застарели, што потврђују и резултати истраживања представљени у предметној дисертацији.

Због негативних реакција јавности [37], LED пакети хладно-беле боје нису примењени у предметном истраживању. Пошто тренутно не постоје препоруке у вези са преферираном бојом светлости у уличном осветљењу [123], у овом истраживању су примењени LED пакети и неутралне беле и топло-беле боје, које карактерише општи индекс репродукције боја не мањи од 80 (општи индекс репродукције боја указује на способност извора светлости да на одговарајући начин прикаже боје објеката). Иако пројектанти осветљења обично бирају LED пакете неутралне беле боје, који су енергетски ефикаснији од LED пакета топло-беле боје, разлика између њихове енергетске ефикасности (светлосне искористивости, изражене у lm/W) стално се смањује (на пример, светлосна искористивост LED пакета неутралне беле боје придружене температуре боје 4000 K само је 6% већа него код LED пакета топло-беле боје придружене температуре боје 3000 K, при истом општем индексу репродукције боја од 80 [58], док је пет година раније разлика била 25%).

Одрживо осветљење улица/путева подразумева разматрање свих његових негативних утицаја на здравље људи (оштећење мрежњаче [51,124], поремећен циркадијални ритам [125, 126], итд.), екосистеме (и биљке и животиње) [127, 128], светлосно загађење (углавном бљештање, нежељено осветљавање околних објеката и сјај неба) [129, 130], исцрпљивање племенитих метала (на пример, злато и сребро) и критичних метала (на пример, галијум, итријум и церијум), од којих су сви неопходни за производњу LED чипова [131] итд. На основу Агенде за одрживи развој 2030, коју су усвојиле све чланице Уједињених нација 2015. године [132], истраживање у референци [133] било је прво у успостављању оквира од 84 индикатора одрживости за спољно осветљење, подељених на три димензије (екологију и животну средину, економију и друштвену и друштво). Генерално на основу анализе 16 шведских општинских мастерпланова за осветљење, у референци [134] је недавно предложено 28 нових индикатора одрживости (10 у димензији екологије и животне средине, и 18 у димензији друштвеног и друштва). У референци [134] је наглашено да индикатори који се односе на LED осветљење

нису лаки за коришћење због недостатка знања или широко прихваћених система вредновања у одређеним областима.

Поновимо да постоје и друга истраживања која имају поменути недостатак поређења потрошње електричне енергије и/или почетних, укупних и других трошкова у инсталацијама осветљења улица/путева које карактеришу значајно различити (или чак нису узети у обзир) нивои сјајности/осветљености, где су врло вероватни погрешни закључци о оствареним уштедама електричне енергије/трошкова. Поменута истраживања су ретко узимала у обзир мезопске ефекте, релевантне за моторизовани и мешовити саобраћај. Њихово укључивање пружа могућност смањења нивоа фотопске сјајности LED осветљења улице/пута (обично праћено смањењем укупне инсталисане снаге на разматраној деоници улице/пута), јер беле LED пакете карактерише приметна емисија у области плаве боје, чиме је омогућена боља перцепција светлости возача у мезопским условима од перцепције светлости натријумових извора високог притиска.

Анализа постојећих истраживања која су претходно представљена показала је да:

- у великом броју случајева рађена су истраживања која се односе на осветљење једне улице/пута, због чега њихови резултати немају општу вредност,
- у многим случајевима, упоређене инсталације осветљења улица/путева нису биле фотометријски еквивалентне (не карактерише их приближно једнак ниво сјајности/осветљености), на тај начин спречавајући постизање вредних закључака у погледу показатеља енергетске ефикасности и трошкова,
- у већини случајева нису узети у обзир мезопски ефекти, што је онемогућавало постизање оптималних уштеда електричне енергије применом LED пакета у осветљењу улица/путева,
- у неким случајевима коришћени су LED пакети неодговарајуће боје светлости,
- постојећим истраживањима генерално недостаје примена адекватне методе економског поређења различитих светлотехничких решења, што је могло да спречи важне одлуке о осветљењу улица/путева (од стране владе, градских власти и др.), и
- извршене економске анализе не садрже адекватну анализу осетљивости.

Применом одговарајуће методе у овом истраживању превазиђени су сви наведени недостаци. Размотрена су три типа извора светлости који се најчешће користе у осветљењу улица/путева (натријумови извори високог притиска, метал-халогени и LED извори). Анализиране су све релевантне улице/путеви, које карактеришу различите светлотехничке класе типа М, различити бројеви саобраћајних трака и различити распореди стубова. Упоређена су само фотометријски еквивалентна светлотехничка решења, применом представљене опште процедуре. Мезопски ефекти су такође анализирани кроз једноставан приступ [21]. Ово истраживање је показало да се ови ефекти оптимално могу узети у обзир ако су подржани употребом адаптивних система који омогућавају одговарајуће промене нивоа сјајности. Такође је показано да треба применити само LED пакете неутралне беле или топло-беле боје. Предложена је унапређена процедура економског поређења различитих светлотехничких решења, а примењена анализа осетљивости обухватила је три важна параметра: стопу актуелизације, цену електричне енергије и животни век LED пакета.

7.2 Методологија за одређивање енергетски најефикаснијих светлотехничких решења

Технички извештај EN 13201:1 [135] и европски стандарди EN 13201:2–4 [93, 106, 136] садрже критеријуме за улице/путеве намењене за моторизовани или мешовити саобраћај у

вези са следећим фотометријским параметрима: погонска (експлоатациона) средња сјајност, која се такође назива ниво сјајности (L_{av}), општа и подужна равномерност сјајности (U_0 и U_l , респективно), релативни пораст прага (TI) и коефицијент ивичне осветљености (EIR). Наведено ограничење за сваки од пет параметара зависи од светлотехничке класе улице/пута, одређеног густином саобраћаја и другим релевантним карактеристикама разматране улице/пута.

Општи улазни подаци потребни за фотометријске прорачуне и прорачуне енергетске ефикасности су следећи (опсеги/вредности коришћени у овом истраживању дати су у заградама):

- висина стуба (H) (7–8 m за једнострану, цик-цак и наспрамну распоред стубова, и 8–10 m и 12–13 m за централну распоред стубова на градским улицама и аутопутевима, респективно (све са кораком од 1 m)),
- стандардна рефлексиона класа површине коловоза ($R3$, коју карактерише средњи коефицијент сјајности $Q0 = 0,07 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$),
- ширина саобраћајне траке (3,5 m за светлотехничке класе $M1$ – $M4$ и 3 m за светлотехничке класе $M5$ и $M6$),
- ширина централног појаса (3 m),
- растојање између стуба и ближе ивице коловоза (1 m за једнострану, цик-цак и наспрамну распоред стубова и 1,5 m за централну распоред стубова),
- угао нагиба светилке (α), дефинисан као угао између равни отвора оптичког система светилке и равни коловоза (0 – 10° , вариран са кораком од 5°),
- превес светилке (o), дефинисан као растојање између пројекције оптичког центра светилке на улицу/пут и ближе ивице коловоза (ако је оптички центар светилке пројектован на коловоз, превес светилке је позитиван, у супротном је негативан) (превес светилке је једнак $L_b + L_{lum}/2 - 1$ (m) за једнострану, цик-цак и наспрамну распоред стубова и $L_b + L_{lum}/2 - 1,5$ (m) за централну распоред стубова, где је L_b дужина лире (до 2 m, варирана са кораком од 0,5 m), а L_{lum} дужина светилке),
- снага (P_{lamp}) и светлосни флуks натријумових извора високог притиска (70 W (6600 lm), 100 W (10,700 lm), 150 W (17,500 lm) и 250 W (33,200 lm)),
- снага (P_{lamp}) и светлосни флуks метал-халогених извора са керамичким горионом топло-беле боје (70 W (7500 lm), 100 W (10,500 lm), 150 W (16,500 lm) и 250 W (28,300 lm)),
- тип сваке од изабраних конвенционалних светилки (Onyx 2 [137], Citea Mini и Citea Midi [138] за натријумове изворе и Onyx 2 и Citea Midi за метал-халогене изворе, све произведене од стране Schröder Group),
- тип и снага (P_{lum}), са одговарајућим светлосним флуksом, у зависности од врсте LED пакета – неутрална бела или топло-бела боја, сваке од изабраних LED светилки (Ampere Mini (16 LED пакета: 36,1 W и 24 LED пакета: 53 W), Ampere Midi (32 LED пакета: 70 W, 48 LED пакета: 103 W и 64 LED пакета: 136 W), Ampere Maxi (80 LED пакета: 165 W) [139] и Voltana 1–5 (31 W, 56 W, 80 W, 110 W и 212 W) [140], све произведене од стране Schröder Group), и
- фактор одржавања светилке (MF), који представља параметар који показује смањење светлосног флуksа светилке у погонском периоду (како због опадања светлосног флуksа извора светлости, тако и због запрљања оптичких делова светилке) (0,81 за натријумове изворе високог притиска и 0,71 за метал-халогене изворе [141], као и 0,76 за LED светилке (фактор опадања светлосног флуksа извора 0,9 и фактор запрљања светилке 0,85)).

У циљу добијања фотометријски еквивалентних светлотехничких решења коришћењем натријумових (метал-халогених) и LED извора, извршени су фотометријски прорачуни за све

релевантне светлотехничке класе улица/путева (M1–M6) и распореде стубова (једностранни, цик-цак, наспрамни и централни) коришћењем Solution Finder модула последње верзије софтвера Ulysse, који је развила Schréder Group [42]. Након одабира поступка прорачуна (према CIE 140–2019 [142], IES RP-8 [143] или EN 13201-3 [93], од којих је последњи коришћен у овом истраживању), потребно је одредити/одабрати следеће улазне податке (слика 23а садржи податке који описују једну инсталацију уличног осветљења):

- светлотехничка класа улице/пута, распоред стубова и врста саобраћаја (моторизовани/мешовити или пешачки),
- удаљеност стубова од ближе ивице коловоза и опсези висине и растојања између стубова, као и угао нагиба и превеса светиљке, са одговарајућим кораком за сваки од њих (као што је описано изнад, опсег превеса светиљке зависи од усвојеног опсега дужина лире),
- број саобраћајних трака и њихова ширина, и
- стандардна рефлексiona класа коловоза или табела рефлексije површине коловоза (изабрана из одговарајуће базе података).

Следећи корак је избор листе жељених светиљки из софтверске базе светиљки (заједно са избором фактора одржавања светиљке за сваку од њих). Светиљке које се разматрају у одређеном пројекту осветљења увозе се из изабране листе (слика 23б). Толеранцију нивоа сјајности (средња погонска сјајност) (5% у овом истраживању) и толеранцију равномерности сјајности (опште и подужне) (3% у овом истраживању) такође треба подесити. Резултат прорачуна је представљен свим светлотехничким решењима која задовољавају фотометријске захтеве који одговарају одабраној светлотехничкој класи улице/пута (слика 24). Треба напоменути да за сваку од разматраних светиљки (и сваки од изабраних извора светлости) треба повећавати растојање између стубова (у итерацијама) док се не добије максимално растојање између стубова, које одговара енергетски најефикаснијем светлотехничком решењу. За сваки од анализираних случајева (светлотехничке класе M1–M6 и 4 различита распореда стубова) упоређена су светлотехничка решења добијена за различите светиљке које садрже исти тип извора светлости у погледу укупне инсталисане снаге на разматраној деоници улице/пута дужине 1 km (изражено у kW/km), а за оптимално се бира оно које карактерише најмања снага. Ако су укупне снаге једнаке за различите светиљке које садрже исти тип извора светлости, као оптимално решење се бира оно које карактерише веће растојање између стубова, а ако су растојања између стубова једнака, оптимално решење је оно које карактерише већи ниво сјајности. Добијена светлотехничка решења су описана усклађеношћу (светлотехничка решења са зеленим знаком нису узела у обзир ни толеранцију сјајности ни равномерности сјајности, док она са наранџастим знаком јесу), растојањем између стубова, висином стуба, превесом светиљке, углом нагиба светиљке, типом светиљке, бројем матрице (табела светлосног интензитета светиљке, која представља основни фотометријски документ сваке светиљке), флуksom светиљке, фактором одржавања светиљке, погонском минималном и средњом сјајношћу, општом равномерношћу сјајности, градијентом равномерности сјајности, U_g , (који није узет у обзир у разматраном EN стандарду), подужним равномерностима сјајности, релативним порастом прага, коефицијентом ивичне осветљености и укупном снагом на деоници улице/пута дужине 1 km (слика 24).



Assistant (Standard solution finder)

Design Fixture Result

Drag a column header here to group by that column.

									Road										
	Co...	Spaci...	Height	Over...	Incli...	Fixture	Matrix n...	Flux	MF	LMin	LÁve	Uo	Ug	UI1	UI2	UI3	TI	EIR	kW/...
✓	13,00	7,00	1,25	5,0	VOLTANA 1 8 LE...	360112	2,721	0,76	0,40	0,76	53	37	75	96	75	10,7	0,36	2,4	
✓	13,00	7,00	1,25	10,0	VOLTANA 1 8 LE...	360112	2,721	0,76	0,33	0,76	43	30	80	94	80	9,9	0,31	2,4	
✓	12,00	7,00	0,75	0,0	VOLTANA 1 8 LE...	360112	2,721	0,76	0,42	0,75	55	38	90	98	90	10,6	0,49	2,6	
✓	12,00	7,00	1,25	0,0	VOLTANA 1 8 LE...	360112	2,721	0,76	0,51	0,79	64	45	85	97	85	10,3	0,41	2,6	
✓	12,00	7,00	0,75	5,0	VOLTANA 1 8 LE...	360112	2,721	0,76	0,56	0,79	71	50	86	95	86	10,3	0,42	2,6	
✓	12,00	7,00	1,25	5,0	VOLTANA 1 8 LE...	360112	2,721	0,76	0,44	0,82	53	39	80	97	80	10,1	0,36	2,6	
✓	12,00	7,00	0,25	10,0	VOLTANA 1 8 LE...	360112	2,721	0,76	0,60	0,77	77	56	86	94	87	10,2	0,42	2,6	
✓	12,00	7,00	0,75	10,0	VOLTANA 1 8 LE...	360112	2,721	0,76	0,47	0,81	58	43	83	96	83	10,3	0,36	2,6	
✓	12,00	7,00	1,25	10,0	VOLTANA 1 8 LE...	360112	2,721	0,76	0,34	0,83	42	29	83	96	83	9,3	0,31	2,6	
✓	12,00	8,00	1,25	0,0	VOLTANA 1 8 LE...	360112	2,721	0,76	0,48	0,77	62	48	89	96	89	8,0	0,46	2,6	
✓	12,00	8,00	0,75	5,0	VOLTANA 1 8 LE...	360112	2,721	0,76	0,50	0,77	65	50	89	95	89	8,1	0,45	2,6	
✓	12,00	8,00	1,25	5,0	VOLTANA 1 8 LE...	360112	2,721	0,76	0,40	0,80	50	37	86	96	86	8,0	0,39	2,6	
✓	12,00	8,00	0,25	10,0	VOLTANA 1 8 LE...	360112	2,721	0,76	0,52	0,75	68	53	89	93	89	8,2	0,44	2,6	
✓	12,00	8,00	0,75	10,0	VOLTANA 1 8 LE...	360112	2,721	0,76	0,42	0,78	54	41	85	96	85	8,1	0,37	2,6	
✓	12,00	8,00	1,25	10,0	VOLTANA 1 8 LE...	360112	2,721	0,76	0,34	0,80	42	30	83	96	83	7,8	0,32	2,6	
✓	11,00	7,00	0,25	0,0	VOLTANA 1 8 LE...	360112	2,721	0,76	0,30	0,76	40	25	87	97	87	10,2	0,58	2,8	
✓	11,00	7,00	0,75	0,0	VOLTANA 1 8 LE...	360132	2,721	0,76	0,46	0,75	61	47	96	94	96	7,2	0,43	2,8	
✓	11,00	7,00	0,75	0,0	VOLTANA 1 8 LE...	360112	2,721	0,76	0,46	0,82	55	38	91	96	91	10,0	0,49	2,8	
✓	11,00	7,00	1,25	0,0	VOLTANA 1 8 LE...	360132	2,721	0,76	0,39	0,77	50	38	95	96	95	6,5	0,38	2,8	
✓	11,00	7,00	1,25	0,0	VOLTANA 1 8 LE...	360112	2,721	0,76	0,56	0,87	65	45	89	97	89	9,7	0,41	2,8	
✓	11,00	7,00	-0,25	5,0	VOLTANA 1 8 LE...	360112	2,721	0,76	0,36	0,75	48	30	88	98	88	10,1	0,59	2,8	
✓	11,00	7,00	0,25	5,0	VOLTANA 1 8 LE...	360112	2,721	0,76	0,51	0,81	62	44	92	95	92	9,9	0,49	2,8	
✓	11,00	7,00	0,75	5,0	VOLTANA 1 8 LE...	360132	2,721	0,76	0,43	0,75	58	44	93	94	93	7,1	0,40	2,8	
✓	11,00	7,00	0,75	5,0	VOLTANA 1 8 LE...	360112	2,721	0,76	0,61	0,86	70	50	89	92	89	9,7	0,42	2,8	

OK

Cancel

Слика 24. Снимак екрана различитих светлотехничких решења за саобраћајницу дефинисану на слици 23а

База података о светилкама софтвера Ulysse садржи табелу светлосног интензитета и друге релевантне (претежно фотометријске и електричне) податке за сваку светилку произведену од стране Schréder Group и, према томе, за сваку светилку разматрану у овом истраживању. Иако постоје бројни софтверски пакети потврђени у пракси пројектовања осветљења улица/путева (DIALux, Calculux, Relux, AGi32, итд.), доступност релевантних података за све светилке разматране у овом истраживању, као и чињеница да је Ulysse професионални софтвер који се деценијама користи широм света (видети, на пример, референце [144, 145]), пресудно су утицали на избор софтвера Ulysse за ово истраживање.

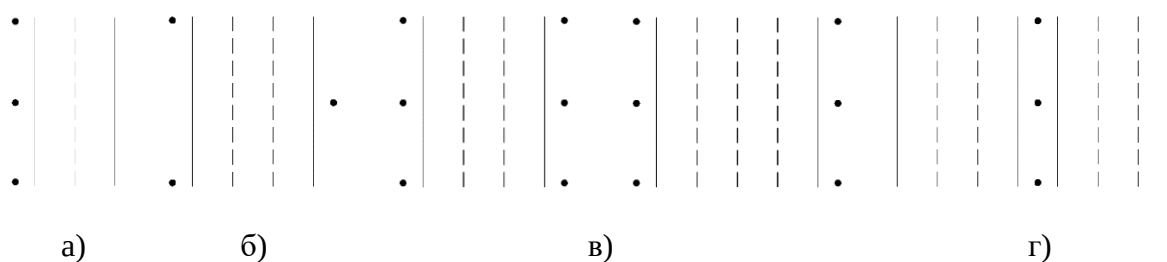
Препоручује се да се мезопски ефекти узму у обзир при фотометријским прорачунима за улице/путеве намењене за моторизовани/мешовити саобраћај. У овом истраживању, укључење мезопских ефеката у прорачунима са LED светилкама неутралне беле или топло-беле боје светлости, спроведено је коришћењем коригованих (смањених) нивоа фотопске сјајности који одговарају светлотехничким класама M1–M6, преузетим из референце [21]. Они су дати у табели 58 – усвојени односи скотопског и фотопског флуksа (S/P) били су 1,60 (неутрална бела боја светлости) и 1,35 (топло-бела боја светлости) [146]).

Табела 58. Фотопски и одговарајући мезопски (кориговани фотопски) нивои сјајности који важе за CIE стандардне светлотехничке класе улица/путева (M1 (2 cd/m²) – M6 (0,3 cd/m²)) и разматране LED изворе неутралне беле и топло-беле боје светлости

	LED неутралне беле боје						LED топло-беле боје					
Фотопски ниво сјајности (cd/m ²)	2,00	1,50	1,00	0,75	0,50	0,30	2,00	1,50	1,00	0,75	0,50	0,30
Кориговани фотопски ниво сјајности (cd/m ²)	1,90	1,40	0,91	0,67	0,43	0,25	1,92	1,42	0,92	0,68	0,45	0,26

7.3 Конвенционално у поређењу са LED осветљењем улица и путева: показатељи енергетске ефикасности

Разматрани случајеви (укупно 17) обухватају улице/путеве са различитим распоредом стубова и различитим бројем саобраћајних трака (приказаних на слици 25), као и са различитим М светлотехничким класама. За сваки од анализираних случајева у табелама 59 и 60 приказана су оптимална светлотехничка решења добијена коришћењем светиљки са натријумовим и метал-халогеним изворима. У табелама 61 и 62 приказана су оптимална светлотехничка решења добијена коришћењем LED светиљки, одређена без уважавања мезопских ефеката, односно узимајући их у обзир. Да би се сагледале предности изражене уштедама електричне енергије применом LED уместо натријумових или метал-халогених светиљки, табела 63 садржи само односе између одговарајућих инсталисаних снага (потрошње електричне енергије) дуж деонице улице/пута дужине 1 km, који важе за светлотехничка решења помоћу LED светиљки (неутралне беле и топло-беле боје) и светиљки са натријумовим изворима високог притиска, као и за светлотехничка решења помоћу LED светиљки топло-беле боје и светиљки са метал-халогеним изворима. Треба нагласити да је узето да је инсталисана снага светиљки са натријумовим и метал-халогеним изворима, која укључује снагу предспојног уређаја, 15% већа од снаге сијалице, док су снаге LED светиљки преузете из поглавља 7.2 (оне већ укључују снаге одговарајућих драјвера). С обзиром на то да снага предспојног уређаја намењеног за светиљке са натријумовим и метал-халогеним изворима зависи од његовог типа (квалитета), старости и одговарајуће снаге сијалице, обично се узима да она износи 15% снаге сијалице. На пример, снага предспојног уређаја једног произвођача, који је намењен за натријумове и метал-халогене изворе снаге 150 W, креће се од 17 W (око 11%) до 26 W (око 17%) [147]. У референци [148] је констатовано да су снаге предспојног уређаја које одговарају натријумовим изворима од 100 W, 150 W и 250 W износиле 14%, 15% и 13% од снаге сијалице, респективно, а у референци [28] да је снага предспојног уређаја намењеног натријумовом извору од 150 W износила 17% снаге сијалице.



Слика 25. Различити распореди стубова (једнострани (а), цик-цак (б), наспрамни (две конфигурације) (в), централни (г) примењени на улицама/путевима са различитим бројем саобраћајних трака разматраних у овом истраживању

Табела 59. Основни подаци о оптималним светлотехничким решењима разматраних улица/путева реализованим помоћу светиљки са натријумовим изворима високог притиска

Распоред стубова	Светло-техничка класа	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lamp} (W)	Тип светиљке	kW/km
Једнострани две траке	M3	36	8	1,37	10	1,08	46	60	14,6	0,42	100	Onyx 2	3,2
	M4	31	7	1,25	5	0,73	39	61	12,2	0,35	70	Citea Mini	2,6
	M5	46	8	1,25	5	0,55	35	39	13,0	0,43	70	Citea Mini	1,7
	M6	46	8	-0,21	10	0,43	43	39	15,9	0,62	70	Citea Midi	1,7
Цик-цак три траке	M3	18	8	1,25	10	1,00	45	69	9,6	0,50	70	Citea Mini	4,5
	M4	21	8	0,87	10	0,75	40	69	9,7	0,55	70	Onyx 2	3,8
	M5	35	8	1,37	5	0,51	37	39	12,1	0,56	70	Onyx 2	2,3
Наспрамни три траке	M2	25	7	1,25	5	1,47	52	69	9,1	0,40	70	Citea Mini	6,4
	M3	37	8	1,25	10	0,98	44	64	13,3	0,50	70	Citea Mini	4,4
	M4	40	8	0,25	10	0,84	53	59	11,8	0,56	70	Citea Mini	4,0
Наспрамни четири траке	M1	25	8	1,37	10	1,98	54	69	9,9	0,45	100	Onyx 2	9,2
	M2	20	7	1,37	0	1,46	44	79	9,8	0,50	70	Onyx 2	8,1
	M3	31	7	1,25	10	0,96	45	69	12,7	0,49	70	Citea Mini	5,2
Централни три траке (градске улице)	M1	23	10	0,87	10	1,92	41	79	8,6	0,47	150	Onyx 2	15,0
	M2	31	10	0,87	10	1,43	40	74	9,9	0,47	150	Onyx 2	11,2
Централни три траке (аутопут)	M1	42	13	0,87	0	1,91	41	68	9,5	0,56	250	Onyx 2	13,7
	M2	32	13	0,87	5	1,45	39	77	9,7	0,56	150	Onyx 2	10,8

Табела 60. Основни подаци о оптималним светлотехничким решењима разматраних улица/путева реализованим помоћу светиљки са метал-халогеним изворима

Распоред стубова	Светло-техничка класа	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lamp} (W)	Тип светиљке	kW/km
Једнострани две траке	M3	34	8	1,37	5	1,03	40	63	14,9	0,37	100	Onyx 2	3,3
	M4	29	7	0,87	5	0,72	53	64	11,4	0,40	70	Onyx 2	2,8
	M5	41	8	0,87	0	0,53	42	41	11,6	0,53	70	Onyx 2	2,0
	M6	45	8	-0,13	10	0,39	46	39	13,7	0,65	70	Onyx 2	1,8
Цик-цак три траке	M3	17	7	0,87	10	0,98	39	68	10,9	0,51	70	Onyx 2	4,7
	M4	21	8	1,37	10	0,75	41	72	9,8	0,54	70	Onyx 2	3,8
	M5	35	8	1,37	5	0,51	37	39	12,4	0,56	70	Onyx 2	2,3
Наспрамни три траке	M2	24	7	1,30	5	1,47	51	71	9,3	0,39	70	Citea Midi	6,7
	M3	34	8	1,30	10	0,99	41	59	12,5	0,44	70	Citea Midi	4,7
	M4	37	8	-0,21	10	0,73	47	59	12,9	0,53	70	Citea Midi	4,4
Наспрамни четири траке	M1	22	8	1,37	10	1,94	58	76	9,2	0,45	100	Onyx 2	10,5
	M2	20	7	1,37	0	1,45	44	79	10,0	0,50	70	Onyx 2	8,1
	M3	28	7	1,30	10	1,00	43	59	10,3	0,40	70	Citea Midi	5,8
Централни три траке (градске улице)	M1	19	10	0,87	10	1,96	40	79	9,4	0,49	150	Onyx 2	18,2
	M2	25	10	0,87	10	1,46	42	80	8,9	0,47	150	Onyx 2	13,8
Централни три траке (аутопут)	M1	20	13	0,37	10	1,93	39	91	9,6	0,56	150	Onyx 2	17,3
	M2	18	13	0,87	5	1,44	40	96	9,7	0,55	100	Onyx 2	12,8

Табела 61. Основни подаци о оптималним светлотехничким решењима разматраних улица/путева реализованим помоћу LED светиљки неутралне беле боје у фотопским и мезопским условима

Фотопски услови													
Распоред стубова	Светло-техничка класа	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lum} (W)	Тип светиљке	kW/km
Једнострани две траке	M3	36	8	1,29	0	0,98	45	77	12,3	0,30	53	Ampera Mini 24	1,5
	M4	32	8	1,29	0	0,73	44	85	10,4	0,30	36,1	Ampera Mini 16	1,1
	M5	48	8	1,29	0	0,54	34	41	13,8	0,30	36,1	Ampera Mini 16	0,8
	M6	45	8	-0,25	10	0,30	41	39	15,4	0,30	31	Voltana 1	0,7
Цик-цак три траке	M3	18	7	0,79	5	1,02	39	65	11,6	0,30	36,1	Ampera Mini 16	2,0
	M4	22	8	0,29	10	0,77	39	64	10,4	0,34	36,1	Ampera Mini 16	1,6
	M5	37	8	1,29	0	0,48	35	41	14,7	0,40	36,1	Ampera Mini 16	1,0
Наспрамни три траке	M2	23	8	0,29	0	1,47	73	90	9,9	0,45	36,1	Ampera Mini 16	3,1
	M3	36	7	0,29	0	0,97	55	60	14,9	0,42	36,1	Ampera Mini 16	2,0
	M4	43	8	0,29	0	0,72	43	59	15,0	0,44	36,1	Ampera Mini 16	1,7
Наспрамни четири траке	M1	22	8	1,29	0	1,95	48	90	9,8	0,36	53	Ampera Mini 24	4,8
	M2	19	7	-0,21	10	1,44	58	89	10,0	0,37	36,1	Ampera Mini 16	3,8
	M3	30	7	1,29	0	0,97	39	82	11,7	0,31	36,1	Ampera Mini 16	2,4
Централни три траке (градске улице)	M1	15	8	0,84	0	1,93	40	88	9,8	0,44	70	Ampera Midi 32	9,3
	M2	16	10	0,29	10	1,43	39	88	8,8	0,42	53	Ampera Mini 24	6,6
Централни три траке (аутопут)	M1	40	13	0,45	0	1,93	39	80	9,2	0,47	165	Ampera Maxi 80	8,3
	M2	41	13	0,84	5	1,44	43	71	8,8	0,39	136	Ampera Midi 64	6,6
Мезопски услови													
Распоред стубова	Светло-техничка класа	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lum} (W)	Тип светиљке	kW/km
Једнострани две траке	M3	41	8	1,29	0	0,86	41	62	13,6	0,30	53	Ampera Mini 24	1,3
	M4	37	8	1,29	0	0,63	44	74	11,6	0,30	36,1	Ampera Mini 16	1,0
	M5	49	8	-0,21	10	0,44	46	40	14,2	0,34	36,1	Ampera Mini 16	0,7
	M6	45	8	-0,25	10	0,30	41	39	15,4	0,30	31	Voltana 1	0,7
Цик-цак три траке	M3	20	8	0,79	0	0,89	44	64	10,2	0,38	36,1	Ampera Mini 16	1,8
	M4	24	8	0,79	5	0,64	43	63	10,6	0,35	36,1	Ampera Mini 16	1,5
	M5	40	8	1,29	10	0,40	34	43	13,0	0,39	36,1	Ampera Mini 16	0,9
Наспрамни три траке	M2	24	8	0,29	0	1,37	72	89	8,2	0,41	36,1	Ampera Mini 16	3,0
	M3	40	8	0,79	0	0,86	45	64	13,6	0,33	36,1	Ampera Mini 16	1,8
	M4	44	8	-0,71	10	0,70	55	60	14,1	0,37	36,1	Ampera Mini 16	1,6
Наспрамни четири траке	M1	23	8	0,79	0	1,81	59	87	9,2	0,40	53	Ampera Mini 24	4,6
	M2	21	8	1,29	0	1,35	49	88	8,7	0,35	36,1	Ampera Mini 16	3,4
	M3	33	7	0,79	0	0,86	39	70	14,6	0,36	36,1	Ampera Mini 16	2,2
Централни три траке (градске улице)	M1	16	9	0,84	10	1,82	42	89	9,9	0,39	70	Ampera Midi 32	8,8
	M2	17	10	0,29	10	1,34	39	89	8,7	0,42	53	Ampera Mini 24	6,2
Централни три траке (аутопут)	M1	42	13	0,95	0	1,84	43	78	9,6	0,48	165	Ampera Maxi 80	7,9
	M2	34	12	0,84	0	1,33	39	84	8,3	0,43	103	Ampera Midi 48	6,1

Табела 62. Основни подаци о оптималним светлотехничким решењима разматраних улица/путева реализованим помоћу LED светиљки топло-беле боје у фотопским и мезопским условима

Фотопски услови													
Распоред стубова	Светло-техничка класа	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lum} (W)	Тип светиљке	kW/km
Једнострани две траке	M3	30	8	1,29	0	0,98	45	85	10,4	0,30	53	Ampera Mini 24	1,8
	M4	41	8	1,29	0	0,72	41	62	13,1	0,30	53	Ampera Mini 24	1,3
	M5	45	8	1,29	0	0,48	42	47	12,7	0,30	36,1	Ampera Mini 16	0,8
	M6	43	8	0,25	10	0,30	46	41	14,4	0,36	31	Voltana 1	0,7
Цик-цак три траке	M3	16	7	0,79	0	0,96	47	73	11,8	0,35	36,1	Ampera Mini 16	2,3
	M4	20	8	0,79	0	0,75	44	64	9,9	0,38	36,1	Ampera Mini 16	1,8
	M5	33	8	1,29	10	0,48	34	48	13,6	0,38	36,1	Ampera Mini 16	1,1
Наспрамни три траке	M2	20	7	0,29	0	1,47	69	90	9,6	0,43	36,1	Ampera Mini 16	3,6
	M3	32	7	0,79	0	0,96	48	72	14,6	0,34	36,1	Ampera Mini 16	2,3
	M4	40	8	0,79	0	0,72	45	64	13,1	0,33	36,1	Ampera Mini 16	1,8
Наспрамни четири траке	M1	18	8	1,29	0	2,00	48	89	8,3	0,36	53	Ampera Mini 24	5,9
	M2	24	8	1,29	0	1,50	46	88	10,0	0,36	53	Ampera Mini 24	4,4
	M3	36	8	0,79	0	0,97	44	77	12,0	0,40	53	Ampera Mini 24	2,9
Централни три траке (градске улице)	M1	31	10	0,45	5	1,92	40	77	10,0	0,43	165	Ampera Maxi 80	10,6
	M2	32	10	0,84	5	1,44	42	71	9,5	0,42	136	Ampera Midi 64	8,5
Централни три траке (аутопут)	M1	35	12	0,95	0	1,91	39	84	9,3	0,44	165	Ampera Maxi 80	9,4
	M2	45	13	0,95	0	1,44	42	75	9,7	0,48	165	Ampera Maxi 80	7,3
Мезопски услови													
Распоред стубова	Светло-техничка класа	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lum} (W)	Тип светиљке	kW/km
Једнострани две траке	M3	33	8	1,29	0	0,89	44	85	11,1	0,30	53	Ampera Mini 24	1,6
	M4	30	8	1,29	0	0,65	45	85	9,6	0,30	36,1	Ampera Mini 16	1,2
	M5	48	8	1,29	0	0,45	34	41	13,4	0,30	36,1	Ampera Mini 16	0,8
	M6	45	8	-0,25	10	0,27	41	39	15,2	0,30	31	Voltana 1	0,7
Цик-цак три траке	M3	17	7	0,79	0	0,91	46	66	12,0	0,35	36,1	Ampera Mini 16	2,1
	M4	21	8	0,29	5	0,69	45	62	10,3	0,38	36,1	Ampera Mini 16	1,7
	M5	36	8	1,29	10	0,44	34	45	14,5	0,38	36,1	Ampera Mini 16	1,0
Наспрамни три траке	M2	21	7	0,29	0	1,40	69	88	9,9	0,43	36,1	Ampera Mini 16	3,4
	M3	34	7	0,29	5	0,88	51	73	15,0	0,35	36,1	Ampera Mini 16	2,1
	M4	42	8	0,29	5	0,67	45	62	14,2	0,31	36,1	Ampera Mini 16	1,7
Наспрамни четири траке	M1	19	8	1,29	0	1,90	49	89	8,6	0,36	53	Ampera Mini 24	5,6
	M2	26	8	0,79	0	1,35	55	86	9,5	0,40	53	Ampera Mini 24	4,1
	M3	28	7	1,29	0	0,88	41	80	10,8	0,31	36,1	Ampera Mini 16	2,6
Централни три траке (градске улице)	M1	31	10	0,45	5	1,92	40	77	10,0	0,43	165	Ampera Maxi 80	10,6
	M2	28	10	0,84	5	1,36	39	76	9,6	0,41	103	Ampera Midi 48	7,4
Централни три траке (аутопут)	M1	36	12	0,95	0	1,86	39	82	9,5	0,44	165	Ampera Maxi 80	9,2
	M2	47	13	0,95	0	1,38	41	74	10,0	0,48	165	Ampera Maxi 80	7,0

Табела 63. Односи инсталисаних снага оптималних светлотехничких решења разматраних улица/путева добијених коришћењем светилки са LED (и неутралне беле и топло-беле боје) и натријумовим/метал-халогеним изворима (без уважавања/са уважавањем мезопских ефеката при одређивању решења коришћењем LED осветљења)

Распоред стубова	Светло-техничка класа	$\frac{\sum P_{LEDNW}}{\sum P_{HPS}}$	$\frac{\sum P_{LEDWW}}{\sum P_{HPS}}$	$\frac{\sum P_{LEDNWmes}}{\sum P_{HPS}}$	$\frac{\sum P_{LEDWWmes}}{\sum P_{HPS}}$	$\frac{\sum P_{LEDWW}}{\sum P_{MH}}$	$\frac{\sum P_{LEDWWmes}}{\sum P_{MH}}$
Једностране две траке	M3	0,47	0,56	0,40	0,50	0,54	0,48
	M4	0,42	0,49	0,38	0,45	0,47	0,43
	M5	0,46	0,46	0,41	0,46	0,41	0,41
	M6	0,41	0,41	0,41	0,41	0,38	0,38
Цик-цак три траке	M3	0,45	0,51	0,40	0,47	0,49	0,45
	M4	0,42	0,47	0,40	0,45	0,47	0,45
	M5	0,43	0,48	0,39	0,43	0,48	0,43
Наспрамни три траке	M2	0,48	0,56	0,47	0,53	0,54	0,51
	M3	0,46	0,53	0,41	0,48	0,49	0,45
	M4	0,42	0,45	0,40	0,42	0,41	0,39
Наспрамни четири траке	M1	0,52	0,64	0,50	0,61	0,56	0,54
	M2	0,47	0,55	0,42	0,51	0,55	0,51
	M3	0,46	0,56	0,43	0,50	0,50	0,45
Централни три траке (градске улице)	M1	0,62	0,71	0,59	0,71	0,58	0,58
	M2	0,59	0,76	0,56	0,66	0,62	0,54
Централни три траке (аутопут)	M1	0,61	0,69	0,58	0,67	0,54	0,53
	M2	0,61	0,68	0,56	0,65	0,57	0,55

Упоређујући светлотехничка решења реализована помоћу LED светилки неутралне беле и топло-беле боје светлости (добијена без уважавања мезопских ефеката) са светлотехничким решењима реализованим помоћу светилки са натријумовим изворима (колоне $\frac{\sum P_{LEDNW}}{\sum P_{HPS}}$ и $\frac{\sum P_{LEDWW}}{\sum P_{HPS}}$ у табели 63), може се видети да смањење потрошње електричне енергије применом LED светилки варира од 38% до 59% и од 24% до 59%, респективно. Ако се у обзир узму мезопски ефекти (колоне $\frac{\sum P_{LEDNWmes}}{\sum P_{HPS}}$ и $\frac{\sum P_{LEDWWmes}}{\sum P_{HPS}}$ у табели 63), уштеде електричне енергије варирају од 41% до 62% за LED светилке неутралне беле боје и од 29% до 59% за LED светилке топло-беле боје. У скоро свим разматраним случајевима уважавање мезопских ефеката резултирало је додатним уштедама електричне енергије. Уштеде електричне енергије су приметно минималне у случају централног распореда, што потврђује да LED светилке одликује боља расподела светлосног интензитета у уздужној него у попречној вертикалној равни.

Поређењем LED светилки топло-беле боје са светилкама са метал-халогеним изворима без уважавања мезопских ефеката (колоне $\frac{\sum P_{LEDWW}}{\sum P_{MH}}$ у табели 63), може се видети да смањење потрошње електричне енергије варира од 38% до 62%. Ако се у обзир узму мезопски ефекти (колоне $\frac{\sum P_{LEDWWmes}}{\sum P_{MH}}$ у табели 63), уштеде електричне енергије варирају од 42% до 62%. У већини случајева разматрање мезопских ефеката резултирало је додатним уштедама електричне енергије. Поново, уштеде електричне енергије су приметно минималне за централни распоред.

Према резултатима претходног истраживања [102], потрошња електричне енергије при коришћењу LED светилки неутралне беле боје уместо светилки са натријумовим изворима високог притиска варира је од смањења до 30% до повећања до 79% када се не узимају у обзир мезопски ефекти, наглашавајући да су највећи пораст у потрошњи електричне енергије били у случају централног распореда са три саобраћајне траке. Такође је закључено да LED

светиљке још увек нису погодне за путеве које карактерише светлотехничка класа М1. Упоређујући ове резултате са онима датим у табели 63, може се видети да су побољшана светлосна искористивост LED пакета и висококвалитетна оптика потпуно преокренули предност у корист LED технологије у погледу енергетске ефикасности.

Наведено истраживање везано за LED осветљење (придружене температуре боје 4000 K) једне (приградске) улице са две саобраћајне траке [120] показало је да је уважавање мезопских ефеката допринело уштедама електричне енергије од 12%, 14% и 15% за светлотехничке класе улица М4, М5 и М6, респективно. Ове уштеде електричне енергије постигнуте су помоћу адаптивног система, који је омогућио адекватно подешавање нивоа мезопске сјајности који одговара светлотехничким класама М4–М6, израчунатих применом захтевне CIE процедуре [119]. Према подацима приказаним у табели 63, уштеде електричне енергије остварене у овом истраживању уважавањем мезопских ефеката у LED инсталацијама осветљења улица/путева (придружене температуре боје 4000 K) износиле су 10%, 11% и 0% за разматране улице/путеве са две саобраћајне траке које карактеришу светлотехничке класе М4, М5 и М6. Оне су добијене у процесу пројектовања уличног осветљења (не експериментално, односно без примене адаптивног система), где су мезопски (кориговани фотопски) нивои сјајности одређени коришћењем процедуре представљене у референци [21], на основу вредности односа S/P [119]. Поређењем ова два случаја, може се закључити да су максималне уштеде електричне енергије које се могу постићи уважавањем мезопских ефеката управо оне које се постижу применом адаптивних система. Очигледно је да се оне тешко могу постићи у процесу пројектовања (у случају разматране светлотехничке класе М6 није било уштеда електричне енергије). Из тог разлога, а још више због чињенице да адаптивни системи омогућавају постизање мање захтевних светлотехничких услова који се односе на ниже светлотехничке класе (које су најчешће прикладне касно ноћу), њихова употреба се веома препоручује у осветљењу улица/путева. Треба нагласити да се максималне процентуалне уштеде електричне енергије могу постићи применом адаптивних система (различитих режима осветљења) у инсталацијама LED осветљења улица/путева, јер су процентуалне редукције снаге највеће код LED светиљки [13]. Треба нагласити да су данас у употреби различите топологије мрежа за регулацију осветљења, од којих су неке Cellular Gateways, Wi-Fi Ethernet Gateways и USB Gateways [149].

7.4 Методологија за прорачун трошкова

У претходном истраживању [102] извршено је економско поређење светиљки са натријумовим изворима високог притиска и LED светиљки неутралне беле боје помоћу формула изведених у референци [103], које су биле засноване на општеприхваћеној методи актуелизације трошкова. Значајан развој LED технологије у последњој деценији наметнуо је захтев за унапређеном методологијом која се бави финансијским питањима, посебно у делу који се односи на трошкове одржавања LED инсталација осветљења улица/путева (оних који се односе на групну замену LED драјвера и плоча са LED чиповима, могућих због модуларности LED светиљке). Ова методологија, која исправно укључује све релевантне трошкове, представљена је у Прилогу 4. Заснована је на поређењу укупних трошкова (збир свих релевантних актуелизованих трошкова) оптималних инсталација осветљења улица/путева. Укупни трошкови су укључивали почетне (инвестиционе) и експлоатационе трошкове, који су сведени на крај периода експлоатације (видети Прилог 4), док преостала (резидуална) вредност (трошак на крају животног века) није узета у обзир због недостатка поузданих улазних података у вези са рециклажом и демонтажом.

Трошкови замене рано прегорелих натријумових и метал-халогених извора или LED пакета, који су укључени у одговарајуће укупне трошкове у Прилогу 4 (једначине 4.14 и 4.15),

нису узети у обзир ни у овом истраживању, јер обично не прелазе 1% у случају светилки са натријумовим изворима [102], док за светилке са метал-халогеним и LED изворима нема података. Други разлог зашто трошкови за рано прегореле LED пакете нису урачунати је тај што су они нижи од оних који се односе на групну замену плоча са LED чиповима, који, као што је приказано у поглављу 7.5, само незнатно утичу на укупне актуелизоване трошкове.

7.5 Економско поређење

У овом истраживању израчунати су укупни актуелизовани трошкови за деонице улице/пута дужине 1 km (као што је урађено за одређивање инсталисаних снага). Пошто уобичајени експлоатациони периоди припадају опсегу од 20–30 година, усвојен је период од 24 године, који је близу средине опсега 20–30 година и дељив је са свим следећим периодима: периодом групне замене натријумових извора (4 године), периодом групне замене метал-халогених извора (2 године) и периодом групне замене LED драјвера (4 године). Усвојено годишње време рада светилки је 4000 сати.

Сви трошкови опреме приказани су у Прилогу 5. Подаци дати у тексту и у табелама 5.1 и 5.2 Прилога 5 преузети су од ЈКП „Јавно осветљење” које је задужено за изградњу и одржавање спољног (јавног) осветљења у Београду, док су подаци приказани у табелама 5.3–5.5 преузети од компаније Minel-Schröder из Београда, чланице произвођача светилки (Schröder Group).

За сваки од разматраних случајева израчунати су укупни и сви остали релевантни актуелизовани трошкови фотометријски еквивалентних светлотехничких решења реализованих помоћу светилки са натријумовим, метал-халогеним и LED изворима уз претпоставку стопе актуелизације од $i = 3\%$, 5% и 7% , као и јединствене тарифе коју карактеришу цене електричне енергије $c_e = 0,1 \text{ €/kWh}$, $0,2 \text{ €/kWh}$ и $0,3 \text{ €/kWh}$. Трошкови су израчунати за 54 случаја (9 за натријумове изворе, 9 за метал-халогене изворе и 18 за LED светлотехничка решења (неутралне беле и топло-беле боје) добијена без уважавања мезопских ефеката, као и 18 за LED светлотехничка решења добијена узимајући у обзир мезопске ефекте).

Илустративне табеле 6.1 и 6.2 (Прилог 6), од којих се прва односи на једностран и циклус распоред, а друга на наспрамни и централни распоред, представљају податке који одговарају случају који карактеришу средње вредности разматране стопе актуелизације и цене електричне енергије ($i = 5\%$ и $c_e = 0,2 \text{ €/kWh}$). Анализа табела 6.1 и 6.2 показала је да у случају светилки са натријумовим изворима почетни трошкови чине 17–46% (трошкови електричне енергије 46–79%) од укупних трошкова. Што се тиче светилки са метал-халогеним изворима, почетни трошкови су износили 19–38% од укупних трошкова, док су трошкови електричне енергије износили 37–62%. У случају LED светилки, почетни трошкови су износили 28–52% од укупних трошкова за LED светилке неутралне беле боје, и 27–52% за LED светилке топло-беле боје, док су трошкови електричне енергије износили 28–62% за LED светилке неутралне беле боје, а 28–63% за LED топло-беле боје.

За сваку од разматраних улица/путева и сваку од разматраних комбинација i и c_e , табеле 6.3–6.6 садрже односе између укупних актуелизованих трошкова светлотехничких решења реализованих помоћу светилки са LED (неутралне беле и топло-беле боје) и натријумовим изворима, добијене не узимајући/узимајући у обзир мезопске ефекте (C_{dLEDNW}/C_{dHPS} , C_{dLEDWW}/C_{dHPS} , $C_{dLEDNWmes}/C_{dHPS}$ и $C_{dLEDWWmes}/C_{dHPS}$), односе $C_{dLEDNWmes}/C_{dLEDNW}$ и $C_{dLEDWWmes}/C_{dLEDWW}$ (који показују утицај уважавања мезопских ефеката), као и односе између укупних актуелизованих трошкова светлотехничких решења са LED изворима топло-беле боје и метал-халогеним изворима (C_{dLEDWW}/C_{dMH} и $C_{dLEDWWmes}/C_{dMH}$).

Табела 64, изведена из табела 6.3–6.6, садржи опсеге свих релевантних односа укупних трошкова (добитених без уважавања/уважавањем мезопских ефеката) за сваки од разматраних распореда стубова, израчунатих узимањем у обзир свих разматраних комбинација i и s_e .

Табела 64. Опсези свих релевантних односа укупних актуелизованих трошкова за сваки од разматраних распореда стубова

Распоред	C_{dLEDNW}/C_{dHPS}	C_{dLEDWW}/C_{dHPS}	$C_{dLEDNWmes}/C_{dHPS}$	$C_{dLEDWWmes}/C_{dHPS}$	C_{dLEDNW}/C_{dLEDNW}	$C_{dLEDWWmes}/C_{dLEDWW}$	C_{dLEDWW}/C_{dMH}	$C_{dLEDWWmes}/C_{dMH}$
Једностран	0,61–0,88	0,63–1,07	0,59–0,80	0,61–0,98	0,88–1,00	0,91–1,26	0,52–0,80	0,50–0,73
Цик-цак	0,66–0,90	0,74–0,99	0,62–0,83	0,69–0,93	0,91–0,95	0,90–0,94	0,63–0,78	0,58–0,72
Наспрамни	0,63–0,99	0,68–1,20	0,60–0,94	0,63–1,14	0,91–0,97	0,92–1,14	0,53–0,86	0,49–0,82
Централни	0,69–1,34	0,75–1,03	0,68–1,26	0,72–1,00	0,92–1,06	0,92–1,01	0,45–0,64	0,43–0,65

Узимајући у обзир све распореде стубова, из табеле 64 може се видети да односи C_{dLEDNW}/C_{dHPS} и C_{dLEDWW}/C_{dHPS} припадају опсезима 0,61–1,34 и 0,63–1,20, респективно. Када су мезопски ефекти узети у обзир, односи $C_{dLEDNWmes}/C_{dHPS}$ и $C_{dLEDWWmes}/C_{dHPS}$ били су у опсегу 0,59–1,26 и 0,61–1,14, респективно, док су односи $C_{dLEDNWmes}/C_{dLEDNW}$ и $C_{dLEDWWmes}/C_{dLEDWW}$ били у опсегу 0,88–1,06 и 0,90–1,26, респективно. Када се пореде светлотехничка решења са LED изворима топло-беле боје и метал-халогеним изворима, односи C_{dLEDWW}/C_{dMH} и $C_{dLEDWWmes}/C_{dMH}$ били су у опсегу 0,45–0,86 и 0,43–0,82, респективно. Иако је укључивање мезопских ефеката омогућило додатну уштеду електричне енергије у скоро свим разматраним случајевима (што се може видети упоређивањем одговарајућих података из табеле 63), односи $C_{dLEDNWmes}/C_{dLEDNW}$ или $C_{dLEDWWmes}/C_{dLEDWW}$ дати у табели 64 су у неким случајевима били већи од 1. Ово указује на то да је у сваком од тих случајева оптимално светлотехничко решење добијено уважавањем мезопских ефеката постигнуто типом светиљке коју карактерише мања снага од оне која се односи на оптимално светлотехничко решење добијено без уважавања мезопских ефеката, што доводи до већег броја стубова и, самим тим, већих почетних и/или трошкова одржавања.

Представљена економска анализа заснована је на животном веку LED пакета од 100000 сати, који обично декларишу водећи произвођачи LED пакета. Међутим, на тржишту су присутни и LED пакети са краћим животним веком (који је између 50000 и 100000 сати) [149]. Стога је анализа осетљивости проширена укључивањем животног века LED пакета као трећег параметра. Ако је животног век LED пакета мањи од разматраних 100000 сати, трошкови одржавања се повећавају због укључивања трошкова групне замене плоча са LED чиповима, чиме се повећавају и укупни трошкови.

Прво, узет је у обзир животног век LED пакета од 50000 сати. Актуелизовани трошкови групне замене плоча са LED чиповима током претпостављеног периода експлоатације од 24 године проузроковао је повећање од 10,58–12,34% одговарајућих актуелизованих трошкова одржавања, док се повећање од само 0,77–3,45% догодило у одговарајућим укупним актуелизованим трошковима.

Према формулама 4.7, 4.11 и 4.12 (Прилог 4), ако се животног век LED пакета повећа преко 50000 сати (до 100000 сати), укупни актуелизовани трошкови би се смањили (због чињенице да би групна замена плоча са LED чиповима била извршена ближе крају експлоатационог периода). Дакле, може се закључити да животног век LED пакета само незнатно утиче на укупне трошкове.

Претходно истраживање [102] је показало да је однос између укупних актуелизованих трошкова светлотехничких решења са LED изворима неутралне беле боје и натријумовим изворима био у опсегу од 1,44–7,61 када мезопски ефекти нису узети у обзир. Упоређујући овај опсег са опсегом од 0,61–1,34 односа C_{dLEDNW}/C_{dHPS} добијеним у овом истраживању, може

се закључити да је раст тржишта осветљења вођен сталним и значајним побољшањима LED технологије коначно учинио да је она генерално боља опција од светиљки са натријумовим изворима у погледу укупних трошкова и, као што је приказано у поглављу 7.3, енергетске ефикасности.

7.6 Употреба ефикаснијих LED пакета

Да би се илустровале уштеде енергије које се могу очекивати у блиској будућности, такође су размотрене LED светиљке које карактерише светлосна искористивост од 190 lm/W [21] за LED пакете неутралне беле и топло-беле боје. У овој анализи су примењене Ампера светиљке због најбољих перформанси у скоро свим разматраним случајевима (видети табеле 61 и 62). Користећи методологију описану у поглављу 7.2, за сваки од 17 разматраних случајева добијено је оптимално светлотехничко решење без уважавања мезопских ефеката (представљено односом инсталисане снаге (потрошња електричне енергије) $\sum P_{LED} / \sum P_{HPS}$), као и решење добијено уважавањем мезопских ефеката (односи $\sum P_{LEDNWmes} / \sum P_{HPS}$ и $\sum P_{LEDWWmes} / \sum P_{HPS}$). Резултати су представљени у табели 65.

Табела 65. Светлотехничка решења улица и путева добијена коришћењем LED пакета које карактерише светлосна искористивост од 190 lm/W

Распоред стубова	Светло-техничка класа	Без уважавања мезопских ефеката		Са уважавањем мезопских ефеката			
		Тип светиљке	$\sum P_{LED} / \sum P_{HPS}$	Тип светиљке са LED чиповима неутралне беле боје	$\sum P_{LEDNWmes} / \sum P_{HPS}$	Тип светиљке са LED чиповима топло-беле боје	$\sum P_{LEDWWmes} / \sum P_{HPS}$
Једностране две траке	M3	Ampera Mini 16	0.37	Ampera Mini 16	0.34	Ampera Mini 16	0.34
	M4	Ampera Mini 16	0.34	Ampera Mini 16	0.34	Ampera Mini 16	0.34
	M5	Ampera Mini 16	0.41	Ampera Mini 16	0.41	Ampera Mini 16	0.41
	M6	Ampera Mini 16	0.41	Ampera Mini 16	0.35	Ampera Mini 16	0.41
Цик-цак три траке	M3	Ampera Mini 16	0.38	Ampera Mini 16	0.36	Ampera Mini 16	0.36
	M4	Ampera Mini 16	0.37	Ampera Mini 16	0.34	Ampera Mini 16	0.34
	M5	Ampera Mini 16	0.39	Ampera Mini 16	0.39	Ampera Mini 16	0.39
Наспрамне три траке	M2	Ampera Mini 16	0.42	Ampera Mini 16	0.39	Ampera Mini 16	0.39
	M3	Ampera Mini 16	0.41	Ampera Mini 16	0.39	Ampera Mini 16	0.39
	M4	Ampera Mini 16	0.40	Ampera Mini 16	0.40	Ampera Mini 16	0.40
Наспрамне четири траке	M1	Ampera Mini 16	0.43	Ampera Mini 16	0.41	Ampera Mini 16	0.43
	M2	Ampera Mini 16	0.37	Ampera Mini 16	0.36	Ampera Mini 16	0.37
	M3	Ampera Mini 16	0.41	Ampera Mini 16	0.37	Ampera Mini 16	0.37
Централне три траке (градске улице)	M1	Ampera Mini 24	0.51	Ampera Mini 16	0.48	Ampera Mini 16	0.48
	M2	Ampera Mini 24	0.53	Ampera Mini 24	0.48	Ampera Mini 24	0.48
Централне три траке (аутопут)	M1	Ampera Maxi 80	0.56	Ampera Mini 16	0.53	Ampera Mini 16	0.53
	M2	Ampera Midi 32	0.54	Ampera Mini 24	0.49	Ampera Midi 48	0.52

Нови светлосни флуksеви (у луменима) светиљки Ампера израчунати су дељењем њихових снага (у ватима) са 1,1 (снага LED драјвера је око 9% укупне снаге светиљке) и множењем ових вредности са 190. Пошто се очекује да ће перформансе у смислу светлосне искористивости LED пакета неутралне беле и топло-беле боје у блиској будућности бити једнаке, случај без уважавања мезопских ефеката се односи на LED пакете и неутралне беле и топло-беле боје. Треба напоменути да су, због недостатка информација, вредности односа S/P које су коришћене у поглављу 7.2 задржане за LED пакете и неутралне беле и топло-беле боје.

Анализирајући колону која садржи однос $\sum P_{LED} / \sum P_{HPS}$ у табели 65, може се закључити да ако се мезопски ефекти не узму у обзир смањење потрошње електричне енергије варира од 44% до 66% за LED пакете и неутралне беле и топло-беле боје. Ако се мезопски ефекти узму у обзир (колоне које садрже однос $\sum P_{LEDNWmes} / \sum P_{HPS}$ и $\sum P_{LEDWWmes} / \sum P_{HPS}$), смањење потрошње електричне енергије варира од 47% до 66%. Поново, у неким од разматраних случајева уважавање мезопских ефеката није резултирало додатним уштедама енергије.

Горе наведени подаци показују да коначна процена истраживања представљеног у референци [150], у ком је наведено да потенцијал уштеда електричне енергије износи 83% коришћењем будућих LED светиљки (које карактерише светлосна искористивост од 200 lm/W) у поређењу са светиљкама са натријумовим изворима, уважава имплементацију адаптивних система.

Инсталације осветљења улица/путева у Београду, садрже око 120000 светиљки са укупном инсталисаном снагом од око 25 MW (светиљке са натријумовим изворима високог притиска учествују са 80%, а светиљке са метал-халогеним и LED изворима са по 10%). Узимајући ово у обзир, као и чињеницу да је, према табели 65, снага LED светиљки које ће у скоријој будућности имати ширу примену за око 60% мања од снаге светиљки са натријумовим изворима, перспективне годишње уштеде електричне енергије у Београду ако су све постојеће светиљке са натријумовим изворима замењене одговарајућим LED, отприлике износи:

$$0,6 \cdot 0,8 \cdot 25 \text{ MW} \cdot 4000 \text{ h} = 48 \text{ GWh}$$

(годишње уштеде електричне енергије по глави становника износе око 28 kWh (што за годишњу потрошњу електричне енергије по становнику од 4000 kWh износи 0,7%)).

7.7 Дискусија

Постоје четири доминантна аспекта које треба узети у обзир када се пореде фотометријски еквивалентна конвенционална и LED решења за осветљење улица/путева: енергетска ефикасност, укупни трошкови, квалитет осветљења и утицаји на животну средину. Пошто је ово истраживање углавном било посвећено првом и другом аспекту, преостала два ће бити укратко обрађена у наставку.

Што се тиче квалитета осветљења, поред испуњености захтева представљених у релевантним (претходно наведеним) стандардима (који се односе на безбедност, сигурност и видни комфор), постоје и други важни аспекти који се обично занемарују приликом поређења различитих технологија осветљења. Најважније су боја светлости и репродукција боја, који несумњиво иду у прилог LED технологији у поређењу са натријумовим изворима (због светлости беле боје и веома добре репродукције боја). Недавно истраживање, у којем је од учесника (пешака) затражено да упореде фотометријски еквивалентно LED осветљење тротоара неутралне беле и топло-беле боје светлости, показало је њихову преференцију за LED осветљење топло-беле боје у погледу свих разматраних параметара: интензитета осветљења (осветљености) тротоара, осветљености људских лица, пријатности боје светлости и репродукције боја [79]. Међутим, у другом истраживању, које се бавило доживљајима возача, није донесен коначан закључак у погледу њихове преференције за LED пакете неутралне беле и топло-беле боје светлости. Учесници укључени у стварну вожњу оценили су осветљење топло-беле боје као боље у погледу боје светлости, а осветљење неутралне беле боје као боље у погледу уочавања светлих препрека, док статистички значајна разлика није установљена при оцењивању осветљења неутралне беле и топло-беле боје у погледу осталих разматраних параметара (интензитет осветљења (осветљеност) коловоза, бљештање, уочавање пешака и уочавање тамних препрека) [123]. Стога је закључено да су потребна додатна истраживања

како би се препоручила одговарајућа боја светлости за моторизовани или мешовити саобраћај. Остали аспекти перформанси осветљења, као што су дневни изглед светилки и усклађеност уличног осветљења са амбијенталним и/или архитектонским (декоративним) осветљењем, такође заслужују пажњу.

Утицаји на животну средину светилки за осветљење улица/путева анализирају се кроз процену животног циклуса (LCA – life cycle analysis). У референци [151] је показано да су најважније (најутицајније) фазе животног циклуса производња и употреба. Прва обично укључује набавку сировина, производњу и транспорт материјала и делова за светилке, склапање светилки и паковање [152], док друга укључује потрошњу електричне енергије и одржавање.

У LCA студији која је упоређивала LED са светилкама са натријумовим изворима показано је да су укупни утицаји обе технологије на животну средину били на сличном нивоу (користећи километар осветљеног пута као функционалну јединицу, утицаји на животну средину светилки са натријумовим изворима били су 3% мањи од оних код LED светилки) [152]. Такође је закључено да је већина утицаја на животну средину обе технологије генерисана у фази рада (96% за светилке са натријумовим изворима и 87% за LED светилке). Указујући на неколико несигурности присутних у LCA студији, у референци [152] истакнуто је да резултати добијени проучавањем две одређене светилке нису применљиви на све светилке са натријумовим и LED изворима светлости, закључујући да би проучавање више различитих типова светилки смањило истакнуту несигурност. Стога би правац даљег истраживања могао бити посвећен поређењу разматраних светилки са натријумовим и LED изворима у погледу бројних утицаја на животну средину наведених у референци [151] (као што су климатске промене, исцрпљивање воде, метала и фосила, закишељавање копнених и свежих вода и екотоксичност, токсичност по људе и природна трансформација земљишта).

Још један проблем – емисија виших напонских и струјних хармоника – такође заслужује да се спомене. Иако је било доста радова у овој области (на пример, истраживања представљена у референцама [13, 39, 153]), потребна су додатна истраживања, посебно посвећена утицају различитих типова LED драјвера.

7.8 Закључци

Бројни недостаци представљених истраживања у вези са осветљењем улица/путева указују на то да су погрешни закључци о уштедама енергије/трошкова при примени LED уместо конвенционалних светилки били врло вероватни у многим од разматраних случајева.

Резултати овог истраживања, добијени применом развијене опште методологије за поређење различитих инсталација осветљења улица/путева, сугеришу да се применом LED уместо светилки са натријумовим или метал-халогеним изворима са керамичким гориоником могу постићи значајне уштеде енергије. Уштеде енергије када се користе LED уместо светилки са натријумовим изворима су значајне чак и ако се не узимају у обзир мезопски ефекти. Ако се у обзир узму мезопски ефекти, просечне уштеде електричне енергије када се уместо светилки са натријумовим изворима примењују LED неутралне беле и топло беле боје износе 41–62%, односно 29–59% (38–59% и 24–59%, ако се у обзир не узимају мезопски ефекти). Такође је закључено да када се пореде светлотехничка решења реализована помоћу LED извора топло-беле боје са оним изведеним помоћу метал-халогених извора просечне уштеде електричне енергије износе 42–62% (38–62% ако се не узму у обзир мезопски ефекти). Треба нагласити да би поменути проценти уштеде електричне енергије били већи када би се применили адаптивни системи (различити режими осветљења), јер је проценат смањења снаге највећи код LED светилки.

Показано је да односи између укупних актуелизованих трошкова упоредивих светлотехничких решења реализованих помоћу LED (неутралне беле и топло-беле боје) и натријумових извора припадају опсезима 0,59–1,26 и 0,61–1,14 ако се уваже мезопски ефекти, и 0,61–1,34 и 0,63–1,20 ако се не уваже. Односи већи од 1 практично не постоје у случајевима једностраног и цик-цак распореда стубова, а веома су ретки у случајевима наспрамног и централног распореда стубова. Поређењем светлотехничких решења реализованих помоћу LED извора топло-беле боје и метал-халогених извора, односи између њихових укупних трошкова били су у опсегу од 0,43–0,82 (0,45–0,86, ако се у обзир не узму мезопски ефекти). Проширена анализа осетљивости трошкова, изведена разматрајући не само уобичајено претпостављене стопе актуелизације и цене електричне енергије, већ и животни век LED пакета (као трећи утицајни параметар), показала је да последњи само незнатно утиче на укупне трошкове. Треба напоменути да су показатељи енергетске ефикасности и трошкова који описују примену LED светилки у осветљењу улица/путева много бољи од оних добијених у сличном истраживању спроведеном пре скоро деценије.

Да би се илустровале уштеде електричне енергије које би се могле постићи у блиској будућности, разматране су и LED светилке са пакетима које карактерише светлосна искористивост од 190 lm/W. Просечне уштеде електричне енергије при коришћењу LED пакета неутралне беле и топло-беле боје износила је 47–66% (44–66% без уважавања мезопских ефеката). Такође се показало да би замена свих светилки са натријумовим изворима високог притиска, које учествују са 80% у укупној инсталисаној снази инсталација осветљења улица/путева у Београду, LED светилкама са побољшаном светлосном искористивошћу, довела до годишње уштеде електричне енергије по становнику од око 28 kWh.

Наглашене су и боље перформансе осветљења LED извора у односу на натријумове изворе високог притиска, првенствено у погледу боје светлости и репродукције боја.

Пре око 10 година у рекламном материјалу LED произвођача наведено је да при замени класичних LED светилкама у осветљењу улица/путева уштеда електричне енергије може да пређе 80%. У то време ова изјава могла је да важи само за постојеће инсталације са живиним изворима високог притиска. Према резултатима овог истраживања, то ће ускоро важити и за замену светилки са натријумовим/метал-халогеним изворима LED светилкама.

8 ЗАКЉУЧЦИ

Тема докторске дисертације је утврђивање оправданости употребе LED технологије у уличном осветљењу, поређењем релевантних показатеља енергетске ефикасности и квалитета електричне енергије, као и економских параметара, инсталација уличног осветљења изведених помоћу LED светилки и конвенционалних (натријумових или метал-халогених) светилки, уз уважавање употребе система за регулацију светлосног флуksа (телеменаџмент система) и ефеката мезопског виђења.

Циљ дисертације је утврђивање објективних и субјективних показатеља примене LED технологије у уличном осветљењу, са аспекта енергетске ефикасности, квалитета електричне енергије, параметара електричних инсталација уличног осветљења, боје светлости и економских параметара, као и обавештавање научно-стручне јавности која се бави уличним осветљењем о стварним могућностима LED технологије.

У циљу поређења релевантних показатеља енергетске ефикасности инсталација уличног осветљења изведених помоћу LED и конвенционалних (натријумових или метал-халогених) светилки, изабрано је 17 типичних градских саобраћајница којима одговарају све стандардне светлотехничке класе, за које су, уз избор адекватног распореда светилки (једностране, цикл-цак, двостране наспрамне или централне), извршени фотометријски прорачуни уз претпостављену примену савремених натријумових, метал-халогених и LED светилки топло-беле боје (придружене температуре боје 3000 K) и неутралне беле боје (придружене температуре боје 4000 K). Избор оптималног решења осветљења улице/пута вршен је по два критеријума: критеријуму максималног растојања између стубова и критеријуму минималне инсталисане снаге. Излазни подаци фотометријских прорачуна релевантни за техно-економску анализу били су типови натријумових, метал-халогених и LED светилки, који одговарају оптималним решењима осветљења, као и висине и растојања између суседних стубова (светилки) у оквиру свих 17 разматраних случајева.

Како би се анализирао утицај свих разматраних светилки на квалитет електричне енергије, у лабораторијским условима и при мрежном напону, извршена су мерења вредности следећих параметара изабраних (на основу фотометријских прорачуна) натријумових, метал-халогених и LED светилки:

- активне снаге,
- реактивне снаге,
- струје,
- фактора снаге,
- THD напона, и
- THD струје.

Лабораторијска мерења наведених параметара (електричних величина) извршена су при напонима чији је степен изобличења мењан додавањем отпорности и пригушнице на ред са сваком испитиваном светилком (таквим поступком је симулирана кабловска веза између разводног ормана јавног осветљења и прве светилке у инсталацији осветљења улице/пута). Употребом телеменаџмент система, сви наведени параметри су разматрани и у режимима рада са редукованим светлосним флуksом (који се примењују у касним ноћним и раним јутарњим сатима). Уважањени су и ефекти мезопског виђења (нивои сјајности разматраних саобраћајница за моторни и мешовити саобраћај одговарају мезопском виђењу). Поређењем одговарајућих вредности THD-а напона сваке од тестираних светилки у свим разматраним режимима није било могуће квантификовати утицај додате отпорности и пригушнице на ред са светилком. Међутим, додавање отпорности и пригушнице на ред тестираних светилкама довело је до малог повећања вредности THD-а струје сваке светилке, због чега је закључено да промена у

вредности THD-а напона постоји, али да је врло мала. Смањивањем светлосног флукса LED светиљки уочено је опадање светлосног флукса и активне снаге за приближно исти проценат, као и опадање вредности фактора снаге свих разматраних светиљки. Најнижи фактор снаге, који се односи на максимално димовање светиљке, констатован је код једне од две тестиране LED светиљке, чиме је илустрован утицај употребе драјвера различитих карактеристика. За уочене ниске вредности фактора снаге светиљки (испод 0,9), а у циљу његове поправке, односно сузбијања виших хармоника, предложена је употреба пригушнице због капацитивног карактера фактора снаге светиљки.

Анализом сценарија јавног осветљења са три режима рада, за четири типичне саобраћајнице одређене су процентуалне разлике утрошене активне и реактивне електричне енергије на годишњем нивоу у случају инсталације LED уместо конвенционалних (натријумових и метал-халогених) светиљки. Примена LED светиљки обезбедила је преко 50% уштеда активне електричне енергије у односу на конвенционалне (натријумове или метал-халогене) светиљке на свим разматраним саобраћајницама, осим у случају осветљења аутопута, где је уштеда активне електричне енергије износила 42%.

Извршена су и мерења вредности горе поменутих релевантних електричних параметара светиљки у реалним условима – на два дела реалне инсталације LED уличног осветљења (једне са LED драјверима са стандардним, а друге са LED драјверима са побољшаним карактеристикама). На основу измерених вредности развијен је математички модел за прорачун изобличења напона у трофазним инсталацијама уличног осветљења. Основне карактеристике модела су:

- независно разматрање сваког хармоника (основног и виших хармоника) коришћењем једнофреквентног кола,
- одређивање струјних извора LED светиљки у сваком од ових кола на основу резултата мерења струјног спектра који карактерише разматране LED светиљке (без уважавања промена струјног спектра LED светиљке са променом ефективне вредности и степена изобличења напона),
- израчунавање струја у каблу који повезује суседне стубове светиљки сабирањем струја LED светиљки,
- примена методе симетричних компоненти за формирање директне, инверзне и нулте ($d, i, 0$) компоненте струја симетричног система кроз кабл који повезује стубове светиљки, полазећи од несиметричних струја у трофазном A, B, C систему,
- коришћење степена изобличења напона када су LED светиљке искључене као улазног податка који може бити постављен произвољно,
- валидност модела за било који број стубова,
- израчунавање напона у $d, i, 0$ систему у сваком чвору кола (укључујући и напоне на сваком стубу) решавањем модела импедансе у сваком од $d, i, 0$ система и за сваки од хармоника, и
- одређивање фазног напона у свакој од A, B, C фаза у сваком чвору кола коришћењем трансформације $d, i, 0$ система у A, B, C систем.

Након тога је написан програм у Matlab-у, који је примењен на четири типичне инсталације осветљења улица (путева), с циљем да се одреди максималан број светиљки за који није прекорачена ниједна од граница које се односе на пад напона, THD напона и појединачне хармонике напона у нормалном и редукованим режимима осветљења. У свим разматраним случајевима граница у погледу броја светиљки била је нижа за LED светиљке са чиповима топло-беле него за оне са чиповима неутралне беле боје.

За 6 типичних случајева са фотометријски упоредивим светлотехничким решењима са натријумовим и LED светиљкама (по два случаја за централни, двострани наспрамни и једнострани распоред стубова, којима одговарају стандардне светлотехничке класе улице/пута

M1, M2 и M3) анализиран је и утицај примене LED светилки на пресек кабла струјног кола осветљења, ефикасност заштите од електричног удара (у случају кvara) и пад напона. Анализа је обухватила инсталације осветљења на деоницама иницијалне дужине 1000 m, реализоване помоћу конвенционалних светилки са натријумовим изворима високог притиска и LED светилки. Претпостављена је употреба каблова са алуминијумским проводницима пресека 10 mm^2 , 16 mm^2 или 25 mm^2 , као и следеће вредности фактора снаге: $\cos \varphi = 0,85$ за конвенционалне светилке са електромагнетским баластима, односно $\cos \varphi = 0,95$ за LED светилке са драјвером. Поређењем максимално дозвољених бројева стубова у разматраним случајевима са аспекта пада напона, закључено је да је инсталацију са LED светилкама карактерисао или већи максимално дозвољени број стубова или приметно нижи пад напона на деоници дужине 1000 m (у односу на инсталацију са натријумовим светилкама) у сваком од разматраних случајева пресека кабла. Са аспекта TN система заштите, за исту дужину деонице од 1000 m, закључено је да за скоро половину разматраних случајева TN систем заштите не представља ефикасно решење. У циљу адекватног поређења максималног дозвољеног броја стубова у инсталацијама уличног осветљења реализованих помоћу натријумових и LED извора, било је потребно уважити и критеријум пада напона и критеријум TN заштите (уз кориговање дужине деонице, по потреби). Анализом одговарајућих вредности максимално дозвољених бројева стубова у инсталацијама са натријумовим и LED светилкама, није било могуће извести општи закључак који се односи на све случајеве. У половини случајева максимално дозвољени број стубова у инсталацијама са LED светилкама био је већи него у случајевима инсталације са натријумовим светилкама. И у случајевима код којих је максимално дозвољени број стубова био мањи за инсталације са LED светилкама радило се о приближно једнаким или нешто дужим деоницама у случају LED инсталације. Иако је инсталацију са LED светилкама карактерисао или већи максимално дозвољени број стубова или приметно нижи пад напона у односу на инсталацију са натријумовим светилкама у сваком од разматраних случајева пресека кабла, након узимања у обзир и ефикасности TN система заштите, уочено је да су највеће разлике у максимално дозвољеном броју стубова у корист инсталације са LED светилкама постигнуте за алуминијумски кабл пресека 25 mm^2 .

На основу пилот пројекта у оквиру ког је уз помоћ телеменаџмент система, мобилног луминансметра (CCD камере), анкете и статистичке анализе њених резултата извршено поређење субјективних показатеља квалитета инсталација уличног осветљења реализованих помоћу LED чипова топло-беле и неутралне беле боје, као и на основу анализе релевантних референци које су се бавиле здравственим аспектима употребе LED светилки у уличном осветљењу, добијене су препоруке у вези са LED чиповима одговарајуће придружене температуре боје за примену у уличном осветљењу.

Први део анкетног истраживања посвећен је субјективном доживљају видљивости и видног комфора пешака при коришћењу LED пакета топло-беле боје (придружене температуре боје 3000 K) и неутрално беле боје (придружене температуре боје 4000 K) у уличном осветљењу. Да би две тест инсталације биле упоредиве с тачке гледишта пешака, подешене су тако да су следећи објективни фотометријски параметри били упоредиви: средња хоризонтална осветљеност тротоара, минимална хоризонтална осветљеност, полуцилиндрична осветљеност и релативни пораст прага. Субјективни доживљаји релевантних параметара осветљења обе инсталације уличног осветљења упоређени су коришћењем упитника. Репрезентативан број од 139 студената (61 мушкарац и 78 жена), старосног доба 21–25 година, учествовао је у анкети оцењујући сваки од разматраних параметара квалитета осветљења (интензитет осветљења (ниво осветљености) тротоара, изглед људских лица, боја светлости и репродукција боја), као и општи утисак, оценама од 1 до 5. Резултати анкете, који су статистички анализирани за целокупну групу испитаника, као и по групама са испитаницима истог пола, показали су да су од стране пешака, што се тиче боје светлости, LED пакети топло-беле боје (придружене температуре боје 3000 K) били

конзистентно преферирани у односу на LED пакете неутралне беле боје (придружене температуре боје 4000 K).

Други део анкетног истраживања односио се на одређивање префериране боје светлости LED пакета из перспективе возача, због чега је извршено оцењивање релевантних параметара квалитета LED осветљења топло-беле и неутрално беле боје (редом 3000 K и 4000 K), и то како објективно тако и субјективно. Прво оцењивање је било засновано на видљивости малих мета и пешака, а друго на попуњавању упитника од стране испитаника који су учествовали у стварној вожњи. Испитивање које се односило на видљивост малих мета било је базирано на условима организације ANSI/IESNA, док је испитивање које се односило на детекцију пешака било засновано на софтверској анализи фотографија пешака који прелази улицу (пешак је био постављен у пет “тачака” дуж средње линије између одређених стубова у обе инсталације осветљења). Субјективно поређење релевантних параметара осветљења обе инсталације изведено је коришћењем упитника. Од учесника (возача) старости између 21 и 67 година (45 мушкараца и 8 жена) тражено је да изаберу погоднију од две инсталације у вези са сваком од шест разматраних параметара осветљења (ниво сјајности, боја светлости, физиолошко бљештање, уочавање пешака, уочавање светле препреке на коловозу и уочавање тамне препреке на коловозу), као и да упореде њихове опште видљивости. Нивои сјајности били су практично једнаки на обе деонице, на свакој од њих били су задовољени и сви остали параметри квалитета (општа и подужна равномерност сјајности, пораст прага и осветљеност непосредног окружења улице). Што се тиче објективне оцене, идентификована је незнатна предност у корист инсталације са светилкама са LED пакетима топло-беле боје у вези са уочавањем малих препрека и пешака. Испитивање базирано на субјективним доживљајима показало је да је већи број испитаника оценио инсталацију осветљења са светилкама са LED пакетима топло-беле боје као ону која донекле обезбеђује бољу општу видљивост. Предност LED пакета придружене температуре боје 3000 K такође је била изражена за већину анализираних параметара, уз напомену да се оба изузетка – уочавање пешака и детекција малих препрека светле боје на коловозу – односе на безбедност саобраћаја. Статистичка анализа је потврдила да је убедљива већина постојала само у погледу избора боје светлости (у корист инсталације са светилкама са LED пакетима придружене температуре боје 3000 K) и детекције препреке светле боје (у корист инсталације са светилкама са LED пакетима придружене температуре боје 4000 K).

Након свих извршених прорачуна, мерења, анализа и симулација, урађена је техно-економска анализа оправданости употребе LED технологије у уличном осветљењу. Техно-економска анализа је била посвећена адекватном поређењу LED светилки са светилкама са натријумовим изворима високог притиска или метал-халогеним изворима са керамичким гориоником, примењених за осветљење улица или путева намењених за моторизовани или мешовити саобраћај. Поређење је извршено са становишта потрошње електричне енергије и економских показатеља. Разматране су LED светилке са пакетима неутралне беле и топло-беле боје, светлосне искористивости до 160 lm/W, а за обе анализе су коришћена светлотехничка решења по критеријуму минималне инсталисане снаге. Поред стандардних LED пакета који се данас користе у светилкама намењеним осветљењу улица/путева, узети су у обзир и они које карактерише светлосна искористивост од 190 lm/W, који се комерцијално могу очекивати у блиској будућности. Светлотехничка решења су одређена тако да за сваку саобраћајницу буду испуњени сви фотометријски захтеви специфицирани у актуелним EN стандардима, уз услов да добијени нивои сјајности мање од 5% одступају од захтеваних. Применом представљене опште процедуре за поређење различитих инсталација осветљења улица/путева са или без уважавања мезопских ефеката, упоређена су само фотометријски еквивалентна светлотехничка решења. Што се тиче економске анализе, поред утицаја стандардних параметара – стопе актуелизације и цене електричне енергије – на укупне инвестиционе трошкове, спроведена анализа осетљивости обухватила је и утицај животног

века LED пакета. Добијени резултати су показали да се применом LED уместо светиљки са натријумовим или метал-халогеним изворима са керамичким гориоником могу постићи значајне уштеде електричне енергије (24–62%), и да су оне значајне чак и ако се не уваже мезопски ефекти. Показано је да односи између укупних актуелизованих трошкова упоредивих светлотехничких решења реализованих помоћу LED и натријумових/метал-халогених извора припадају опсегу 0,43–1,34. Проширена анализа осетљивости трошкова, изведена разматрањем утицаја животног века LED пакета (као трећег утицајног параметра), показала је да он само незнатно утиче на укупне трошкове.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Glover JD, Sarma SM, Overbye JT. Power system analysis and design (Fifth Edition). USA: Cengage Learning, 2011.
- [2] http://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/20406/Energy_efficient_lighting.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [3] Marimuthu C, Kirubakaran V. Carbon and energy pay back period for the solar street light using life cycle assessment. *International Journal of ChemTech Research* 2015; 8: 1125–1130.
- [4] Abbatantuono G, Bruno S, Scala ML, Naschetti A, Stecchi U. Harmonic distortion in low voltage isolated distribution grids. *EEEIC 2016 - International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Florence, Italy, June 7–10: 2016.
- [5] Hermoso-Orzáez MJ, Rojas-Sola JI, Gago-Calderón A. Electrical consequences of large-scale replacement of metal halide by LED luminaires. *Lighting Research & Technology* 2018; 50: 282–293.
- [6] Gil-De-Castro A, Moreno-Munoz A, Larsson A, De La Rosa JJG, Bollen MHJ. LED street lighting: A power quality comparison among street light technologies. *Lighting Research & Technology* 2013; 45: 710–728.
- [7] Yoomak S, Jettanasen C, Ngaopitakkul A, Bunjongjit S. Comparative study of lighting quality and power quality for LED and HPS luminaires in a roadway lighting system. *Energy and Buildings* 2018; 159: 542–557.
- [8] Karawia H, Elhoseiny M, Mahmoud M. Harmonic analysis for street lighting lamps. *CIREN - Open Access Proceedings Journal* 2017; 2017: 655–658.
- [9] Ilo A, Torabi E, Wötlz G, Gawlik W. Behaviour of street-lighting feeders supplying traditional and new light-emitting diode lamps. *CIREN - Open Access Proceedings Journal* 2017; 2017: 2131–2135.
- [10] Sakar S, Bagheri A, Rönnberg S, Bollen MHJ. Susceptibility of LED street lamps to voltage dips. *Lighting Research & Technology* 2020; 52: 1040–1056.
- [11] Djuretic A, Kostic M. Actual energy savings when replacing high-pressure sodium with LED luminaires in street lighting. *Energy* 2018; 157: 367–378.
- [12] Commission Internationale de l’Eclairage. *Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic*. CIE Publication 115-2010. Vienna: CIE, 2010.
- [13] Djuretic A, Skerovic V, Arsic N, Kostic M. Luminous flux to input power ratio, power factor and harmonics when dimming high-pressure sodium and LED luminaires used in road lighting. *Lighting Research & Technology* 2019; 51: 304–323.
- [14] http://www.docs.lighting.philips.com/en_gb/oem/download/xitanium/Xitanium_150W_0.35-0.70A_GL_Prog_sXt_929000702202.pdf.
- [15] http://led.lginnotek.com/common/fileDown.do?_fileId=MzUzNg==
- [16] Sikora R, Markiewicz P. Analysis of electric power quantities of road LED luminaires under sinusoidal and non-sinusoidal conditions. *Energies* 2019; 1109.
- [17] https://www.docs.lighting.philips.com/en_gb/oem/download/xitanium/Xi_LP_75W_0.3-1.0A_S1_230V_S240_sXt_929000963306.pdf
- [18] LG Innotek. PISE-A165X Technical specification. 2018.

- [19] Nexans Olex. Power cable catalogue. 2012.
- [20] <http://www.schreder.com/globalassets/sitecollectiondocuments/additional-content/schreder-owlet-control-systems-v2.pdf>
- [21] Kostic MB, Djokic LS. A modified CIE mesopic table and the effectiveness of white light sources. *Lighting Research & Technology* 2012; 44: 416–426.
- [22] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Non-sinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions. IEEE Standard 1459. Piscataway: IEEE, 2010.
- [23] Späth H. A general purpose definition of active current and non-active power based on German standard DIN 40110. *Electrical Engineering* 2007; 89: 167–175.
- [24] Kusters NL, Moore WJM. On the definition of reactive power under non-sinusoidal conditions. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 1980; 99: 1845–1854.
- [25] Czarnecki LS. Currents' physical components (CPC) concept: A fundamental of power theory. 2008 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, Lagow, Poland, June 10–13: 2008.
- [26] Czarnecki LS. Budeanu and Fryze: Two frameworks for interpreting power properties of circuits with nonsinusoidal voltages and currents. *Electrical Engineering* 1997; 80: 359–367.
- [27] Czarnecki LS. Considerations on the reactive power in nonsinusoidal situations. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 1985; 34: 399–404.
- [28] Radakovic ZR, Topalis FV, Kostic MB. The voltage distortion in low voltage networks caused by compact fluorescent lamps with electronic gear. *Electric Power Systems Research* 2005; 73: 129–136.
- [29] Arrillaga J, Watson NR. Power system harmonics analysis. USA: John Wiley & Sons, 2000.
- [30] Sunderland KM, Conlon MF. 4-Wire load flow analysis of a representative urban network incorporating SSEG. 47th Universities Power Engineering Conference (UPEC), London, UK, Sep 4–7: 2012.
- [31] Hecht J. The early-adopter blues. *IEEE Spectrum* 2016; 53: 44–50.
- [32] International Electrotechnical Commission. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase). IEC Publication 61000-3-2:2018+AMD1:2020 CSV Consolidated version. Geneva: IEC, 2020.
- [33] Czarnecki LS. Comparison of instantaneous reactive power p-q theory with theory of the current's physical components. *Electrical Engineering* 2003; 85: 21–28.
- [34] Škrbić B, Mikulović J, Šekara T. Extension of the CPC power theory to four-wire power systems with non-sinusoidal and unbalanced voltages. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 2019; 105: 341–350.
- [35] European Committee for Electrotechnical Standardization. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems. CENELEC Publication EN 50160. Brussels: CENELEC, 2014.
- [36] <https://www.youtube.com/watch?v=-kuETDmxJO0>
- [37] http://onlinemanuals.txdot.gov/txdotmanuals/hwi/calculating_voltage_drop.htm
- [38] Djuretic A, Kostic M. Comparison of electronic and conventional ballasts used in roadway lighting. *Lighting Research & Technology* 2014; 46: 407–420.

- [39] Davidovic M, Djordjevic N, Mikulovic J, Kostic M, Radakovic Z. Voltage distortion in LED street lighting installations. *Electrical Engineering* 2021; 103: 2161–2180.
- [40] <http://home.etf.rs/~kostic/docs/Document2.pdf>
- [41] Philips Lighting B. V. Lighting manual (fifth edition). Netherlands: LiDAC, 1993.
- [42] International Electrotechnical Commission. Protection for Safety – Protection Against Electric Shock (5th Edition). IEC Publication 60364-4-41. Geneva: IEC, 2005.
- [43] Van Bommel W. Road Lighting – Fundamentals, Technology and Application. Switzerland: Springer International Publishing, 2015.
- [44] <https://energynews.us/midwest/chicago-dials-down-led-street-lamp-intensity-and-controversy/>
- [45] <http://volt.org/lessons-learned-davis-ca-led-streetlight-retrofit/>
- [46] Luo MR, Zhao F, Zhai Q, Liu X, Wang B. The impact of LED on human visual experience. *Proceedings of the 10th China International Forum on Solid State Lighting*, 10-12 November 2013, Beijing, China, 2013.
- [47] Beckwith D, Zhang X, Smalley E, Chan L, Yand M. LED streetlight application assessment project: Pilot study in Seattle, Washington. *Transportation Research Record* 2011; 2250: 65–75.
- [48] <http://www.darksky.org/lighting/3k/>
- [49] <https://www.ama-assn.org/ama-adopts-guidance-reduce-harm-high-intensity-street-lights>
- [50] Rea MS, Figueiro MG. Response to the 2016 AMA report on LED lighting. Troy, NY: Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, 2016.
- [51] Bullough JD. The blue-light hazard: A review. *Journal of the Illuminating Engineering Society* 2000; 29: 6–14.
- [52] Okuno T, Saito H, Ojima J. Evaluation of blue-light hazards from various light sources. *Developments in Ophthalmology* 2002; 35: 104–112.
- [53] American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Light and Near-infrared Radiation: TLV(R) Physical Agents, 7th Edition Documentation. Cincinnati: ACGIH, 2015.
- [54] Chartered Institution of Building Services Engineers / Society of Light and Lighting. Human Responses to Lighting Based on LED Lighting Solutions. London: CIBSE/SLL, 2016.
- [55] Houser K. The AMA’s misguided report on human and environmental effects of LED lighting. *Leukos* 2017; 13: 1–2.
- [56] Petrulis A, Petkevičius L, Vitta P, Vaicekauskas R, Žukauskas A. Exploring preferred correlated color temperature in outdoor environments using a smart solid-state light engine. *Leukos* 2018; 14: 95–106.
- [57] Jin H, Jin S, Chen L, Cen S, Yuan K. Research on the lighting performance of LED street lights with different color temperatures. *IEEE Photonics Journal* 2015; 7: 1601309.
- [58] <http://www.cree.com/led-components/media/documents/XLampXTE.pdf>
- [59] <http://www.cree.com/led-components/media/documents/XLampXPE.pdf>
- [60] Commission Internationale de l’Eclairage. Road Lighting Calculations. CIE Publication 140-2000, Vienna: CIE, 2000.
- [61] Kostic A, Djokic L. Subjective impressions under LED and metal halide lighting. *Lighting Research and Technology* 2014; 46: 293–307.

- [62] Swenson JD, Griswold WF, Kleiber PB. Focus groups: Method of inquiry/intervention. *Small Group Research* 1992; 23: 459–474.
- [63] <http://www.eiu.edu/~ihed/Krueger-FocusGroupInterviews.pdf>.
- [64] Panik MJ. *Statistical Inference – a Short Course*. Hoboken NJ: John Wiley and Sons, 2012.
- [65] http://www.technoteam.de/e5183/e5185/e5431/e5912/Specification-RiGO801-LED-eng_ger.pdf
- [66] Akashi Y, Morante P, Rea MS. An energy-efficient street lighting demonstration based upon the unified system of photometry. *CIE Symposium 2005 – Vision and Lighting in Mesopic Conditions*, Leon, Spain, May 21: 2005.
- [67] Morante P. *Mesopic street lighting demonstration and evaluation*, Troy, NY: Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, 2008.
- [68] Underwood G, Crundall D, Chapman P. Driving simulator validation with hazard perception. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 2011; 14: 435–446.
- [69] <https://www.cree.com/led-components/products/xlamp-leds-discrete/xlamp-xp-g3>
- [70] Lu K, Zhang W, Sun B. Multidimensional Data-Driven Life Prediction Method for White LEDs Based on BP-NN and Improved-Adaboost Algorithm. *IEEE Access* 2017; 5: 21660–21668.
- [71] http://bsl.lacity.org/downloads/led/municipalities-utilities/led_evaluation_report_phase_1.pdf
- [72] <https://www.sanjoseca.gov/DocumentCenter/View/18941>
- [73] Commission Internationale de l’Eclairage. *Color Rendering of White LED Light Sources*. CIE Publication 177-2007. Vienna: CIE, 2007.
- [74] Commission Internationale de l’Eclairage. *Color Fidelity Index for Accurate Scientific Use*. CIE Publication 224-2017. Vienna: CIE, 2017.
- [75] <http://www.nantucket-ma.gov/Archive/ViewFile/Item/321>
- [76] Jin H, Jin S, Chen L, Cen S, Yuan K. Research on the lighting performance of LED street lights with different color temperatures. *IEEE Photonics Journal* 2015; 7: 1–9.
- [77] https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/2013_gateway_pedestrian.pdf
- [78] https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f14/ssl_mypp2013_web.pdf
- [79] Davidovic M, Djokic L, Cabarkapa A, Kostic M. Warm white versus neutral white LED street lighting: Pedestrians’ impressions. *Lighting Research & Technology* 2019; 51: 1237–1248.
- [80] Adrian W. Visibility levels under night-time driving conditions. *Journal of the Illuminating Engineering Society* 1987; 16: 3–12.
- [81] Adrian W. Visibility of targets: model for calculations. *Lighting Research & Technology* 1989; 21: 181–188.
- [82] Adrian W. Visibility levels in street lighting: an analysis of different experiments. *Journal of the Illuminating Engineering Society* 1993; 22: 49–52.
- [83] Commission Internationale de l’Eclairage. *Recommendations for the Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic*. CIE Publication 115-1995. Vienna: CIE, 1995.
- [84] American National Standards Institute, Illuminating Engineering Society. *American Standard Practice for Roadway Lighting*. ANSI/IES Publication RP-8. New York: ANSI/IES, 1993.

- [85] American National Standards Institute, Illuminating Engineering Society. American National Standard Practice for Roadway Lighting. ANSI/IES Publication RP-8-00. New York: ANSI/IES, 2000.
- [86] American National Standards Institute, Illuminating Engineering Society. American National Standard Practice for Roadway and Street Lighting. ANSI/IES Publication RP-8-14. New York: ANSI/IES, 2014.
- [87] http://gloptic.com/wp-content/uploads/PDF/200927_Technical-Datasheet_SPECTIS-1-0.pdf
- [88] http://www.technoteam.de/e5183/e5185/e5431/e5912/Specification-RiGO801-LED-eng_ger.pdf
- [89] Meyer JE, Gibbons RB. Luminance Metrics for Roadway Lighting. Blacksburg, VA, USA: NSTSCE, 11-UL-009, 2011.
- [90] UK Government – Department for Transport. The Highway Code – Rule 126. London: UK Government, 2018.
- [91] <https://www.random-science-tools.com/physics/stopping-distance.htm>
- [92] Dyble M, Narendran N, Bierman A, Klein T. Impact of dimming white LEDs: Chromaticity shifts due to different dimming methods. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Fifth International Conference on Solid State Lighting, San Diego, CA, USA, Sep 14: 2005.
- [93] European Committee for Standardization. Road Lighting – Part 3: Calculation of Performance. CEN Publication 13201-3:2015. Brussels: CEN, 2015.
- [94] Klinger KD, Lemmer U. The influence of ambient light on the driver. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, SPIE Photonics Europe 2008, Strasbourg, France, Apr 26: 2008.
- [95] Bacelar A. The contribution of vehicle lights in urban and peripheral urban environments. Lighting Research & Technology 2004; 36: 69–76.
- [96] Bozorg Chenani S, Maksimainen M, Tetri E, Kosonen I, Luttinen T. The effects of dimmable road lighting: A comparison of measured and perceived visibility. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 2016; 43: 141–156.
- [97] Mayeur A, Bremond R, Bastien JMC. The effect of the driving activity on target detection as a function of the visibility level: Implications for road lighting. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour 2010; 13: 115–128.
- [98] Rinner O, Gegenfurtner KR. Time course of chromatic adaptation for color appearance and discrimination. Vision Research 2000; 40: 1813–1826.
- [99] Boyce PR. Lighting for Driving – Roads, Vehicles, Signs and Signals. USA: CRC Press, 2009.
- [100] Hong S, Kim I, Kim H, Sohn A, Choi AS, Sung M, Jeong JW. Evaluation of the visibility of colored objects under led lighting with various correlated color temperatures. Color Research and Application 2017; 42: 78–88.
- [101] Ju J, Chen D, Lin Y. Effects of correlated color temperature on spatial brightness perception. Color Research and Application 2012; 37: 450–454.
- [102] Kostic AM, Kremic MM, Djokic LS, Kostic MB. Light-emitting diodes in street and roadway lighting - A case study involving mesopic effects. Lighting Research & Technology 2013; 45: 217–229.

- [103] Kostic M, Djokic L, Pojatar D, Strbac-Hadzibegovic N. Technical and economic analysis of road lighting solutions based on mesopic vision. *Building and Environment* 2009; 44: 66–75.
- [104] <https://creelighting-canada.com/why-cree-led/>
- [105] https://www.tridonic.com/com/en/download/data_sheets/Module_RLE_2x6_EXC2_OTD_en.pdf
- [106] European Committee for Standardization. Road lighting. Part 2: Performance requirements. CEN Publication 13201-2:2015. Brussels: CEN, 2015.
- [107] Dzombak R, Kasikaralar E, Dillon HE. Exploring cost and environmental implications of optimal technology management strategies in the street lighting industry. *Resources, Conservation & Recycling: X* 2020; 6: 100022.
- [108] Donatello S, Quintero RR, Gama Caldas M, Wolf O, Van Tichelen P, Van Hoof V, Geerken T (VITO). Revision of the EU green public procurement criteria for road lighting and traffic signals. Technical report and criteria proposal. Seville, Spain: Joint Research Centre, 2019.
- [109] Gorgulu S, Kocabey S. An energy saving potential analysis of lighting retrofit scenarios in outdoor lighting systems: A case study for a university campus. *Journal of Cleaner Production* 2020; 260: 121060.
- [110] Pagden M, Ngahane K, Amin MSR. Changing the colour of night on urban streets - LED vs. part-night lighting system. *Socio-Economic Planning Sciences* 2020; 69: 100692.
- [111] Beccali M, Bonomolo M, Ciulla G, Galatioto A, Lo Brano V. Improvement of energy efficiency and quality of street lighting in South Italy as an action of Sustainable Energy Action Plans. The case study of Comiso (RG). *Energy* 2015; 92: 394–408.
- [112] Tähkämö L, Räsänen RS, Halonen L. Life cycle cost comparison of high-pressure sodium and light-emitting diode luminaires in street lighting. *International Journal of Life Cycle Assessment* 2016; 21: 137–145.
- [113] Campisi D, Gitto S, Morea D. Economic feasibility of energy efficiency improvements in street lighting systems in Rome. *Journal of Cleaner Production* 2018; 175: 190–198.
- [114] Beccali M, Bonomolo M, Lo Brano V, Ciulla G, Di Dio V, Massaro F, Favuzza S. Energy saving and user satisfaction for a new advanced public lighting system. *Energy Conversion and Management* 2019; 195: 943–957.
- [115] Jägerbrand AK. LED (Light-Emitting Diode) road lighting in practice: An evaluation of compliance with regulations and improvements for further energy savings. *Energies* 2016; 9: 357.
- [116] Clanton N, Gibbons R, Garcia J, Barber M. Seattle LED Adaptive Lighting Study. Portland, OR, USA: Northwest Energy Efficiency Alliance, 2014.
- [117] De Oliveira Grando F, Ghisi E. Assessment of public lighting systems considering mesopic vision. *Journal of Cleaner Production* 2021; 279: 123369.
- [118] Uchida T, Ohno Y. Simplified field measurement methods for the CIE mesopic photometry system. *Lighting Research & Technology* 2017; 49: 774–787.
- [119] Commission Internationale de l’Eclairage. Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance. CIE Publication 191-2010, Vienna: CIE, 2010.
- [120] Fryc I, Czyżewski D, Fan J, Gălăţanu CD. The drive towards optimization of road lighting energy consumption based on mesopic vision—a suburban street case study. *Energies* 2021;14. doi:10.3390/en14041175. 1. Fryc I, Czyżewski D, Fan J, Gălăţanu CD. The drive towards

optimization of road lighting energy consumption based on mesopic vision—a suburban street case study. *Energies* 2021; 14: 1175.

[121] Bullough JD, Radetsky LC. Analysis of new highway lighting technologies (final report of the project No. 20-7/305). Troy, NY: Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute, 2013.

[122] https://nardus.mpn.gov.rs/bitstream/handle/123456789/6488/andrej_djuretic_dd.pdf?sequence=5&isAllowed=y

[123] Davidovic M, Djokic L, Cabarkapa A, Djuretic A, Skerovic V, Kostic M. Drivers' preference for the color of LED street lighting. *IEEE Access* 2019; 7: 72850-72861.

[124] Illuminating Engineering Society. Recommended practice for photobiological safety for lamps and lamp systems: General requirements. IES Publication RP-27.1-15. New York: IES, 2015.

[125] Rea MS, Bierman A, Figueiro MG, Bullough JD. A new approach to understanding the impact of circadian disruption on human health. *Journal of Circadian Rhythms* 2008; 6: 1–14.

[126] Oh JH, Yang SJ, Do YR. Healthy, natural, efficient and tunable lighting: Four-package white LEDs for optimizing the circadian effect, color quality and vision performance. *Light: Science & Applications* 2014; 3: e141.

[127] Svehkina A, Portnov BA, Trop T. The impact of artificial light at night on human and ecosystem health: A systematic literature review. *Landscape Ecology* 2020; 35: 1725–1742.

[128] Sanders D, Gaston KJ. How ecological communities respond to artificial light at night. *Journal of Experimental Zoology Part A: Ecological and Integrative Physiology* 2018; 329: 394–400.

[129] Bierman A. Will switching to LED outdoor lighting increase sky glow? *Lighting Research & Technology* 2012; 44: 449–458.

[130] Falchi F, Cinzano P, Elvidge CD, Keith DM, Haim A. Limiting the impact of light pollution on human health, environment and stellar visibility. *Journal of Environmental Management* 2011; 92: 2714–2722.

[131] Cenci MP, Dal Berto FC, Castillo BW, Veit HM. Precious and critical metals from wasted LED lamps: Characterization and evaluation. *Environmental Technology* 2022; 43: 1870–1881.

[132] [https://undocs.org/en/a/70/49\(Vol.I\)](https://undocs.org/en/a/70/49(Vol.I))

[133] Jägerbrand AK. New framework of sustainable indicators for outdoor LED (light emitting diodes) lighting and SSL (solid state lighting). *Sustainability* 2015; 7: 1028–1063.

[134] Jägerbrand AK. Development of an indicator system for local governments to plan and evaluate sustainable outdoor lighting. *Sustainability* 2021; 13: 1–22.

[135] European Committee for Standardization. Road lighting. Part 1: Selection of lighting classes. CEN Publication 13201-1:2014. Brussels: CEN, 2014.

[136] European Committee for Standardization. Road lighting. Part 4: Methods of measuring lighting performance. CEN Publication 13201-4:2015. Brussels: CEN, 2015.

[137] http://home.etf.rs/~kostic/docs/ONYX_EN.pdf

[138] http://home.etf.rs/~kostic/docs/CITEA_EN.pdf

[139] <https://rs.schreder.com/en/products/ampera-led-street-lighting>

[140] <https://rs.schreder.com/en/products/voltana-street-luminaire>

[141] Kostic M, Djokic L. Recommendations for energy efficient and visually acceptable street lighting. *Energy* 2009; 34: 1565–1572.

- [142] Commission Internationale de l'Eclairage. Road lighting calculations. CIE Publication 140-2019, Vienna: CIE, 2019.
- [143] American National Standards Institute, Illuminating Engineering Society. American National Standard Practice for Design and Maintenance of Roadway and Parking Facility Lighting. ANSI/IES Publication RP-8-2018. New York: ANSI/IES, 2018.
- [144] Sędziwy A. A new approach to street lighting design. *Leukos* 2016; 12: 151–162.
- [145] Ernst S, Łabuz M, Środa K, Kotulski L. Graph-based spatial data processing and analysis for more efficient road lighting design. *Sustainability* 2018; 10: 3850.
- [146] Illuminating Engineering Society. IES method for evaluating light source color rendition. IES Publication TM-30-15. New York: IES, 2015.
- [147] <https://www.venturelightingeurope.com/products/hid-lighting/ballasts-and-components/magnetic-ballasts/?watts=150>
- [148] Boyce PR, Fotios S, Richards M. Road lighting and energy saving. *Lighting Research & Technology* 2009; 41: 245–260.
- [149] Wang Y, Zou Y. Study on illumination for state highways (WA-RD 847.1). Seattle, WA, USA: Washington State Department of Transportation (WSDOT), Office of Research & Library Services, 2016.
- [150] Tetri E, Bozorg Chenani S, Räsänen RS, Baumgartner H, Vaaja M, Sierla S, Tähkämö L, Virtanen JP, Kurkela M, Ikonen E, Halonen L, Hyypä H, Kosonen I. Tutorial: Road lighting for efficient and safe traffic environments. *Leukos* 2017; 13: 223–241.
- [151] Casamayor JL, Su D, Ren Z. Comparative life cycle assessment of LED lighting products. *Lighting Research & Technology* 2018; 50: 801–826.
- [152] Tähkämö L, Halonen L. Life cycle assessment of road lighting luminaires - Comparison of light-emitting diode and high-pressure sodium technologies. *Journal of Cleaner Production* 2015; 93: 234–242.
- [153] Collin AJ, Djokic SZ, Drapela J, Langella R, Testa A. Light flicker and power factor labels for comparing LED lamp performance. *IEEE Transactions on Industry Applications* 2019; 55: 7062–7070.

ПРИЛОГ 1

Резултати фотометријских прорачуна

Табела 1. Резултати фотометријских прорачуна добијени коришћењем натријумове светиљке Опух 2

Распоред	Светло-техничка класа	Критеријум	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lamp} (W)	kW/km
Једнострани 2 траке	M3	S_{max}	37	8	0,87	10	1,25	55	60	14,1	0,62	150	4,1
	M3	P_{min}	36	8	1,37	10	1,08	46	60	14,6	0,42	100	2,8
	M4	S_{max}	36	8	0,37	10	0,78	60	61	12,8	0,54	100	2,8
	M4	P_{min}	29	7	0,87	5	0,72	53	64	11,2	0,40	70	2,4
	M5	S_{max}	45	8	-0,63	10	0,51	47	39	13,6	0,72	100	2,2
	M5	P_{min}	41	8	0,87	0	0,53	42	41	11,3	0,53	70	1,7
	M6	S_{max}/ P_{min}	45	8	-0,13	10	0,40	46	39	13,4	0,65	70	1,6
Цик-цак 3 траке	M3	S_{max}	26	8	1,37	10	1,38	46	60	12,1	0,62	150	5,8
	M3	P_{min}	17	7	0,87	10	0,99	39	68	10,6	0,51	70	4,1
	M4	S_{max}	27	8	1,37	10	0,80	46	60	10,7	0,60	100	3,7
	M4	P_{min}	21	8	0,87	10	0,75	40	69	9,7	0,55	70	3,3
	M5	S_{max}	38	8	1,37	10	0,59	36	39	13,0	0,68	100	2,6
	M5	P_{min}	35	8	1,37	5	0,51	37	39	12,1	0,56	70	2,0
Двострани наспрамни 3 траке	M2	S_{max}	29	8	-0,63	10	1,79	68	68	10,0	0,51	100	6,9
	M2	P_{min}	23	8	0,37	0	1,45	59	68	9,8	0,49	70	6,1
	M3	S_{max}	36	8	1,37	0	1,77	47	60	14,9	0,49	100	5,6
	M3	P_{min}	33	8	1,37	5	1,01	42	61	14,4	0,51	70	4,2
	M4	S_{max}/ P_{min}	35	8	0,37	10	0,89	47	61	14,9	0,55	70	4,0
Двострани наспрамни 4 траке	M1	S_{max}	28	8	0,37	5	2,46	61	68	9,9	0,52	150	10,7
	M1	P_{min}	25	8	1,37	10	1,98	54	69	9,9	0,45	100	8,0
	M2	S_{max}	27	8	0,37	5	1,67	60	69	10,0	0,50	100	7,4
	M2	P_{min}	20	7	1,37	0	1,46	44	79	9,8	0,50	70	7,0
	M3	S_{max}	37	8	-0,63	10	1,08	47	59	14,5	0,61	100	5,4
	M3	P_{min}	28	7	0,87	0	1,01	39	60	10,9	0,50	70	5,0
Централни 3 траке (градске улице)	M1	S_{max}	34	10	0,87	10	2,08	51	70	9,9	0,58	250	14,7
	M1	P_{min}	23	10	0,87	10	1,92	41	79	8,6	0,47	150	13,0
	M2	S_{max}/ P_{min}	31	10	0,87	10	1,43	40	74	9,9	0,47	150	9,7
Централни 3 траке (аутопут)	M1	S_{max}/ P_{min}	42	13	0,87	0	1,91	41	68	9,5	0,56	250	11,9
	M2	S_{max}	48	13	0,87	5	1,45	48	69	9,9	0,70	250	10,4
	M2	P_{min}	32	13	0,87	5	1,45	39	77	9,7	0,56	150	9,4

Табела 2. Резултати фотометријских прорачуна добијени коришћењем натријумове светиљке Citea

Распоред	Светло-техничка класа	Критеријум	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lamp} (W)	Тип светиљке	kW/km
Једнострани 2 траке	M3	S_{max}/P_{min}	35	8	1,30	10	1,02	42	60	14,5	0,50	100	Midi	2,9
	M4	S_{max}	36	8	0,80	10	0,91	47	59	14,8	0,51	100	Midi	2,8
	M4	P_{min}	31	7	1,25	5	0,73	39	61	12,2	0,35	70	Mini	2,3
	M5	S_{max}/P_{min}	46	8	1,25	5	0,55	35	39	13,0	0,43	70	Mini	1,5
	M6	S_{max}/P_{min}	46	8	-0,21	10	0,43	43	39	15,9	0,62	70	Midi (Mini)	1,5
Цик-цак 3 траке	M3	S_{max}	24	8	1,30	10	1,37	50	59	7,9	0,57	150	Midi	6,3
	M3	P_{min}	18	8	1,30	10	1,00	49	69	9,7	0,52	70	Midi (Mini)	3,9
	M4	S_{max}	21	8	1,30	5	0,81	53	59	7,5	0,68	100	Midi	4,8
	M4	P_{min}	20	8	1,30	10	0,74	45	59	11,3	0,60	70	Midi (Mini)	3,5
	M5	S_{max}	39	8	1,30	10	0,59	44	39	14,8	0,67	100	Midi	2,6
	M5	P_{min}	35	8	1,30	5	0,49	40	39	15,0	0,61	70	Midi (Mini)	2,0
Двострани наспрамни 3 траке	M2	S_{max}	28	8	0,75	0	1,66	57	68	9,9	0,48	100	Mini	7,1
	M2	P_{min}	25	8	1,30	10	1,45	62	79	9,3	0,52	70	Midi (Mini)	5,6
	M3	S_{max}/P_{min}	37	8	1,30	10	0,97	48	67	11,7	0,52	70	Midi (Mini)	3,8
	M4	S_{max}/P_{min}	40	8	0,30	10	0,81	51	61	14,5	0,59	70	Midi (Mini)	3,5
Двострани наспрамни 4 траке	M1	S_{max}	32	8	0,80	0	1,93	48	68	9,5	0,54	150	Midi	9,4
	M1	P_{min}	23	8	1,30	5	1,99	58	76	9,7	0,45	100	Midi	8,7
	M2	S_{max}	33	8	-0,21	5	1,65	54	69	10,0	0,62	150	Midi (Mini)	9,1
	M2	P_{min}	20	7	1,25	10	1,48	58	82	9,5	0,45	70	Mini	7,0
	M3	S_{max}	37	8	0,30	10	1,01	42	60	14,5	0,59	100	Midi	5,4
	M3	P_{min}	31	7	1,25	10	0,96	45	69	12,7	0,49	70	Mini	4,5
Централни 3 траке (градске улице)	M1	S_{max}/P_{min}	37	10	0,30	10	2,01	44	71	10,0	0,57	250	Midi	13,5
	M2	S_{max}	39	10	0,80	10	1,51	55	70	10,0	0,66	250	Midi	12,8
	M2	P_{min}	28	9	0,80	10	1,45	39	81	7,4	0,47	150	Midi (Mini)	10,7
Централни 3 траке (аутопут)	M1	S_{max}/P_{min}	40	12	0,30	0	1,94	41	81	9,5	0,58	250	Midi	12,5
	M2	S_{max}/P_{min}	50	13	0,80	0	1,50	45	77	10,0	0,64	250	Midi	10,0

Табела 3. Резултати фотометријских прорачуна добијени коришћењем метал-халогене светиљке Опух 2

Распоред	Светло-техничка класа	Критеријум	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lamp} (W)	kW/km
Једнострани 2 траке	M3	S_{max}	37	8	0,87	10	1,03	55	60	13,9	0,62	150	4,1
	M3	P_{min}	34	8	1,37	5	1,03	40	63	14,9	0,37	100	2,9
	M4	S_{max}	37	8	0,37	10	0,86	62	59	13,0	0,68	150	4,1
	M4	P_{min}	29	7	0,87	5	0,72	53	64	11,4	0,40	70	2,4
	M5	S_{max}	44	8	-0,13	10	0,57	48	40	14,5	0,62	100	2,3
	M5	P_{min}	41	8	0,87	0	0,53	42	41	11,6	0,53	70	1,7
	M6	S_{max}/P_{min}	45	8	-0,13	10	0,39	46	39	13,7	0,65	70	1,6
Цик-цак 3 траке	M3	S_{max}	26	8	1,37	10	1,14	46	60	12,0	0,62	150	5,8
	M3	P_{min}	17	7	0,87	10	0,98	39	68	10,9	0,51	70	4,1
	M4	S_{max}	25	8	0,87	10	0,74	43	60	10,4	0,61	100	4,0
	M4	P_{min}	21	8	1,37	10	0,75	41	72	9,8	0,54	70	3,3
	M5	S_{max}	38	8	1,37	10	0,51	36	39	12,9	0,68	100	2,6
	M5	P_{min}	35	8	1,37	5	0,51	37	39	12,4	0,56	70	2,0
Двострани наспрамни 3 траке	M2	S_{max}	29	8	-0,63	10	1,54	68	68	10,0	0,51	100	6,9
	M2	P_{min}	23	8	1,37	5	1,44	49	74	9,9	0,48	70	6,1
	M3	S_{max}	36	8	-0,13	5	1,34	54	61	15,0	0,62	100	5,6
	M3	P_{min}	33	8	1,37	5	1,01	42	61	14,8	0,51	70	4,2
	M4	S_{max}/P_{min}	35	8	-0,13	10	0,87	50	59	14,9	0,56	70	4,0
Двострани наспрамни 4 траке	M1	S_{max}	28	8	0,37	5	2,03	61	68	9,8	0,52	150	10,7
	M1	P_{min}	22	8	1,37	10	1,94	58	76	9,2	0,45	100	9,1
	M2	S_{max}	28	8	-0,13	10	1,87	57	69	10,0	0,57	150	10,7
	M2	P_{min}	20	7	1,37	0	1,45	44	79	10,0	0,50	70	7,0
	M3	S_{max}	37	8	-0,63	10	1,30	49	60	14,9	0,69	150	8,1
	M3	P_{min}	26	7	0,87	0	0,96	43	63	10,4	0,50	70	5,4
Централни 3 траке (градске улице)	M1	S_{max}	30	10	0,37	5	1,92	40	69	9,7	0,48	250	16,7
	M1	P_{min}	19	10	0,87	10	1,96	40	79	9,4	0,49	150	15,8
	M2	S_{max}	34	10	0,87	10	1,56	51	70	9,6	0,58	250	14,7
	M2	P_{min}	25	10	0,87	10	1,46	42	80	8,9	0,47	150	12,0
Централни 3 траке (аутопут)	M1	S_{max}	33	13	0,87	10	1,92	39	74	9,9	0,55	250	15,2
	M1	P_{min}	20	13	0,37	10	1,93	39	91	9,6	0,56	150	15,0
	M2	S_{max}	42	13	0,87	0	1,43	41	68	9,2	0,56	250	11,9
	M2	P_{min}	18	13	0,87	5	1,44	40	96	9,7	0,55	100	11,1

Табела 4. Резултати фотометријских прорачуна добијени коришћењем метал-халогене светиљке Citea Midi

Распоред	Светло-техничка класа	Критеријум	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lamp} (W)	kW/km
Једнострани 2 траке	M3	S_{max}	34	8	1,30	5	1,33	50	60	12,7	0,47	150	4,4
	M3	P_{min}	31	8	1,30	10	0,98	42	60	10,0	0,38	100	3,2
	M4	S_{max}	34	8	-0,71	5	0,93	52	60	10,0	0,46	150	4,4
	M4	P_{min}	29	8	1,30	10	0,73	46	60	8,8	0,37	70	2,4
	M5	S_{max}	42	8	1,30	10	0,78	38	39	11,0	0,45	100	2,4
	M5	P_{min}	41	8	0,30	10	0,49	47	39	10,5	0,47	70	1,7
	M6	S_{max}/P_{min}	41	8	-0,71	10	0,46	37	41	12,0	0,44	70	1,7
Цик-цак 3 траке	M3	S_{max}	26	8	1,30	10	1,04	44	59	12,5	0,58	150	5,8
	M3	P_{min}	17	8	0,80	10	0,97	46	59	8,3	0,45	70	4,1
	M4	S_{max}	27	8	0,30	10	0,90	50	60	8,7	0,60	150	5,6
	M4	P_{min}	18	8	-0,21	10	0,82	51	60	8,6	0,50	70	3,9
	M5	S_{max}	36	8	1,30	10	0,61	38	39	10,6	0,53	100	2,8
	M5	P_{min}	34	8	1,30	5	0,48	34	41	10,3	0,51	70	2,1
Двострани наспрамни 3 траке	M2	S_{max}	32	8	0,80	5	1,45	57	68	9,8	0,47	100	6,3
	M2	P_{min}	24	7	1,30	5	1,47	51	71	9,3	0,39	70	5,8
	M3	S_{max}	39	8	-0,71	5	1,30	42	60	14,6	1,01	150	7,7
	M3	P_{min}	34	8	1,30	10	0,99	41	59	12,5	0,44	70	4,1
	M4	S_{max}/P_{min}	37	8	-0,21	10	0,73	47	59	12,9	0,53	70	3,8
Двострани наспрамни 4 траке	M1	S_{max}	32	8	-0,71	5	2,36	63	68	10,0	0,59	250	15,6
	M1	P_{min}	21	7	1,30	10	1,91	54	79	9,9	0,42	100	9,5
	M2	S_{max}	32	8	-0,21	5	1,52	59	71	9,8	0,54	150	9,4
	M2	P_{min}	19	7	1,30	10	1,48	52	82	8,6	0,39	70	7,4
	M3	S_{max}	36	8	-0,71	10	1,39	46	59	13,4	0,56	150	8,3
	M3	P_{min}	28	7	1,30	10	1,00	43	59	10,3	0,40	70	5,0
Централни 3 траке (градске улице)	M1	S_{max}	27	9	0,80	0	1,92	42	87	8,2	0,47	250	18,5
	M1	P_{min}	17	10	0,80	5	1,95	41	88	8,4	0,52	150	17,6
	M2	S_{max}/P_{min}	37	10	0,80	10	1,44	41	72	9,1	0,49	250	13,5
Централни 3 траке (аутопут)	M1	S_{max}	27	12	0,80	5	1,93	41	81	6,4	0,54	250	18,5
	M1	P_{min}	18	12	0,80	5	1,91	39	88	6,6	0,62	150	16,7
	M2	S_{max}	38	12	0,80	10	1,43	40	84	7,9	0,53	250	13,2
	M2	P_{min}	24	12	0,80	5	1,43	40	84	8,1	0,65	150	12,5

Табела 5. Резултати фотометријских прорачуна добијени коришћењем LED светиљке Амрега (700 mA) топло-беле боје светлости

Распоред	Светло-техничка класа	Критеријум	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lum} (W)	kW/km
Једнострани 2 траке	M3	S_{max}	43	8	0,34	0	1,21	53	59	14,9	0,60	136	3,2
	M3	P_{min}	30	8	1,29	0	0,98	45	85	10,4	0,30	53	1,8
	M4	S_{max}	43	8	0,34	0	0,91	53	59	14,1	0,60	103	2,4
	M4	P_{min}	41	8	1,29	0	0,72	41	62	13,1	0,30	53	1,3
	M5	S_{max}	50	8	-0,66	5	0,48	50	40	14,5	0,74	70	1,4
	M5	P_{min}	45	8	1,29	0	0,48	42	47	12,7	0,30	36,1	0,8
	M6	S_{max}	54	8	0,29	5	0,29	38	39	15,4	0,78	53	1,0
	M6	P_{min}	50	8	-0,71	10	0,36	43	39	15,4	0,34	36,1	0,7
Цик-цак 3 траке	M3	S_{max}	29	8	1,34	10	1,23	54	62	13,4	0,73	136	4,7
	M3	P_{min}	16	7	0,79	0	0,96	47	73	11,8	0,35	36,1	2,3
	M4	S_{max}	29	8	1,34	10	0,92	54	62	12,6	0,73	103	3,6
	M4	P_{min}	20	8	0,79	0	0,75	44	64	9,9	0,38	36,1	1,8
	M5	S_{max}	43	8	1,34	10	0,59	34	39	14,8	0,41	70	1,6
	M5	P_{min}	33	8	1,29	10	0,48	34	48	13,6	0,38	36,1	1,1
Двострани наспрамни 3 траке	M2	S_{max}	30	8	-0,05	0	1,86	76	68	7,6	0,96	165	11,0
	M2	P_{min}	20	7	0,29	0	1,47	69	90	9,6	0,43	36,1	3,6
	M3	S_{max}	47	8	-0,66	5	0,98	61	60	14,5	0,81	103	4,4
	M3	P_{min}	32	7	0,79	0	0,96	48	72	14,6	0,34	36,1	2,3
	M4	S_{max}	46	8	0,34	5	0,73	53	59	13,8	0,75	70	3,0
	M4	P_{min}	40	8	0,79	0	0,72	45	64	13,1	0,33	36,1	1,8
Двострани наспрамни 4 траке	M1	S_{max}	32	8	-0,16	0	2,04	51	69	9,9	0,65	136	8,5
	M1	P_{min}	18	8	1,29	0	2,00	48	89	8,3	0,36	53	5,9
	M2	S_{max}	32	8	-0,16	0	1,53	51	69	9,3	0,65	103	6,4
	M2	P_{min}	24	8	1,29	0	1,50	46	88	10,0	0,36	53	4,4
	M3	S_{max}	45	8	-0,66	5	1,13	44	59	15,0	0,66	103	4,6
	M3	P_{min}	36	8	0,79	0	0,97	44	77	12,0	0,40	53	2,9
Централни 3 траке (градске улице)	M1	S_{max}/P_{min}	31	10	0,45	5	1,92	40	77	10,0	0,43	165	10,6
	M2	S_{max}	37	10	0,45	0	1,43	58	76	9,8	0,68	165	8,9
	M2	P_{min}	32	10	0,84	5	1,44	42	71	9,5	0,42	136	8,5
Централни 3 траке (аутопут)	M1	S_{max}/P_{min}	35	12	0,95	0	1,91	39	84	9,3	0,44	165	9,4
	M2	S_{max}/P_{min}	45	13	0,95	0	1,44	42	75	9,7	0,48	165	7,3

Табела 6. Резултати фотометријских прорачуна добијени коришћењем LED светиљке Voltana (1000 mA) топло-беле боје светлости

Распоред	Светло-техничка класа	Критеријум	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lum} (W)	kW/km
Једнострани 2 траке	M3	S_{max}	44	8	1,35	5	1,15	43	59	15,0	0,73	212	4,8
	M3	P_{min}	35	8	0,83	10	0,96	53	72	13,7	0,30	80	2,3
	M4	S_{max}	41	8	-0,22	0	0,87	42	61	14,5	0,36	110	2,7
	M4	P_{min}	30	7	1,26	0	0,74	45	79	11,4	0,32	56	1,9
	M5	S_{max}	54	8	1,28	5	0,50	35	40	13,9	0,78	110	2,0
	M5	P_{min}	29	7	1,25	10	0,49	57	75	11,1	0,36	31	1,1
	M6	S_{max}	56	8	-0,67	5	0,34	35	41	19,8	0,70	80	1,4
	M6	P_{min}	43	8	0,25	10	0,30	46	41	14,4	0,36	31	0,7
Цик-цак 3 траке	M3	S_{max}	26	8	1,28	0	0,96	55	59	9,7	0,61	110	4,2
	M3	P_{min}	18	7	1,26	5	0,96	39	59	9,2	0,36	56	3,1
	M4	S_{max}	26	8	1,28	10	0,93	45	60	11,3	0,63	110	4,2
	M4	P_{min}	13	7	1,25	5	0,76	53	75	10,7	0,36	31	2,4
	M5	S_{max}	41	8	1,33	5	0,51	39	41	15,0	0,64	80	2,0
	M5	P_{min}	22	8	0,75	5	0,48	34	39	10,6	0,46	31	1,4
Двострани наспрамни 3 траке	M2	S_{max}	31	8	-0,65	0	1,76	76	69	7,7	0,92	212	13,7
	M2	P_{min}	25	8	1,26	0	1,49	64	75	9,9	0,47	56	4,5
	M3	S_{max}	46	8	-0,72	0	1,04	61	59	13,9	0,68	110	4,8
	M3	P_{min}	38	8	0,26	10	0,96	49	62	13,7	0,45	56	2,9
	M4	S_{max}	48	8	-0,72	10	0,75	62	60	13,5	0,85	110	4,6
	M4	P_{min}	27	7	1,25	10	0,74	42	76	12,6	0,31	31	2,3
Двострани наспрамни 4 траке	M1	S_{max}	30	8	-0,65	0	2,63	64	74	9,9	0,70	212	14,1
	M1	P_{min}	22	8	1,33	5	1,95	49	87	9,0	0,41	80	7,3
	M2	S_{max}	31	8	-0,22	0	1,48	63	83	9,9	0,65	110	7,1
	M2	P_{min}	21	8	1,26	10	1,45	44	85	8,3	0,38	56	5,3
	M3	S_{max}	46	8	-0,15	5	1,41	53	59	14,9	0,81	212	9,2
	M3	P_{min}	31	8	1,26	10	0,98	42	77	10,4	0,38	56	3,6
Централни 3 траке (градске улице)	M1	S_{max}/P_{min}	31	10	0,85	5	1,91	42	90	10,0	0,45	212	13,7
	M2	S_{max}	36	10	0,85	10	1,57	46	81	10,0	0,55	212	11,8
	M2	P_{min}	21	10	0,78	5	1,43	42	90	7,6	0,45	110	10,5
Централни 3 траке (аутопут)	M1	S_{max}/P_{min}	34	12	0,85	10	1,94	42	80	9,7	0,37	212	12,5
	M2	S_{max}/P_{min}	44	13	0,85	10	1,45	44	80	10,0	0,46	212	9,6

Табела 7. Резултати фотометријских прорачуна добијени коришћењем LED светиљке Амрега (700 mA) неутралне беле боје светлости

Распоред	Светло-техничка класа	Критеријум	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lum} (W)	kW/km
Једнострани 2 траке	M3	S_{max}	43	8	0,34	0	1,08	53	59	14,6	0,60	103	2,4
	M3	P_{min}	36	8	1,29	0	0,98	45	77	12,3	0,30	53	1,5
	M4	S_{max}	43	8	0,84	0	0,82	48	59	15,0	0,44	70	1,6
	M4	P_{min}	32	8	1,29	0	0,73	44	85	10,4	0,30	36,1	1,1
	M5	S_{max}	51	8	0,29	0	0,50	47	39	15,0	0,69	53	1,0
	M5	P_{min}	48	8	1,29	0	0,54	34	41	13,8	0,30	36,1	0,8
	M6	S_{max}	56	8	-0,71	5	0,30	38	40	17,6	0,74	53	0,9
	M6	P_{min}	52	8	-0,21	0	0,32	48	39	14,1	0,75	36,1	0,7
Цик-цак 3 траке	M3	S_{max}	29	8	1,34	10	1,10	54	62	13,1	0,73	103	3,6
	M3	P_{min}	18	7	0,79	5	1,02	39	65	11,6	0,30	36,1	2,0
	M4	S_{max}	29	8	1,34	10	0,73	54	62	12,0	0,73	70	2,4
	M4	P_{min}	22	8	0,29	10	0,77	39	64	10,4	0,34	36,1	1,6
	M5	S_{max}	42	8	1,29	10	0,48	38	39	13,8	0,61	53	1,3
	M5	P_{min}	37	8	1,29	0	0,48	35	41	14,7	0,40	36,1	1,0
Двострани наспрамни 3 траке	M2	S_{max}	30	8	-0,66	0	1,55	65	73	9,9	0,52	70	4,7
	M2	P_{min}	23	8	0,29	0	1,47	73	90	9,9	0,45	36,1	3,1
	M3	S_{max}	47	8	-0,66	5	1,17	61	60	15,0	0,81	103	4,4
	M3	P_{min}	36	7	0,29	0	0,97	55	60	14,9	0,42	36,1	2,0
	M4	S_{max}	48	8	-0,66	10	0,75	60	60	14,4	0,83	70	2,9
	M4	P_{min}	43	8	0,29	0	0,72	43	59	15,0	0,44	36,1	1,7
Двострани наспрамни 4 траке	M1	S_{max}	32	8	-0,66	0	2,33	60	69	9,8	0,70	136	8,5
	M1	P_{min}	22	8	1,29	0	1,95	48	90	9,8	0,36	53	4,8
	M2	S_{max}	32	8	-0,16	0	1,82	51	69	9,7	0,65	103	6,4
	M2	P_{min}	19	7	-0,21	10	1,44	58	89	10,0	0,37	36,1	3,8
	M3	S_{max}	46	8	-0,16	10	1,05	52	59	14,9	0,81	103	4,5
	M3	P_{min}	30	7	1,29	0	0,97	39	82	11,7	0,31	36,1	2,4
Централни 3 траке (градске улице)	M1	S_{max}	33	10	-0,05	0	1,93	54	83	9,9	0,61	165	10,0
	M1	P_{min}	15	8	0,84	0	1,93	40	88	9,8	0,44	70	9,3
	M2	S_{max}	36	10	-0,66	10	1,43	40	70	10,0	0,45	136	7,6
	M2	P_{min}	16	10	0,29	10	1,43	39	88	8,8	0,42	53	6,6
Централни 3 траке (аутопут)	M1	S_{max}/P_{min}	40	13	0,45	0	1,93	39	80	9,2	0,47	165	8,3
	M2	S_{max}	48	13	-0,05	5	1,56	39	69	10,0	0,40	165	6,9
	M2	P_{min}	41	13	0,84	5	1,44	43	71	8,8	0,39	136	6,6

Табела 8. Резултати фотометријских прорачуна добијени коришћењем LED светиљке Voltana (1000 mA) неутралне беле боје светлости

Распоред	Светло-техничка класа	Критеријум	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lum} (W)	kW/km
Једнострани 2 траке	M3	S_{max}	43	8	1,35	10	1,25	44	62	14,9	0,74	212	4,9
	M3	P_{min}	38	8	0,83	10	0,97	50	59	14,9	0,30	80	2,1
	M4	S_{max}	41	8	-0,22	5	0,93	48	60	13,9	0,45	110	2,7
	M4	P_{min}	33	7	1,26	0	0,74	43	66	12,4	0,32	56	1,7
	M5	S_{max}	54	8	1,28	5	0,54	35	40	14,2	0,78	110	2,0
	M5	P_{min}	29	7	1,25	10	0,49	57	75	11,1	0,36	31	1,1
	M6	S_{max}	56	8	-0,67	0	0,37	34	40	20,0	0,70	80	1,4
	M6	P_{min}	45	8	-0,25	10	0,30	41	39	15,4	0,30	31	0,7
Цик-цак 3 траке	M3	S_{max}	26	8	1,28	5	1,08	45	59	11,3	0,62	110	4,2
	M3	P_{min}	11	7	1,25	10	0,99	41	81	8,9	0,31	31	2,8
	M4	S_{max}	27	8	-0,22	10	0,76	54	59	12,7	0,82	110	4,1
	M4	P_{min}	15	7	1,25	10	0,73	41	71	11,0	0,31	31	2,1
	M5	S_{max}	41	8	0,83	10	0,51	41	39	15,0	0,69	80	2,0
	M5	P_{min}	23	8	0,25	10	0,49	34	40	11,3	0,44	31	1,3
Двострани наспрамни 3 траке	M2	S_{max}	30	8	-0,17	0	1,46	76	81	9,5	0,62	80	5,3
	M2	P_{min}	15	7	1,25	5	1,44	55	90	7,7	0,36	31	4,1
	M3	S_{max}	46	8	-0,72	0	1,14	61	59	14,1	0,68	110	4,8
	M3	P_{min}	22	7	1,25	10	0,99	41	81	11,0	0,31	31	2,8
	M4	S_{max}	48	8	-0,72	10	0,82	62	60	13,8	0,85	110	4,6
	M4	P_{min}	30	7	1,25	10	0,73	40	78	14,0	0,31	31	2,1
Двострани наспрамни 4 траке	M1	S_{max}	30	8	-0,15	0	1,95	68	68	6,5	0,78	212	14,1
	M1	P_{min}	17	8	1,26	10	1,96	48	92	8,1	0,38	56	6,6
	M2	S_{max}	31	8	-0,22	0	1,52	56	77	10,0	0,59	110	7,1
	M2	P_{min}	23	8	1,26	10	1,45	43	84	8,9	0,38	56	4,9
	M3	S_{max}	45	8	-0,22	5	1,01	48	59	13,1	0,66	110	4,9
	M3	P_{min}	34	8	1,26	5	0,96	47	66	13,1	0,42	56	3,3
Централни 3 траке (градске улице)	M1	S_{max}/P_{min}	32	10	0,35	10	1,93	42	87	9,8	0,53	212	13,3
	M2	S_{max}	38	10	0,85	0	1,45	57	80	9,9	0,74	212	11,2
	M2	P_{min}	23	10	0,78	5	1,44	42	91	7,9	0,45	110	9,6
Централни 3 траке (аутопут)	M1	S_{max}/P_{min}	36	13	0,35	10	1,94	43	82	9,7	0,42	212	11,8
	M2	S_{max}	45	12	0,85	0	1,45	40	85	9,6	0,52	212	9,4
	M2	P_{min}	25	12	0,28	10	1,44	39	89	7,9	0,36	110	8,8

Табела 9. Резултати фотометријских прорачуна добијени коришћењем LED светиљке Амрега (700 mA) светлосне искористивости 190 lm/W

Распоред	Светло-техничка класа	Критеријум	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_i (%)	TI (%)	EIR	P_{lum} (W)	kW/km
Једнострани 2 траке	M3	S_{max}	43	8	0,34	0	1,24	53	59	15,0	0,60	103	2,4
	M3	P_{min}	29	8	1,29	0	0,97	45	86	10,1	0,30	36,1	1,2
	M4	S_{max}	43	8	0,79	0	0,77	55	64	15,0	0,46	53	1,2
	M4	P_{min}	39	8	1,29	0	0,72	44	70	12,5	0,30	36,1	0,9
	M5	S_{max}	51	8	-0,21	5	0,53	49	42	15,0	0,70	53	1,0
	M5	P_{min}	49	8	-0,21	10	0,54	46	40	14,8	0,34	36,1	0,7
	M6	S_{max}	57	8	-0,71	10	0,33	39	39	18,3	0,76	53	0,9
	M6	P_{min}	53	8	-0,71	5	0,34	49	39	15,2	0,77	36,1	0,7
Цик-цак 3 траке	M3	S_{max}	29	8	1,34	10	1,26	54	62	13,4	0,73	103	3,6
	M3	P_{min}	21	8	0,29	5	0,99	45	62	11,1	0,38	36,1	1,7
	M4	S_{max}	29	8	1,34	10	0,86	54	62	12,4	0,73	70	2,4
	M4	P_{min}	25	8	1,29	5	0,75	40	60	11,9	0,33	36,1	1,4
	M5	S_{max}	42	8	1,29	10	0,57	38	39	14,2	0,61	53	1,3
	M5	P_{min}	40	8	1,29	10	0,49	34	43	13,5	0,39	36,1	0,9
Двострани наспрамни 3 траке	M2	S_{max}	29	8	-0,71	0	1,47	68	74	10,0	0,53	53	3,7
	M2	P_{min}	27	8	0,29	0	1,47	71	89	9,1	0,41	36,1	2,7
	M3	S_{max}	46	8	0,34	5	1,02	53	59	14,8	0,75	70	3,0
	M3	P_{min}	41	8	0,79	0	1,01	44	60	14,3	0,33	36,1	1,8
	M4	S_{max}	49	8	0,29	5	0,72	53	59	14,9	0,76	53	2,2
	M4	P_{min}	44	8	-0,71	10	0,85	55	60	14,6	0,37	36,1	1,6
Двострани наспрамни 4 траке	M1	S_{max}	32	8	-0,16	0	2,09	51	69	9,9	0,65	103	6,4
	M1	P_{min}	18	8	1,29	0	1,91	48	89	8,3	0,36	36,1	4,0
	M2	S_{max}	32	8	-0,16	0	2,09	51	69	9,9	0,65	103	6,4
	M2	P_{min}	24	8	1,29	0	1,43	46	88	9,9	0,36	36,1	3,0
	M3	S_{max}	45	8	-0,66	5	1,05	44	59	14,8	0,66	70	3,1
	M3	P_{min}	35	7	0,29	10	0,97	39	71	13,9	0,33	36,1	2,1
Централни 3 траке (градске улице)	M1	S_{max}	35	10	0,45	0	1,94	58	79	10,0	0,68	165	9,4
	M1	P_{min}	14	10	0,29	10	1,92	39	88	9,2	0,42	53	7,6
	M2	S_{max}	38	10	0,34	0	1,46	57	75	9,5	0,61	136	7,2
	M2	P_{min}	18	9	0,79	10	1,43	39	87	8,9	0,43	53	5,9
Централни 3 траке (аутопут)	M1	S_{max}/P_{min}	43	13	0,95	0	1,94	42	77	9,9	0,48	165	7,7
	M2	S_{max}	52	13	-0,05	0	1,43	40	70	9,5	0,49	165	6,3
	M2	P_{min}	24	13	0,84	5	1,43	43	91	6,2	0,39	70	5,8

Табела 10. Резултати фотометријских прорачуна добијени коришћењем LED светиљке Ampera (700 mA) топло-беле боје светлости уважавајући мезопске ефекте

Распоред	Светло-техничка класа	Критеријум	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lum} (W)	kW/km
Једнострани 2 траке	M3	S_{max}	43	8	0,34	0	0,91	53	59	14,1	0,60	103	2,4
	M3	P_{min}	33	8	1,29	0	0,89	44	85	11,1	0,30	53	1,6
	M4	S_{max}	43	8	-0,16	10	0,71	53	61	14,7	0,41	70	1,6
	M4	P_{min}	30	8	1,29	0	0,65	45	85	9,6	0,30	36,1	1,2
	M5	S_{max}	51	8	0,79	0	0,43	44	39	14,7	0,63	53	1,0
	M5	P_{min}	48	8	1,29	0	0,45	34	41	13,4	0,30	36,1	0,8
	M6	S_{max}	56	8	-0,71	5	0,25	38	40	17,0	0,74	53	0,9
	M6	P_{min}	52	8	-0,21	0	0,27	48	39	13,6	0,75	36,1	0,7
Цик-цак 3 траке	M3	S_{max}	29	8	1,34	10	0,92	54	62	12,6	0,73	103	3,6
	M3	P_{min}	17	7	0,79	0	0,91	46	66	12,0	0,35	36,1	2,1
	M4	S_{max}	27	8	1,29	0	0,69	41	59	10,9	0,38	53	2,0
	M4	P_{min}	21	8	0,29	5	0,69	45	62	10,3	0,38	36,1	1,7
	M5	S_{max}	42	8	1,34	10	0,60	34	41	14,6	0,41	70	1,7
	M5	P_{min}	36	8	1,29	10	0,44	34	45	14,5	0,38	36,1	1,0
Двострани наспрамни 3 траке	M2	S_{max}	30	8	0,29	0	1,39	69	88	9,9	0,41	53	3,5
	M2	P_{min}	21	7	0,29	0	1,40	69	88	9,9	0,43	36,1	3,4
	M3	S_{max}	47	8	-0,66	5	0,98	61	60	14,5	0,81	103	4,4
	M3	P_{min}	34	7	0,29	5	0,88	51	73	15,0	0,35	36,1	2,1
	M4	S_{max}	47	8	-0,16	10	0,68	56	60	14,0	0,79	70	3,0
	M4	P_{min}	42	8	0,29	5	0,67	45	62	14,2	0,31	36,1	1,7
Двострани наспрамни 4 траке	M1	S_{max}	32	8	-0,16	0	2,04	51	69	9,9	0,65	136	8,5
	M1	P_{min}	19	8	1,29	0	1,90	49	89	8,6	0,36	53	5,6
	M2	S_{max}	32	8	-0,16	0	1,53	51	69	9,3	0,65	103	6,4
	M2	P_{min}	26	8	0,79	0	1,35	55	86	9,5	0,40	53	4,1
	M3	S_{max}	46	8	-0,16	10	0,89	52	59	14,4	0,81	103	4,5
	M3	P_{min}	28	7	1,29	0	0,88	41	80	10,8	0,31	36,1	2,6
Централни 3 траке (градске улице)	M1	S_{max}/P_{min}	31	10	0,45	5	1,92	40	77	10,0	0,43	165	10,6
	M2	S_{max}	38	10	0,45	0	1,39	58	75	10,0	0,68	165	8,7
	M2	P_{min}	28	10	0,84	5	1,36	39	76	9,6	0,41	103	7,4
Централни 3 траке (аутопут)	M1	S_{max}/P_{min}	36	12	0,95	0	1,86	39	82	9,5	0,44	165	9,2
	M2	S_{max}/P_{min}	47	13	0,95	0	1,38	41	74	10,0	0,48	165	7,0

Табела 11. Резултати фотометријских прорачуна добијени коришћењем LED светиљке Voltana (1000 mA) топло-беле боје светлости уважавајући мезопске ефекте

Распоред	Светло-техничка класа	Критеријум	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lum} (W)	kW/km
Једнострани 2 траке	M3	S_{max}	44	8	1,35	5	1,15	43	59	15,0	0,73	212	4,8
	M3	P_{min}	38	8	0,83	10	0,88	50	59	14,6	0,30	80	2,1
	M4	S_{max}	41	8	-0,22	5	0,84	48	60	13,6	0,45	110	2,7
	M4	P_{min}	34	7	1,26	0	0,65	43	60	12,5	0,32	56	1,6
	M5	S_{max}	54	8	1,28	5	0,50	35	40	13,9	0,78	110	2,0
	M5	P_{min}	33	7	1,25	10	0,43	51	65	12,2	0,36	31	0,9
	M6	S_{max}	56	8	-0,67	5	0,34	35	41	19,8	0,70	80	1,4
	M6	P_{min}	45	8	-0,25	10	0,27	41	39	15,2	0,30	31	0,7
Цик-цак 3 траке	M3	S_{max}	26	8	1,28	5	0,99	45	59	11,1	0,62	110	4,2
	M3	P_{min}	11	7	1,25	5	0,90	52	84	9,5	0,36	31	2,8
	M4	S_{max}	27	8	-0,22	10	0,70	54	59	12,4	0,82	110	4,1
	M4	P_{min}	15	7	1,25	5	0,66	48	64	11,7	0,36	31	2,1
	M5	S_{max}	42	8	1,33	10	0,45	40	44	14,8	0,69	80	1,9
	M5	P_{min}	23	8	0,25	10	0,44	34	40	11,1	0,44	31	1,3
Двострани наспрамни 3 траке	M2	S_{max}	31	8	-0,65	0	1,76	76	69	7,7	0,92	212	13,7
	M2	P_{min}	26	8	0,76	0	1,36	60	71	9,8	0,54	56	4,3
	M3	S_{max}	46	8	-0,72	0	1,04	61	59	13,9	0,68	110	4,8
	M3	P_{min}	22	7	1,25	5	0,90	52	77	9,6	0,36	31	2,8
	M4	S_{max}	48	8	-0,72	10	0,75	62	60	13,5	0,85	110	4,6
	M4	P_{min}	30	7	1,25	5	0,66	47	69	11,8	0,36	31	2,1
Двострани наспрамни 4 траке	M1	S_{max}	30	8	-0,65	0	2,63	64	74	9,9	0,70	212	14,1
	M1	P_{min}	23	8	1,33	5	1,87	49	86	9,2	0,41	80	7,0
	M2	S_{max}	31	8	-0,22	0	1,48	63	83	9,9	0,65	110	7,1
	M2	P_{min}	22	8	1,26	10	1,38	43	85	8,5	0,38	56	5,1
	M3	S_{max}	45	8	-0,22	5	0,92	48	59	12,9	0,66	110	4,9
	M3	P_{min}	33	8	1,26	10	0,92	40	76	10,8	0,38	56	3,4
Централни 3 траке (градске улице)	M1	S_{max}/P_{min}	31	10	0,85	5	1,91	42	90	10,0	0,45	212	13,7
	M2	S_{max}	37	10	0,35	0	1,37	55	81	10,0	0,69	212	11,5
	M2	P_{min}	22	10	0,78	5	1,37	42	91	7,6	0,45	110	10,0
Централни 3 траке (аутопут)	M1	S_{max}/P_{min}	35	12	0,85	10	1,88	41	79	9,9	0,37	212	12,1
	M2	S_{max}	44	12	0,85	0	1,35	40	85	9,3	0,52	212	9,6
	M2	P_{min}	24	12	0,28	10	1,36	40	90	7,6	0,36	110	9,2

Табела 12. Резултати фотометријских прорачуна добијени коришћењем LED светиљке Ампера (700 mA) неутралне беле боје светлости уважавајући мезопске ефекте

Распоред	Светло-техничка класа	Критеријум	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lum} (W)	kW/km
Једнострани 2 траке	M3	S_{max}	43	8	0,34	0	1,08	53	59	14,6	0,60	103	2,4
	M3	P_{min}	41	8	1,29	0	0,86	41	62	13,6	0,30	53	1,3
	M4	S_{max}	44	8	0,79	0	0,64	55	59	14,8	0,45	53	1,2
	M4	P_{min}	37	8	1,29	0	0,63	44	74	11,6	0,30	36,1	1,0
	M5	S_{max}	52	8	-0,21	5	0,44	49	40	14,8	0,70	53	1,0
	M5	P_{min}	49	8	-0,21	10	0,44	46	40	14,2	0,34	36,1	0,7
	M6	S_{max}	57	8	-0,71	10	0,28	39	39	17,7	0,76	53	0,9
	M6	P_{min}	54	8	0,29	5	0,23	38	39	14,6	0,78	36,1	0,7
Цик-цак 3 траке	M3	S_{max}	29	8	1,34	10	1,10	54	62	13,1	0,73	103	3,6
	M3	P_{min}	20	8	0,79	0	0,89	44	64	10,2	0,38	36,1	1,8
	M4	S_{max}	29	8	1,34	10	0,73	54	62	12,0	0,73	70	2,4
	M4	P_{min}	24	8	0,79	5	0,64	43	63	10,6	0,35	36,1	1,5
	M5	S_{max}	42	8	1,29	10	0,48	38	39	13,8	0,61	53	1,3
	M5	P_{min}	40	8	1,29	10	0,40	34	43	13,0	0,39	36,1	0,9
Двострани наспрамни 3 траке	M2	S_{max}	30	8	-0,66	0	1,55	65	73	9,9	0,52	70	4,7
	M2	P_{min}	24	8	0,29	0	1,37	72	89	8,2	0,41	36,1	3,0
	M3	S_{max}	47	8	-0,66	5	1,17	61	60	15,0	0,81	103	4,4
	M3	P_{min}	40	8	0,79	0	0,86	45	64	13,6	0,33	36,1	1,8
	M4	S_{max}	48	8	0,79	5	0,65	50	60	15,0	0,73	53	2,2
	M4	P_{min}	44	8	-0,71	10	0,70	55	60	14,1	0,37	36,1	1,6
Двострани наспрамни 4 траке	M1	S_{max}	32	8	-0,16	0	1,82	51	69	9,7	0,65	103	6,4
	M1	P_{min}	23	8	0,79	0	1,81	59	87	9,2	0,40	53	4,6
	M2	S_{max}	32	8	-0,66	0	1,75	60	69	9,2	0,70	103	6,4
	M2	P_{min}	21	8	1,29	0	1,35	49	88	8,7	0,35	36,1	3,4
	M3	S_{max}	46	8	-0,16	10	1,05	52	59	14,9	0,81	103	4,5
	M3	P_{min}	33	7	0,79	0	0,86	39	70	14,6	0,36	36,1	2,2
Централни 3 траке (градске улице)	M1	S_{max}	34	10	0,45	0	1,84	57	80	9,6	0,68	165	9,7
	M1	P_{min}	16	9	0,84	10	1,82	42	89	9,9	0,39	70	8,8
	M2	S_{max}	37	10	-0,16	0	1,33	54	76	9,8	0,54	136	7,4
	M2	P_{min}	17	10	0,29	10	1,34	39	89	8,7	0,42	53	6,2
Централни 3 траке (аутопут)	M1	S_{max}/P_{min}	42	13	0,95	0	1,84	43	78	9,6	0,48	165	7,9
	M2	S_{max}	51	13	-0,05	0	1,35	40	71	9,2	0,49	165	6,5
	M2	P_{min}	34	12	0,84	0	1,33	39	84	8,3	0,43	103	6,1

Табела 13. Резултати фотометријских прорачуна добијени коришћењем LED светиљке Voltana (1000 mA) неутралне беле боје светлости уважавајући мезопске ефекте

Распоред	Светло-техничка класа	Критеријум	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lum} (W)	kW/km
Једнострани 2 траке	M3	S_{max}	43	8	1,35	10	1,25	44	62	14,9	0,74	212	4,9
	M3	P_{min}	28	7	1,26	0	0,86	43	82	11,7	0,31	56	2,0
	M4	S_{max}	44	8	1,28	0	0,64	42	60	13,2	0,71	110	2,5
	M4	P_{min}	37	8	1,26	0	0,63	49	63	11,2	0,38	56	1,5
	M5	S_{max}	54	8	1,28	5	0,54	35	40	14,2	0,78	110	2,0
	M5	P_{min}	35	7	1,25	10	0,40	45	52	12,8	0,36	31	0,9
	M6	S_{max}	56	8	-0,67	0	0,37	34	40	20,0	0,70	80	1,4
	M6	P_{min}	45	8	-0,25	10	0,30	41	39	15,4	0,30	31	0,7
Цик-цак 3 траке	M3	S_{max}	26	8	1,28	5	1,08	45	59	11,3	0,62	110	4,2
	M3	P_{min}	12	7	1,25	10	0,91	42	83	9,5	0,31	31	2,6
	M4	S_{max}	27	8	-0,22	10	0,76	54	59	12,7	0,82	110	4,1
	M4	P_{min}	16	7	0,75	10	0,66	48	63	12,8	0,36	31	1,9
	M5	S_{max}	41	8	0,83	10	0,51	41	39	15,0	0,69	80	2,0
	M5	P_{min}	24	7	1,25	5	0,41	34	40	8,2	0,43	31	1,3
Двострани наспрамни 3 траке	M2	S_{max}	32	8	-0,17	0	1,37	72	78	9,9	0,62	80	5,0
	M2	P_{min}	16	7	1,25	5	1,35	55	91	8,0	0,36	31	3,9
	M3	S_{max}	46	8	-0,72	0	1,14	61	59	14,1	0,68	110	4,8
	M3	P_{min}	25	7	1,25	5	0,87	53	73	10,6	0,36	31	2,5
	M4	S_{max}	48	8	-0,72	10	0,82	62	60	13,8	0,85	110	4,6
	M4	P_{min}	33	7	1,25	5	0,66	42	60	12,9	0,36	31	1,9
Двострани наспрамни 4 траке	M1	S_{max}	30	8	-0,15	0	1,95	68	68	6,5	0,78	212	14,1
	M1	P_{min}	26	8	1,33	5	1,81	49	82	10,0	0,41	80	6,2
	M2	S_{max}	32	8	-0,72	0	1,33	63	71	9,9	0,70	110	6,9
	M2	P_{min}	25	8	1,26	10	1,33	43	81	9,2	0,38	56	4,5
	M3	S_{max}	46	8	1,28	0	0,86	42	60	13,2	0,72	110	4,8
	M3	P_{min}	37	8	0,76	10	0,87	43	62	13,6	0,42	56	3,0
Централни 3 траке (градске улице)	M1	S_{max}	34	10	0,85	10	1,82	45	83	9,9	0,54	212	12,5
	M1	P_{min}	18	9	0,78	0	1,81	44	94	10,0	0,67	110	12,2
	M2	S_{max}	38	10	0,85	0	1,45	57	80	9,9	0,74	212	11,2
	M2	P_{min}	18	9	0,83	0	1,33	42	94	9,7	0,65	80	8,9
Централни 3 траке (аутопут)	M1	S_{max}/P_{min}	38	13	0,35	10	1,84	42	81	10,0	0,43	212	11,2
	M2	S_{max}	48	12	0,85	0	1,36	39	82	10,0	0,52	212	8,8
	M2	P_{min}	27	12	0,28	10	1,33	39	90	8,1	0,36	110	8,1

Табела 14. Резултати фотометријских прорачуна добијени коришћењем LED светиљке Ampere (700 mA) топло-беле боје светлости и светлосне искористивости 190 lm/W уважавајући мезопске ефекте

Распоред	Светло-техничка класа	Критеријум	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lum} (W)	kW/km
Једнострани 2 траке	M3	S_{max}	43	8	0,34	0	1,24	53	59	15,0	0,60	103	2,4
	M3	P_{min}	32	8	1,29	0	0,88	44	85	10,8	0,30	36,1	1,1
	M4	S_{max}	44	8	0,79	0	0,66	53	59	14,0	0,57	53	1,2
	M4	P_{min}	41	8	1,29	0	0,69	41	62	13,0	0,30	36,1	0,9
	M5	S_{max}	53	8	1,29	5	0,45	39	40	14,9	0,80	53	1,0
	M5	P_{min}	49	8	-0,21	10	0,54	46	40	14,8	0,34	36,1	0,7
	M6	S_{max}	57	8	-0,71	10	0,33	39	39	18,3	0,76	53	0,9
	M6	P_{min}	55	8	-0,21	5	0,26	38	39	16,0	0,76	36,1	0,7
Цик-цак 3 траке	M3	S_{max}	29	8	1,34	10	1,26	54	62	13,4	0,73	103	3,6
	M3	P_{min}	22	8	0,29	10	0,93	39	64	10,8	0,34	36,1	1,6
	M4	S_{max}	29	8	1,34	10	0,86	54	62	12,4	0,73	70	2,4
	M4	P_{min}	27	8	1,29	0	0,66	41	59	10,8	0,38	36,1	1,3
	M5	S_{max}	42	8	1,29	10	0,57	38	39	14,2	0,61	53	1,3
	M5	P_{min}	41	8	1,29	5	0,43	37	40	13,3	0,59	36,1	0,9
Двострани наспрамни 3 траке	M2	S_{max}/P_{min}	29	8	0,29	0	1,37	70	89	9,6	0,41	36,1	2,5
	M3	S_{max}	48	8	-0,66	10	0,88	60	60	14,9	0,83	70	2,9
	M3	P_{min}	42	8	-0,21	5	0,92	55	60	13,2	0,39	36,1	1,7
	M4	S_{max}	50	8	-0,21	10	0,67	56	60	15,0	0,80	53	2,1
	M4	P_{min}	44	8	-0,71	10	0,85	55	60	14,6	0,37	36,1	1,6
Двострани наспрамни 4 траке	M1	S_{max}	32	8	-0,16	0	2,09	51	69	9,9	0,65	103	6,4
	M1	P_{min}	18	8	1,29	0	1,91	48	89	8,3	0,36	36,1	4,0
	M2	S_{max}	32	8	-0,16	0	1,42	51	69	9,2	0,65	70	4,4
	M2	P_{min}	24	8	1,29	0	1,43	46	88	9,9	0,36	36,1	3,0
	M3	S_{max}	45	8	-0,66	5	1,05	44	59	14,8	0,66	70	3,1
	M3	P_{min}	38	8	0,79	0	0,88	43	71	12,3	0,40	36,1	1,9
Централни 3 траке (градске улице)	M1	S_{max}	35	10	0,45	0	1,94	58	79	10,0	0,68	165	9,4
	M1	P_{min}	10	10	0,29	10	1,83	40	97	8,4	0,42	36,1	7,2
	M2	S_{max}	40	10	0,34	0	1,39	57	72	9,9	0,61	136	6,8
	M2	P_{min}	20	10	0,79	10	1,35	41	85	8,8	0,43	53	5,3
Централни 3 траке (аутопут)	M1	S_{max}	44	13	0,95	0	1,90	42	76	10,0	0,48	165	7,5
	M1	P_{min}	10	12	0,79	5	1,85	39	98	6,4	0,36	36,1	7,2
	M2	S_{max}	53	13	-0,05	0	1,40	40	69	9,6	0,49	165	6,2
	M2	P_{min}	37	13	0,84	5	1,38	42	77	8,0	0,39	103	5,6

Табела 15. Резултати фотометријских прорачуна добијени коришћењем LED светиљке Ампера (700 mA) неутралне беле боје светлости и светлосне искористивости 190 lm/W уважавајући мезопске ефекте

Распоред	Светло-техничка класа	Критеријум	s (m)	H (m)	o (m)	α (°)	L_{av} (cd/m ²)	U_o (%)	U_l (%)	TI (%)	EIR	P_{lum} (W)	kW/km
Једнострани 2 траке	M3	S_{max}	43	8	0,34	0	1,24	53	59	15,0	0,60	103	2,4
	M3	P_{min}	32	8	1,29	0	0,88	44	85	10,8	0,30	36,1	1,1
	M4	S_{max}	44	8	0,79	0	0,66	53	59	14,0	0,57	53	1,2
	M4	P_{min}	42	8	0,79	5	0,63	46	62	13,5	0,35	36,1	0,9
	M5	S_{max}	53	8	1,29	5	0,45	39	40	14,9	0,80	53	1,0
	M5	P_{min}	51	8	0,79	0	0,41	44	39	14,6	0,63	36,1	0,7
	M6	S_{max}/P_{min}	57	8	-0,71	10	0,23	39	39	17,0	0,76	36,1	0,6
Цик-цак 3 траке	M3	S_{max}	29	8	1,34	10	0,86	54	62	12,4	0,73	70	2,4
	M3	P_{min}	22	8	0,29	10	0,93	39	64	10,8	0,34	36,1	1,6
	M4	S_{max}	29	8	1,34	10	0,86	54	62	12,4	0,73	70	2,4
	M4	P_{min}	27	8	1,29	0	0,66	41	59	10,8	0,38	36,1	1,3
	M5	S_{max}	42	8	1,29	10	0,57	38	39	14,2	0,61	53	1,3
	M5	P_{min}	41	8	1,29	5	0,43	37	40	13,3	0,59	36,1	0,9
Двострани наспрамни 3 траке	M2	S_{max}/P_{min}	29	8	0,29	0	1,37	70	89	9,6	0,41	36,1	2,5
	M3	S_{max}	48	8	-0,66	10	0,88	60	60	14,9	0,83	70	2,9
	M3	P_{min}	43	8	-0,71	10	0,87	57	62	14,3	0,37	36,1	1,7
	M4	S_{max}	51	8	-0,71	10	0,63	61	60	14,9	0,84	53	2,1
	M4	P_{min}	44	8	-0,71	5	0,78	56	60	14,7	0,52	36,1	1,6
Двострани наспрамни 4 траке	M1	S_{max}	32	8	-0,16	0	2,09	51	69	9,9	0,65	103	6,4
	M1	P_{min}	19	8	1,29	0	1,81	49	89	8,5	0,36	36,1	3,8
	M2	S_{max}	32	8	-0,16	0	1,42	51	69	9,2	0,65	70	4,4
	M2	P_{min}	25	8	0,79	0	1,34	56	86	9,2	0,40	36,1	2,9
	M3	S_{max}	45	8	-0,21	5	0,86	41	64	14,9	0,58	53	2,4
	M3	P_{min}	39	8	0,79	0	0,86	43	68	12,6	0,40	36,1	1,9
Централни 3 траке (градске улице)	M1	S_{max}	35	10	0,45	0	1,94	58	79	10,0	0,68	165	9,4
	M1	P_{min}	10	10	0,29	10	1,83	40	97	8,4	0,42	36,1	7,2
	M2	S_{max}	40	10	0,34	0	1,39	57	72	9,9	0,61	136	6,8
	M2	P_{min}	20	10	0,79	10	1,35	41	85	8,8	0,43	53	5,3
Централни 3 траке (аутопут)	M1	S_{max}	45	13	-0,05	5	1,80	39	69	9,8	0,40	165	7,3
	M1	P_{min}	10	12	0,79	5	1,85	39	98	6,4	0,36	36,1	7,2
	M2	S_{max}	53	10	-0,05	0	1,40	40	69	9,6	0,49	165	6,2
	M2	P_{min}	20	12	0,79	5	1,33	43	89	7,3	0,49	53	5,3

ПРИЛОГ 2

Анкетни упитник за субјективну оцену релевантних параметара квалитета два типа
уличног осветљења намењен пешацима

АНКЕТНИ УПИТНИК ЗА СУБЈЕКТИВНУ ОЦЕНУ РЕЛЕВАНТНИХ ПАРАМЕТАРА КВАЛИТЕТА ДВА ТИПА УЛИЧНОГ ОСВЕТЉЕЊА

- ЗА ПЕШАКЕ -

ИМЕ И ПРЕЗИМЕ	
МАТИЧНИ БРОЈ	
БРОЈ ГОДИНА	
Студент сам _____ факултета	
ПОТПИС	

ЗНАЧЕЊЕ ОДГОВОРА ИЗ АНКЕТНОГ УПИТНИКА:

- 1 – АПСОЛУТНО НЕПРИХВАТЉИВО
- 2 – УГЛАВНОМ НЕПРИХВАТЉИВО
- 3 – СРЕДЊЕ ПРИХВАТЉИВО
- 4 – УГЛАВНОМ ПРИХВАТЉИВО
- 5 – АПСОЛУТНО ПРИХВАТЉИВО

ОСВЕТЉЕЊЕ СА LED ИЗВОРИМА СВЕТЛОСТИ ТОПЛО-БЕЛЕ БОЈЕ – ТИП 1

На свако од 5 питања из следеће табеле одговара се заокруживањем одговарајућег броја (1 до 5).

1.	Оцените Ваш доживљај интензитета осветљења ТРОТОАРА (његовог нивоа осветљености).	1	2	3	4	5
2.	Оцените у којој мери се лица пешака које срећете јасно уочавају.	1	2	3	4	5
3.	Оцените Ваш доживљај пријатности боје светлости.	1	2	3	4	5
4.	Оцените Ваш доживљај способности примењеног осветљења да верно прикаже боје (паркираних возила, одеће пролазника, вегетације,...).	1	2	3	4	5
5.	Оцените Ваш општи утисак о изведеном осветљењу.	1	2	3	4	5

6.	Боја светлости је (означити квадрат уз изабрани одговор): ☐ превише хладна ☐ превише топла ☐ нешто хладнија него што треба ☐ нешто топлија него што треба ☐ адекватна
----	---

ОСВЕТЉЕЊЕ СА LED ИЗВОРИМА СВЕТЛОСТИ НЕУТРАЛНЕ БЕЛЕ БОЈЕ – ТИП 2

На свако од 5 питања из следеће табеле одговара се заокруживањем одговарајућег броја (1 до 5).

1.	Оцените Ваш доживљај интензитета осветљења ТРОТОАРА (његовог нивоа осветљености).	1	2	3	4	5
2.	Оцените у којој мери се лица пешака које срећете јасно уочавају.	1	2	3	4	5
3.	Оцените Ваш доживљај пријатности боје светлости.	1	2	3	4	5
4.	Оцените Ваш доживљај способности примењеног осветљења да верно прикаже боје (паркираних возила, одеће пролазника, вегетације,...).	1	2	3	4	5
5.	Оцените Ваш општи утисак о изведеном осветљењу.	1	2	3	4	5

6.	Боја светлости је (означити квадрат уз изабрани одговор): ☐ превише хладна ☐ превише топла ☐ нешто хладнија него што треба ☐ нешто топлија него што треба ☐ адекватна
----	---

7. Заокружите редни број испред типа осветљења који Вам се више допада:

- 1 осветљење са LED изворима светлости топло-беле боје (ТИП 1)
- 2 осветљење са LED изворима светлости неутралне беле боје (ТИП 2)

8. Од наведених, заокружите редне бројеве испред **највише 2** параметра због којих сматрате да је тип осветљења који Вам се више допада бољи од другог:

1. интензитет осветљења тротоара
2. уочавање лица пешака
3. пријатност боје светлости
4. верно приказивање боја

9. Ако сматрате да тип осветљења који Вам се мање допада има неке предности у односу на тип осветљења који Вам се више допада, заокружите редни број испред **једног** од наведених разлога који се на то односи (у противном, не треба ништа да заокружите):

1. интензитет осветљења тротоара
2. уочавање лица пешака
3. пријатност боје светлости
4. верно приказивање боја

10.	По Вашем мишљењу, најзначајнији параметар квалитета уличног осветљења са аспекта пешака је (означити квадрат уз изабрани одговор):	☐ интензитет осветљења тротоара
		☐ уочавање лица пешака
		☐ пријатност боје светлости
		☐ верно приказивање боја

ПРИЛОГ 3

**Анкетни упитник за субјективну оцену релевантних параметара квалитета два типа
уличног осветљења намењен возачима**

АНКЕТНИ УПИТНИК ЗА СУБЈЕКТИВНУ ОЦЕНУ РЕЛЕВАНТНИХ ПАРАМЕТАРА КВАЛИТЕТА ДВА ТИПА УЛИЧНОГ ОСВЕТЉЕЊА

- ЗА ВОЗАЧЕ -

ИМЕ И ПРЕЗИМЕ	
МАТИЧНИ БРОЈ	
БРОЈ ГОДИНА	
ПОТПИС	

На свако од 7 наведених питања одговара се заокруживањем одговарајућег слова (А или Б).

1. Већи интензитет осветљења (већи ниво сјајности) КОЛОВОЗА обезбеђује:

- А Инсталација са LED изворима светлости топло-беле боје
- Б Инсталација са LED изворима светлости неутралне беле боје

2. Пријатнију боју светлости обезбеђује:

- А Инсталација са LED изворима светлости топло-беле боје
- Б Инсталација са LED изворима светлости неутралне беле боје

3. Мање бљештање које изазивају светиљке обезбеђује:

- А Инсталација са LED изворима светлости топло-беле боје
- Б Инсталација са LED изворима светлости неутралне беле боје

4. Боље уочавање пешака који стоје уз ивицу тротоара обезбеђује:

- А Инсталација са LED изворима светлости топло-беле боје
- Б Инсталација са LED изворима светлости неутралне беле боје

5. Боље уочавање светле препреке на коловозу (зелене коцке) обезбеђује:

- А Инсталација са LED изворима светлости топло-беле боје
- Б Инсталација са LED изворима светлости неутралне беле боје

6. Боље уочавање тамне препреке на коловозу (тамно-плаве коцке) обезбеђује:

- А Инсталација са LED изворима светлости топло-беле боје
- Б Инсталација са LED изворима светлости неутралне беле боје

7. Интегрално, бољу видљивост обезбеђује:

ПРИЛОГ 4

Прорачун трошкова

Почетни (инвестициони) трошкови за инсталацију осветљења улице/пута (C_{in}) могу се израчунати коришћењем следеће једначине:

$$C_{in} = N_p [C_p + C_b + k (C_l + C_{wl}) + C_{wp}], \quad (4.1)$$

где су:

- N_p је број стубова дуж разматране деонице улице (пута),
- C_p је цена стуба са потребном опремом и додацима,
- C_b је цена једноструке или двоструке лире (ако постоји),
- k је број светилки по стубу,
- C_l је цена светилке (светилка је опремљена са сијалицом, предспојним уређајем и гориоником или LED пакетима и драјверима),
- C_{wl} је цена уградње светилке, и
- C_{wp} је цена постављања стуба.

Пошто је цена каблова за снабдевање електричном енергијом свих светилки на разматраној деоници улице/пута (укључујући и њихово полагање) практично једнака за инсталације осветљења улица (путева) које се пореде, обично се не урачунава у почетне трошкове приликом економског поређења различитих инсталација осветљења улица/путева.

Трошкови експлоатације укључују трошкове електричне енергије и одржавања, при чему последњи углавном укључују трошкове потребне за замену сијалица (или LED пакета и драјвера) и чишћење светилки.

Годишњи трошкови електричне енергије (C_e) могу се израчунати коришћењем следеће једначине:

$$C_e = k \cdot N_p \cdot P_1 (t_1 \cdot C_{e1} + t_2 \cdot C_{e2} + \dots + t_m \cdot C_{em}), \quad (4.2)$$

где су:

- P_1 је укупна снага светилке,
- m је број тарифа,
- t_j ($j = 1, 2, \dots, m$) је годишње време рада светилке у оквиру j -те тарифе, и
- C_{ej} је цена електричне енергије која одговара j -тој тарифи.

С обзиром на то да оптимална процедура одржавања у случају конвенционалних светилки подразумева организовану (периодичну) групну замену сијалица са чишћењем светилке само при замени сијалице [64], трошкови за сваку групну замену светилке уз истовремено чишћење светилке могу се израчунати коришћењем следеће једначине:

$$C_{gr} = k \cdot N_p (C_{ls} + C_{grw}), \quad (4.3)$$

где C_{ls} представља цену сијалице, а C_{grw} укључује трошкове возила и рада на замени извора светлости и чишћењу светилке.

У случају LED светилки постоје три главне врсте одржавања: могућа групна замена плоча са LED чиповима (на пример, 50000 сати након уградње светилке), периодична групна замена драјвера и истовремено чишћење светилки (на пример, сваке четврте године).

Цена за групну замену плоча са LED чиповима може се одредити следећом једначином:

$$C_{grLED} = k \cdot N_p (q \cdot C_l + C_{grcb}), \quad (4.4)$$

где q представља однос између цена плоче са LED чиповима и целе светиљке (може се узети $q = 0.2$), а C_{grcb} укључује цену возила и рада на замени плоче са LED чиповима при групној замени.

Цена периодичне групне замене драјвера и истовременог чишћења светиљки може се израчунати следећом једначином:

$$C_{grdr} = k \cdot N_p \cdot C_{dr}, \quad (4.5)$$

где C_{dr} укључује цену новог драјвера и трошкове возила и рада на његовој уградњи и чишћење светиљки.

Поред претходних трошкова, могу се укључити и трошкови замене једног извора светлости (за изворе светлости који су рано прегорели) [18]. У j -тој години након постављања осветљења улице/пута, односно након групне замене извора светлости, они износе:

$$C_{srj} = N_j \cdot (C_{ls} + C_{s.r.w.}), \quad (4.6)$$

где је N_j број извора светлости који су прегорели током j -те године, а $C_{s.r.w.}$ укључује трошкове возила и рада на замени једног извора светлости.

Због чињенице да су трошкови замене осталих (електричних или оптичких) делова светиљке углавном испод 1% укупних трошкова експлоатације, они се могу занемарити.

Укупни трошкови, C_d , који представљају збир свих релевантних трошкова сведених на крај периода експлоатације, T , могу се израчунати коришћењем следеће једначине:

$$C_d = C_{ind} + C_{ed} + C_{grd} + C_{srd}, \quad (4.7)$$

где C_{ind} , C_{ed} , C_{grd} и C_{srd} представљају актуелизоване почетне трошкове, трошкове електричне енергије и групне и појединачне трошкове одржавања, респективно. Актуелизовани почетни и трошкови електричне енергије могу се одредити следећим једначинама (i је стопа актуелизације, изражена у процентима):

$$C_{ind} = C_{in} \cdot \left(1 + \frac{i}{100}\right)^T \quad (4.8)$$

$$C_{ed} = C_e \cdot \left[1 + \left(1 + \frac{i}{100}\right) + \left(1 + \frac{i}{100}\right)^2 + \dots + \left(1 + \frac{i}{100}\right)^{T-1}\right] = C_e \cdot \frac{\left(1 + \frac{i}{100}\right)^T - 1}{\frac{i}{100}}. \quad (4.9)$$

За инсталације осветљења улица/путева са конвенционалним светиљкама, актуелизовани трошкови групног одржавања могу се израчунати по следећим формулама:

$$\begin{aligned} C_{grd} &= C_{gr} \cdot \left(\left(1 + \frac{i}{100}\right)^{T-T_{gr}} + \left(1 + \frac{i}{100}\right)^{T-2T_{gr}} + \dots + \left(1 + \frac{i}{100}\right)^{T-n_r T_{gr}} \right) \\ &= C_{gr} \cdot \left(1 + \frac{i}{100}\right)^{T-n_r T_{gr}} \cdot \frac{\left(1 + \frac{i}{100}\right)^{n_r T_{gr}} - 1}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)^{T_{gr}} - 1}, \end{aligned} \quad (4.10)$$

где су:

- T_{gr} је период групне замене извора светлости (на пример, $T_{gr} = 4$ године за натријумове и $T_{gr} = 2$ године за метал-халогене изворе), и
- n_r је број групних замена извора светлости током периода експлоатације.

За инсталације осветљења улица/путева са LED светиљкама, актуелизовани трошкови групног одржавања могу се израчунати по следећим формулама:

$$C_{grd} = C_{grd1} + C_{grd2} \quad (4.11)$$

$$C_{grd1} = C_{grLED} \cdot \left(1 + \frac{i}{100}\right)^{T - T_{LED}} \quad (4.12)$$

$$C_{grd2} = C_{grdr} \cdot \left(1 + \frac{i}{100}\right)^{T - n_r T_{grLED}} \cdot \frac{\left(1 + \frac{i}{100}\right)^{n_r T_{grLED}} - 1}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)^{T_{grLED}} - 1}, \quad (4.13)$$

где су:

- T_{LED} је време рада светиљке након којег се плоча са LED чиповима треба заменити,
- n_r је број групних замена драјвера током периода експлоатације, и
- T_{grLED} је период групне замене драјвера и чишћења светиљке (обично четири године).

Актуелизовани појединачни трошкови одржавања (C_{srd}) могу се израчунати по следећим формулама:

$$\begin{aligned} C_{srd} &= C_{srj} \left[\left(1 + \frac{i}{100}\right)^{T-j} + \left(1 + \frac{i}{100}\right)^{T-(j+T_{gr})} + \dots + \left(1 + \frac{i}{100}\right)^{T-(j+n_r T_{gr})} \right] \\ &= C_{srj} \left(1 + \frac{i}{100}\right)^{T_{gr}-j} \frac{(1 + (i/100))^T - 1}{(1 + (i/100))^{T_{gr}} - 1} \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$C_{srd} = \sum_{j=1}^{T_{gr}} C_{srjd} = \frac{(1 + (i/100))^T - 1}{(1 + (i/100))^{T_{gr}} - 1} \sum_{j=1}^{T_{gr}} \left(C_{srj} \left(1 + \frac{i}{100}\right)^{T_{gr}-j} \right), \quad (4.15)$$

где C_{srjd} представља укупне актуелизоване трошкове замене једног извора светлости током свих j -тих година.

ПРИЛОГ 5

Трошкови опреме и рада

Табеле 5.1–5.5 садрже све трошкове опреме (у EUR (€), без ПДВ-а) коришћене у овом истраживању. Иако цена уградње стуба зависи од његове висине и механичких карактеристика тла, усвојена је константна средња вредност $C_{wp} = 50$ €, увећана за $C_{wl} = 40$ € за уградњу сваке светиљке. У просеку је усвојено 50 € по светиљки за цену возила и рада како на групној замени извора светлости (LED драјвера, плоче са LED чиповима), тако и на чишћењу светиљке ($C_{grw} = C_{grcb} = 50$ €, док је C_{dr} износио 92 (50 + 42) € и 103 (50 + 53) € за светиљке Voltana и Ampere, респективно).

Табела 5.1. Цена потпуно поцинкованог челичног стуба (C_p) у зависности од његове висине (H)

H (m)	7	8	9	10	11	12	13
C_p	350	400	450	500	550	600	650

Табела 5.2. Трошкови једноструких и двоструких лира дужине l_b (C_b) – за двоструку лиру l_b представља дужину једног крака

l_b	0,5	1	1,5	2
C_b (једнострука лира)	10	12	15	20
C_b (двострука лира)	20	24	30	40

Табела 5.3. Цене светиљки Onyx 2 и Citea (C_l) у зависности од снаге извора светлости (P)

Тип светиљке	Тип извора светлости	P (W)	70	100	150	250
Onyx 2	HPS/MH	C_l	231	243	254	264
Citea Midi			397	410	414	439
Citea Mini	HPS	C_l	362	397	402	424

Табела 5.4. Цене Ampere и Voltana светиљки (топло-беле или неутралне беле боје светлости) (C_l) у зависности од снаге (P)

Тип светиљке	Ampere	P (W)	36,1	53	70	103	136	165
		C_l	236	251	308	327	339	437
	Voltana	P (W)	31	56	80	110	212	/
		C_l	134	171	206	258	520	/

Табела 5.5. Цене натријумових и метал-халогених сијалица (C_{ls}) у зависности од снаге (P)

P (W)	70	100	150	250
C_{ls} (HPS)	6	8	9	11
C_{ls} (MH)	19	19	20	20

ПРИЛОГ 6

Актуелизовани трошкови и односи укупних актуелизованих трошкова

Табела 6.1. Актуелизовани почетни трошкови (C_{ind}), трошкови утрошене електричне енергије (C_{ed}), трошкови одржавања (C_{grd}) и укупни (C_d) трошкови упоредивих светлотехничких решења реализованих помоћу светиљки са натријумовим (HPS), метал-халогеним (MH) и LED изворима (неутралне беле (NW LEDs) и топло-беле боје (WW LEDs)) (једностран и цик-цак распореди)

Распоред стубова	Светло-техничка класа	Светло-техничко решење	Без уважавања мезопских ефеката				Са уважавањем мезопских ефеката			
			C_{ind} (1000 €)	C_{ed} (1000 €)	C_{grd} (1000 €)	C_d (1000 €)	C_{ind} (1000 €)	C_{ed} (1000 €)	C_{grd} (1000 €)	C_d (1000 €)
Једностран и две траке	M3	HPS	68	115	15	198	68	115	15	198
		MH	73	123	56	252	73	123	56	252
		NW LEDs	69	53	27	148	61	47	24	133
		WW LEDs	83	64	33	180	76	58	30	164
	M4	HPS	87	95	17	199	87	95	17	199
		MH	77	100	65	243	77	100	65	243
		NW LEDs	77	41	31	149	67	36	27	130
		WW LEDs	61	47	24	133	82	44	33	158
	M5	HPS	62	63	11	136	62	63	11	136
		MH	59	72	47	178	59	72	47	178
		NW LEDs	51	27	20	98	50	27	20	97
		WW LEDs	55	30	22	107	51	27	20	98
	M6	HPS	64	63	11	138	64	63	11	138
		MH	54	66	43	163	54	66	43	163
		NW LEDs	47	25	20	92	47	25	20	92
		WW LEDs	49	26	21	96	47	25	20	92
Цик-цак три траке	M3	HPS	157	160	29	347	157	160	29	347
		MH	131	169	110	410	131	169	110	410
		NW LEDs	125	72	54	251	122	66	49	236
		WW LEDs	140	81	61	282	131	76	57	264
	M4	HPS	114	138	25	277	114	138	25	277
		MH	115	138	90	342	115	138	90	342
		NW LEDs	109	59	44	213	100	54	40	195
		WW LEDs	122	66	49	236	114	62	46	222
	M5	HPS	69	83	15	168	69	83	15	168
		MH	69	83	54	207	69	83	54	207
		NW LEDs	67	36	27	130	63	33	25	121
		WW LEDs	75	40	30	144	67	36	27	130

Табела 6.2. Актуелизовани почетни трошкови (C_{ind}), трошкови утрошене електричне енергије (C_{ed}), трошкови одржавања (C_{grd}) и укупни (C_d) трошкови упоредивих светлотехничких решења реализованих помоћу светиљки са натријумовим (HPS), метал-халогеним (MH) и LED изворима (неутралне беле (NW LEDs) и топло-беле боје (WW LEDs)) (наспрамни и централни распореди)

Распоред стубова	Светло-техничка класа	Светло-техничко решење	Без уважавања мезопских ефеката				Са уважавањем мезопских ефеката			
			C_{ind} (1000 €)	C_{ed} (1000 €)	C_{grd} (1000 €)	C_d (1000 €)	C_{ind} (1000 €)	C_{ed} (1000 €)	C_{grd} (1000 €)	C_d (1000 €)
Наспрамни три траке	M2	HPS	217	235	43	495	217	235	43	495
		MH	232	241	157	630	232	241	157	630
		NW LEDs	209	113	85	407	200	108	81	389
		WW LEDs	226	131	98	455	213	123	92	429
	M3	HPS	157	160	29	347	157	160	29	347
		MH	176	172	112	459	176	172	112	459
		NW LEDs	124	72	54	250	124	67	50	241
		WW LEDs	143	82	61	286	133	77	58	268
	M4	HPS	145	149	27	321	145	149	27	321
		MH	162	160	104	427	162	160	104	427
		NW LEDs	114	62	46	222	108	59	44	211
		WW LEDs	124	67	50	241	114	62	46	222
Наспрамни четири траке	M1	HPS	199	336	44	579	199	336	44	579
		MH	223	377	172	772	223	377	172	772
		NW LEDs	226	174	88	488	215	166	85	465
		WW LEDs	275	211	108	594	260	200	102	562
	M2	HPS	227	292	53	573	227	292	53	573
		MH	227	292	190	710	227	292	190	710
		NW LEDs	235	136	102	473	231	123	92	447
		WW LEDs	206	158	81	445	190	147	75	412
	M3	HPS	175	189	34	399	175	189	34	399
		MH	199	206	134	540	199	206	134	540
		NW LEDs	153	87	65	305	138	80	60	277
		WW LEDs	137	106	54	296	162	93	69	323
Централни три траке (градске улице)	M1	HPS	167	540	48	756	167	540	48	756
		MH	201	651	201	1053	201	651	201	1053
		NW LEDs	256	334	129	719	251	314	121	686
		WW LEDs	163	388	63	614	163	388	63	614
	M2	HPS	125	405	36	567	125	405	36	567
		MH	156	504	155	815	156	504	155	815
		NW LEDs	236	238	121	595	221	223	113	557
		WW LEDs	139	310	61	510	154	264	69	487
Централни три траке (аутопут)	M1	HPS	104	491	27	623	104	491	27	623
		MH	217	626	193	1037	217	626	193	1037
		NW LEDs	141	305	50	497	131	282	46	459
		WW LEDs	154	341	56	550	148	329	54	531
	M2	HPS	137	393	35	565	137	393	35	565
		MH	236	459	209	903	236	459	209	903
		NW LEDs	121	242	48	411	138	220	58	415
		WW LEDs	126	270	44	440	120	258	42	421

Табела 6.3. Односи укупних актуелизованих трошкова за све разматране случајеве једностраног распореда

Распоред стубова	Светло- техничка класа	Однос	i (%)								
			3			5			7		
			c _e (€/kWh)								
			0,10	0,20	0,30	0,10	0,20	0,30	0,10	0,20	0,30
Једнострани две траке	М3	C _{dLEDNW} / C _{dHPS}	0,86	0,73	0,67	0,87	0,75	0,69	0,88	0,77	0,70
		C _{dLEDWW} / C _{dHPS}	1,04	0,89	0,81	1,05	0,91	0,83	1,07	0,93	0,85
		C _{dLEDNWmes} / C _{dHPS}	0,76	0,65	0,60	0,78	0,67	0,61	0,79	0,68	0,63
		C _{dLEDWWmes} / C _{dHPS}	0,95	0,81	0,74	0,96	0,83	0,76	0,98	0,85	0,78
		C _{dLEDNWmes} / C _{dLEDNW}	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
		C _{dLEDWWmes} / C _{dLEDWW}	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
		C _{dLEDWW} / C _{dMH}	0,75	0,69	0,66	0,78	0,72	0,68	0,80	0,74	0,70
		C _{dLEDWWmes} / C _{dMH}	0,69	0,63	0,60	0,71	0,65	0,62	0,73	0,67	0,64
	М4	C _{dLEDNW} / C _{dHPS}	0,84	0,74	0,67	0,84	0,75	0,69	0,85	0,76	0,70
		C _{dLEDWW} / C _{dHPS}	0,72	0,66	0,63	0,72	0,67	0,63	0,71	0,67	0,64
		C _{dLEDNWmes} / C _{dHPS}	0,73	0,64	0,59	0,74	0,65	0,60	0,74	0,66	0,61
		C _{dLEDWWmes} / C _{dHPS}	0,89	0,78	0,72	0,90	0,79	0,73	0,90	0,80	0,74
		C _{dLEDNWmes} / C _{dLEDNW}	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
		C _{dLEDWWmes} / C _{dLEDWW}	1,24	1,18	1,14	1,25	1,19	1,15	1,26	1,21	1,17
		C _{dLEDWW} / C _{dMH}	0,55	0,53	0,52	0,56	0,55	0,53	0,58	0,56	0,55
		C _{dLEDWWmes} / C _{dMH}	0,68	0,63	0,59	0,71	0,65	0,61	0,73	0,67	0,64
	М5	C _{dLEDNW} / C _{dHPS}	0,80	0,71	0,65	0,80	0,72	0,66	0,80	0,72	0,67
		C _{dLEDWW} / C _{dHPS}	0,88	0,77	0,71	0,88	0,78	0,73	0,88	0,79	0,74
		C _{dLEDNWmes} / C _{dHPS}	0,80	0,70	0,65	0,80	0,71	0,66	0,80	0,72	0,67
		C _{dLEDWWmes} / C _{dHPS}	0,80	0,71	0,65	0,80	0,72	0,66	0,80	0,72	0,67
		C _{dLEDNWmes} / C _{dLEDNW}	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
		C _{dLEDWWmes} / C _{dLEDWW}	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
		C _{dLEDWW} / C _{dMH}	0,63	0,58	0,55	0,65	0,60	0,57	0,67	0,62	0,59
		C _{dLEDWWmes} / C _{dMH}	0,57	0,53	0,50	0,59	0,55	0,52	0,61	0,57	0,54
	М6	C _{dLEDNW} / C _{dHPS}	0,75	0,66	0,61	0,74	0,67	0,62	0,74	0,67	0,63
		C _{dLEDWW} / C _{dHPS}	0,78	0,69	0,64	0,78	0,70	0,65	0,78	0,70	0,65
		C _{dLEDNWmes} / C _{dHPS}	0,75	0,66	0,61	0,74	0,67	0,62	0,74	0,67	0,63
		C _{dLEDWWmes} / C _{dHPS}	0,75	0,66	0,61	0,74	0,67	0,62	0,74	0,67	0,63
		C _{dLEDNWmes} / C _{dLEDNW}	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
		C _{dLEDWWmes} / C _{dLEDWW}	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
		C _{dLEDWW} / C _{dMH}	0,62	0,57	0,54	0,64	0,59	0,56	0,66	0,61	0,58
		C _{dLEDWWmes} / C _{dMH}	0,59	0,55	0,52	0,61	0,57	0,53	0,63	0,58	0,55

Табела 6.4. Односи укупних актуелизованих трошкова за све разматране случајеве цик-цак распореда

Распоред стубова	Светло- техничка класа	Однос	i (%)								
			3			5			7		
			c _e (€/kWh)								
			0,10	0,20	0,30	0,10	0,20	0,30	0,10	0,20	0,30
Цик-цак три траке	M3	C _{dLEDNW} / C _{dHPS}	0,81	0,72	0,66	0,80	0,72	0,67	0,80	0,73	0,68
		C _{dLEDWW} / C _{dHPS}	0,91	0,80	0,74	0,90	0,81	0,75	0,90	0,82	0,76
		C _{dLEDNWmes} / C _{dHPS}	0,76	0,67	0,62	0,76	0,68	0,63	0,76	0,69	0,64
		C _{dLEDWWmes} / C _{dHPS}	0,85	0,75	0,70	0,85	0,76	0,71	0,84	0,77	0,71
		C _{dLEDNWmes} / C _{dLEDNW}	0,95	0,94	0,94	0,95	0,94	0,94	0,95	0,95	0,94
		C _{dLEDWWmes} / C _{dLEDWW}	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
		C _{dLEDWW} / C _{dMH}	0,72	0,66	0,63	0,74	0,69	0,65	0,77	0,71	0,67
		C _{dLEDWWmes} / C _{dMH}	0,67	0,62	0,59	0,70	0,64	0,61	0,72	0,67	0,63
	M4	C _{dLEDNW} / C _{dHPS}	0,87	0,75	0,69	0,88	0,77	0,70	0,89	0,78	0,72
		C _{dLEDWW} / C _{dHPS}	0,97	0,84	0,76	0,98	0,85	0,78	0,99	0,87	0,80
		C _{dLEDNWmes} / C _{dHPS}	0,80	0,69	0,63	0,81	0,70	0,64	0,81	0,72	0,66
		C _{dLEDWWmes} / C _{dHPS}	0,91	0,79	0,71	0,92	0,80	0,73	0,93	0,82	0,75
		C _{dLEDNWmes} / C _{dLEDNW}	0,92	0,91	0,91	0,92	0,91	0,91	0,92	0,92	0,91
		C _{dLEDWWmes} / C _{dLEDWW}	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
		C _{dLEDWW} / C _{dMH}	0,72	0,67	0,63	0,75	0,69	0,66	0,77	0,71	0,68
		C _{dLEDWWmes} / C _{dMH}	0,68	0,63	0,60	0,70	0,65	0,62	0,72	0,67	0,64
	M5	C _{dLEDNW} / C _{dHPS}	0,88	0,76	0,69	0,89	0,78	0,71	0,90	0,79	0,72
		C _{dLEDWW} / C _{dHPS}	0,98	0,84	0,77	0,99	0,86	0,78	0,99	0,88	0,80
		C _{dLEDNWmes} / C _{dHPS}	0,82	0,71	0,64	0,83	0,72	0,66	0,83	0,74	0,67
		C _{dLEDWWmes} / C _{dHPS}	0,88	0,76	0,69	0,89	0,78	0,71	0,90	0,79	0,72
		C _{dLEDNWmes} / C _{dLEDNW}	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93
		C _{dLEDWWmes} / C _{dLEDWW}	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90
		C _{dLEDWW} / C _{dMH}	0,73	0,67	0,64	0,75	0,70	0,66	0,78	0,72	0,68
		C _{dLEDWWmes} / C _{dMH}	0,66	0,61	0,58	0,68	0,63	0,60	0,70	0,65	0,62

Табела 6.5. Односи укупних актуелизованих трошкова за све разматране случајеве наспрамног распореда

Распоред стубова	Светло- техничка класа	Однос	i (%)								
			3			5			7		
			c _e (€/kWh)								
			0,10	0,20	0,30	0,10	0,20	0,30	0,10	0,20	0,30
Наспрамни три траке	M2	C _{dLEDNW} /C _{dHPS}	0,92	0,81	0,74	0,93	0,82	0,76	0,93	0,83	0,77
		C _{dLEDWW} /C _{dHPS}	1,03	0,91	0,84	1,03	0,92	0,85	1,03	0,93	0,86
		C _{dLEDNWmes} /C _{dHPS}	0,88	0,77	0,71	0,89	0,78	0,72	0,89	0,80	0,74
		C _{dLEDWWmes} /C _{dHPS}	0,97	0,86	0,79	0,97	0,87	0,80	0,97	0,87	0,81
		C _{dLEDNWmes} /C _{dLEDNW}	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
		C _{dLEDWWmes} /C _{dLEDWW}	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
		C _{dLEDWW} /C _{dMH}	0,75	0,71	0,68	0,77	0,72	0,69	0,78	0,74	0,71
	C _{dLEDWWmes} /C _{dMH}	0,70	0,66	0,64	0,72	0,68	0,65	0,74	0,70	0,67	
	M3	C _{dLEDNW} /C _{dHPS}	0,80	0,71	0,66	0,80	0,72	0,67	0,80	0,73	0,68
		C _{dLEDWW} /C _{dHPS}	0,92	0,82	0,76	0,92	0,82	0,77	0,92	0,83	0,78
		C _{dLEDNWmes} /C _{dHPS}	0,78	0,69	0,63	0,78	0,69	0,64	0,78	0,70	0,65
		C _{dLEDWWmes} /C _{dHPS}	0,86	0,76	0,71	0,86	0,77	0,72	0,86	0,78	0,73
		C _{dLEDNWmes} /C _{dLEDNW}	0,97	0,96	0,96	0,97	0,96	0,96	0,97	0,97	0,96
		C _{dLEDWWmes} /C _{dLEDWW}	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,94	0,94
		C _{dLEDWW} /C _{dMH}	0,64	0,61	0,59	0,66	0,62	0,60	0,67	0,64	0,61
	C _{dLEDWWmes} /C _{dMH}	0,60	0,57	0,55	0,61	0,58	0,56	0,63	0,60	0,57	
	M4	C _{dLEDNW} /C _{dHPS}	0,77	0,68	0,63	0,78	0,69	0,64	0,78	0,70	0,65
		C _{dLEDWW} /C _{dHPS}	0,84	0,74	0,68	0,84	0,75	0,69	0,84	0,76	0,70
		C _{dLEDNWmes} /C _{dHPS}	0,74	0,65	0,60	0,74	0,66	0,61	0,74	0,66	0,62
		C _{dLEDWWmes} /C _{dHPS}	0,77	0,68	0,63	0,78	0,69	0,64	0,78	0,70	0,65
		C _{dLEDNWmes} /C _{dLEDNW}	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
		C _{dLEDWWmes} /C _{dLEDWW}	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
		C _{dLEDWW} /C _{dMH}	0,58	0,55	0,53	0,60	0,56	0,54	0,61	0,58	0,55
	C _{dLEDWWmes} /C _{dMH}	0,54	0,51	0,49	0,55	0,52	0,50	0,56	0,53	0,51	
Наспрамни четири траке	M1	C _{dLEDNW} /C _{dHPS}	0,96	0,82	0,75	0,97	0,84	0,77	0,99	0,86	0,79
		C _{dLEDWW} /C _{dHPS}	1,17	1,00	0,91	1,19	1,03	0,94	1,20	1,05	0,96
		C _{dLEDNWmes} /C _{dHPS}	0,91	0,78	0,72	0,93	0,80	0,73	0,94	0,82	0,75
		C _{dLEDWWmes} /C _{dHPS}	1,11	0,95	0,86	1,12	0,97	0,89	1,14	0,99	0,91
		C _{dLEDNWmes} /C _{dLEDNW}	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
		C _{dLEDWWmes} /C _{dLEDWW}	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
		C _{dLEDWW} /C _{dMH}	0,81	0,74	0,71	0,84	0,77	0,73	0,86	0,79	0,75
	C _{dLEDWWmes} /C _{dMH}	0,76	0,70	0,67	0,79	0,73	0,69	0,82	0,75	0,71	
	M2	C _{dLEDNW} /C _{dHPS}	0,94	0,81	0,73	0,95	0,82	0,75	0,96	0,84	0,77
		C _{dLEDWW} /C _{dHPS}	0,85	0,77	0,72	0,86	0,78	0,73	0,86	0,79	0,74
		C _{dLEDNWmes} /C _{dHPS}	0,89	0,76	0,69	0,90	0,78	0,71	0,91	0,80	0,72
		C _{dLEDWWmes} /C _{dHPS}	0,79	0,71	0,67	0,79	0,72	0,68	0,80	0,73	0,69
		C _{dLEDNWmes} /C _{dLEDNW}	0,95	0,94	0,94	0,95	0,94	0,94	0,96	0,95	0,94
		C _{dLEDWWmes} /C _{dLEDWW}	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92	0,93	0,93
		C _{dLEDWW} /C _{dMH}	0,63	0,61	0,60	0,65	0,63	0,61	0,67	0,64	0,63
	C _{dLEDWWmes} /C _{dMH}	0,58	0,57	0,55	0,60	0,58	0,57	0,62	0,60	0,58	
	M3	C _{dLEDNW} /C _{dHPS}	0,86	0,76	0,70	0,86	0,77	0,71	0,86	0,77	0,72
		C _{dLEDWW} /C _{dHPS}	0,80	0,74	0,70	0,80	0,74	0,71	0,80	0,75	0,71
		C _{dLEDNWmes} /C _{dHPS}	0,78	0,69	0,63	0,78	0,70	0,64	0,78	0,70	0,65
		C _{dLEDWWmes} /C _{dHPS}	0,91	0,80	0,74	0,91	0,81	0,75	0,91	0,82	0,76
		C _{dLEDNWmes} /C _{dLEDNW}	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91
		C _{dLEDWWmes} /C _{dLEDWW}	1,13	1,08	1,05	1,14	1,09	1,06	1,14	1,10	1,07
		C _{dLEDWW} /C _{dMH}	0,55	0,54	0,53	0,56	0,55	0,54	0,57	0,56	0,55
	C _{dLEDWWmes} /C _{dMH}	0,62	0,58	0,56	0,63	0,60	0,57	0,65	0,61	0,59	

Табела 6.6. Односи укупних актуелизованих трошкова за све разматране случајеве централног распореда

Распоред стубова	Светло- техничка класа	Однос	<i>i</i> (%)								
			3			5			7		
			<i>c_e</i> (€/kWh)								
			0,10	0,20	0,30	0,10	0,20	0,30	0,10	0,20	0,30
Централни три траке (градске улице)	M1	<i>C_{dLEDNW}</i> / <i>C_{dHPS}</i>	1,11	0,93	0,84	1,14	0,95	0,86	1,16	0,98	0,88
		<i>C_{dLEDWW}</i> / <i>C_{dHPS}</i>	0,86	0,81	0,78	0,87	0,81	0,79	0,87	0,82	0,79
		<i>C_{dLEDNWmes}</i> / <i>C_{dHPS}</i>	1,06	0,88	0,80	1,09	0,91	0,82	1,12	0,93	0,84
		<i>C_{dLEDWWmes}</i> / <i>C_{dHPS}</i>	0,86	0,81	0,78	0,87	0,81	0,79	0,87	0,82	0,79
		<i>C_{dLEDNWmes}</i> / <i>C_{dLEDNW}</i>	0,96	0,95	0,95	0,96	0,95	0,95	0,96	0,96	0,95
		<i>C_{dLEDWWmes}</i> / <i>C_{dLEDWW}</i>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
		<i>C_{dLEDWW}</i> / <i>C_{dMH}</i>	0,57	0,58	0,58	0,58	0,58	0,59	0,59	0,59	0,59
		<i>C_{dLEDWWmes}</i> / <i>C_{dMH}</i>	0,57	0,58	0,58	0,58	0,58	0,59	0,59	0,59	0,59
	M2	<i>C_{dLEDNW}</i> / <i>C_{dHPS}</i>	1,27	1,01	0,90	1,31	1,05	0,93	1,34	1,08	0,96
		<i>C_{dLEDWW}</i> / <i>C_{dHPS}</i>	0,97	0,89	0,86	0,98	0,90	0,86	0,98	0,91	0,87
		<i>C_{dLEDNWmes}</i> / <i>C_{dHPS}</i>	1,19	0,95	0,84	1,22	0,98	0,87	1,26	1,02	0,90
		<i>C_{dLEDWWmes}</i> / <i>C_{dHPS}</i>	0,96	0,84	0,79	0,97	0,86	0,80	0,99	0,87	0,82
		<i>C_{dLEDNWmes}</i> / <i>C_{dLEDNW}</i>	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94
		<i>C_{dLEDWWmes}</i> / <i>C_{dLEDWW}</i>	0,99	0,95	0,92	1,00	0,95	0,93	1,01	0,96	0,94
		<i>C_{dLEDWW}</i> / <i>C_{dMH}</i>	0,62	0,62	0,62	0,63	0,63	0,62	0,64	0,64	0,63
		<i>C_{dLEDWWmes}</i> / <i>C_{dMH}</i>	0,61	0,58	0,57	0,63	0,60	0,58	0,65	0,61	0,59
Централни три траке (аутопут)	M1	<i>C_{dLEDNW}</i> / <i>C_{dHPS}</i>	0,89	0,78	0,73	0,91	0,80	0,75	0,93	0,82	0,76
		<i>C_{dLEDWW}</i> / <i>C_{dHPS}</i>	0,98	0,86	0,81	1,01	0,88	0,83	1,03	0,90	0,84
		<i>C_{dLEDNWmes}</i> / <i>C_{dHPS}</i>	0,82	0,72	0,68	0,84	0,74	0,69	0,86	0,75	0,70
		<i>C_{dLEDWWmes}</i> / <i>C_{dHPS}</i>	0,95	0,83	0,79	0,97	0,85	0,80	1,00	0,87	0,82
		<i>C_{dLEDNWmes}</i> / <i>C_{dLEDNW}</i>	0,93	0,92	0,92	0,93	0,92	0,92	0,93	0,92	0,92
		<i>C_{dLEDWWmes}</i> / <i>C_{dLEDWW}</i>	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
		<i>C_{dLEDWW}</i> / <i>C_{dMH}</i>	0,51	0,52	0,53	0,53	0,53	0,53	0,54	0,54	0,54
		<i>C_{dLEDWWmes}</i> / <i>C_{dMH}</i>	0,50	0,51	0,51	0,51	0,51	0,52	0,52	0,52	0,52
	M2	<i>C_{dLEDNW}</i> / <i>C_{dHPS}</i>	0,78	0,72	0,69	0,79	0,73	0,70	0,79	0,73	0,70
		<i>C_{dLEDWW}</i> / <i>C_{dHPS}</i>	0,82	0,77	0,75	0,83	0,78	0,75	0,83	0,78	0,76
		<i>C_{dLEDNWmes}</i> / <i>C_{dHPS}</i>	0,82	0,72	0,68	0,83	0,73	0,69	0,84	0,75	0,70
		<i>C_{dLEDWWmes}</i> / <i>C_{dHPS}</i>	0,78	0,74	0,72	0,79	0,74	0,72	0,80	0,75	0,73
		<i>C_{dLEDNWmes}</i> / <i>C_{dLEDNW}</i>	1,05	1,00	0,98	1,05	1,01	0,99	1,06	1,02	0,99
		<i>C_{dLEDWWmes}</i> / <i>C_{dLEDWW}</i>	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
		<i>C_{dLEDWW}</i> / <i>C_{dMH}</i>	0,45	0,49	0,51	0,45	0,49	0,51	0,46	0,49	0,51
		<i>C_{dLEDWWmes}</i> / <i>C_{dMH}</i>	0,43	0,46	0,49	0,43	0,47	0,49	0,44	0,47	0,49

БИОГРАФИЈА АУТОРА

Марко Давидовић је рођен 3. јануара 1985. у Београду. Основну школу „Бора Станковић“ у Београду уписао је 1991. године, а завршио 1999. године као носилац Вукове дипломе. Матурирао је 2003. године у Математичкој гимназији у Београду. Основне академске студије завршио је 2011. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на Одсеку за енергетику, смер Електроенергетски системи, са просечном оценом 7,55 и оценом на дипломском раду 10. Мастер академске студије завршио је 2012. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, модул Електроенергетски системи, са просечном оценом 9,67 и оценом на завршном мастер раду 10.

Докторске студије је уписао 2013. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, модул Електроенергетске мреже.

Од 2013. до 2021. године био је ангажован на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја РС "Препоруке за извођење и правилно коришћење нисконапонских електричних и громобранских заштитних инсталација и развој методологије за верификацију њиховог квалитета са аспекта заштите грађевинских објеката од пожара" – ТР36018, чији је руководиоца проф. др Миомир Костић.

Библиографија

I Радови у међународним часописима са SCI листе

1. Hadziefendic N., Davidovic M., Djordjevic V., Kostic M.: *The Impact of an Incomplete Overlap of a Copper Conductor and the Corresponding Terminal on the Contact Temperature*, IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Vol. 7, Issue 10, 2017, pp. 1644-1654, **DOI:** 10.1109/TCPMT.2017.2720421 (M22) (IF 1.581).
2. Davidovic M., Djokic L., Cabarkapa A., Kostic M.: *Warm white versus neutral white LED street lighting: Pedestrians' impressions*, Lighting Research & Technology, Vol. 51, Issue 8, 2019, pp. 1237-1248, **DOI:** 10.1177/1477153518804296 (M22) (IF 2.226)
3. Davidovic M., Djokic L., Cabarkapa A., Djuretic A., Skerovic V., Kostic M.: *Drivers' preference for the color of LED street lighting*, IEEE Access, Vol. 7, 2019, pp. 72850-72861, **DOI:** 10.1109/ACCESS.2019.2920737 (M21) (IF 3.745).
4. Davidovic M., Djordjevic N., Mikulovic J., Kostic M., Radakovic Z.: *Voltage distortion in LED street lighting installations*, Electrical Engineering, Vol. 103, Issue 4, 2021, pp. 2161-2180, **DOI:** 10.1007/s00202-020-01181-6 (M23) (IF 1.836).

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора Марко Давидовић

Број индекса 13/5024

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Утицај примене LED технологије на енергетску ефикасност и квалитет електричне енергије у адаптивном уличном осветљењу

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 28. 3. 2022.



Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада

Име и презиме аутора Марко Давидовић

Број индекса 13/5024

Студијски програм Електротехника и рачунарство

Наслов рада Утицај примене LED технологије на енергетску ефикасност и квалитет електричне енергије у адаптивном уличном осветљењу

Ментор проф. др Јован Микуловић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањивања у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 28. 3. 2022.



Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Утицај примене LED технологије на енергетску ефикасност и квалитет електричне енергије у адаптивном уличном осветљењу

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.
Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 28. 3. 2022.



1. **Ауторство.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.
2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.
3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.
4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.
5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.
6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољавање умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.