



УНИВЕРЗИТЕТ У НИШУ
ГРАЂЕВИНСКО-АРХИТЕКТОНСКИ ФАКУЛТЕТ
У НИШУ



Младен М. Милановић

РАЗВОЈ МЕТОДОЛОГИЈЕ ЗА ДЕФИНИСАЊЕ ПОТРЕБА ЗА ВОДОМ РЕФЕРЕНТНЕ КУЛТУРЕ У УРБАНИМ УСЛОВИМА

ДОКТОРСКА ДИСЕРТАЦИЈА

Текст ове докторске дисертације ставља се на увид јавности,
у складу са чланом 40., став 9. Закона о високом образовању
(„Сл. гласник РС“, бр. 88/2017, 73/2018, 27/2018 – др. закон,
67/2019, 6/2020 – др. закони, 11/2021 – аутентично тумачење,
67/2021, 67/2021 – др. закон и 76/2023).

НАПОМЕНА О АУТОРСКИМ ПРАВИМА:

Овај текст сматра се рукописом и само се саопштава јавности
(члан 7. Закона о ауторским и сродним правима, „Сл. гласник РС“, бр. 104/2009,
99/2011, 119/2012, 29/2016 – одлука УС и 66/2019).

Ниједан део ове докторске дисертације не сме се користити ни у какве сврхе,
осим за упознавање са њеним садржајем пре одбране дисертације.

Ниш, 2025.



UNIVERSITY OF NIŠ
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING AND
ARCHITECTURE OF NIŠ



Mladen M. Milanović

**THE DEVELOPMENT OF THE
METHODOLOGY FOR ESTIMATING
WATER REQUIREMENTS OF A
REFERENCE CROP IN URBAN
CONDITIONS**

DOCTORAL DISSERTATION

Niš, 2025.

Подаци о докторској дисертацији

Ментор:	Др Славиша Трајковић, редовни професор Универзитет у Нишу, Грађевинско-архитектонски факултет у Нишу
Наслов:	Развој методологије за дефинисање потреба за водом референтне културе у урбаним условима
Резиме:	Дисертација представља аналитички оквир за дефинисање евапотранспирације као једног одрживог механизма у урбаном хидролошком циклусу. Познавање евапотранспирације је значајно за велики број хидролошких проблема у градовима. Квантификовање евапотранспирације у урбаним условима Ниша, односно ефикасност постојећих предиктивних метода и развој нових једначина за дефинисање потреба за водом референтне културе циљеви су ове студије. За анализу постављених циљева обезбеђени су временски подаци са: локалне аутоматске станице, испаритеља и метеоролошке опсерваторије у Нишу. Шест емпиријских једначина коришћено је за моделовање референтне евапотранспирације, чија је тачност утврђена упоређивањем са FAO-56 Penman-Monteith методом. Анализа резултата показала је да најбоље перформансе има Priestley and Taylor метод, с тим да су резултати указали на потребу даљег прилагођавања метода локалним условима. Једначине су калибрисане коришћењем метода оптимизације (генетски алгоритам и оптимизација ројем честица), ради најбољег уклапања са измереним подацима. Како би се постигла што ефикаснија оптимизација метода, испитана је осетљивост референтне евапотранспирације на метеоролошке параметре. Резултати осетљивости показали су да је евапотранспирација најосетљивија, у дефинисаним урбаним условима, на промене соларне радијације и максималне температуре ваздуха. Перформансе оптимизованих једначина процењене су коришћењем статистичких индикатора који су издвојили методе Priestley and Taylor и Stephens and Stewart као најбоље оптимизоване методе. Применом вишеструке линеарне регресије развијене су нове једначине за прорачун евапотранспирације са ограниченим бројем података, при чему се посебно издваја метод заснован на односу минималне и максималне температуре и соларне радијације.
Научна област:	Грађевинарство
Научна дисциплина:	Наводњавање
Кључне речи:	евапотранспирација, оптимизација, осетљивост, вишеструка линеарна регресија, једначине са ограниченим бројем података, урбани услови Ниша
УДК:	551.573:711.522(497.11)(043.3)

CERIF класификација:	T 220
Тип лиценце Креативне заједнице:	CC BY-NC-ND

Data on Doctoral Dissertation

Doctoral Supervisor:	Dr Slaviša Trajković, Full Professor University of Niš, Faculty of Civil Engineering and Architecture of Niš
Title:	The development of the methodology for estimating water requirements of a reference crop in urban conditions
Abstract:	The dissertation presents an analytical framework for defining evapotranspiration as a sustainable mechanism in the urban hydrological cycle. Familiarity with evapotranspiration is important for a large number of hydrological issues in cities. Quantifying evapotranspiration in urban conditions of Niš, as well as the efficiency of existing predictive methods and developing new equations for defining water requirements of reference crops, represent the aims of this study. For the analysis of the set aims, weather data were provided from the following: local automatic stations, evaporators and meteorological observatories in Niš. Six empirical equations were used for the purpose of modeling reference evapotranspiration, the accuracy of which was determined by comparing them with the FAO-56 Penman-Monteith method. The analysis of results has showed that the Priestley and Taylor method exhibits the best performance, but the results have indicated the need for further adaptation of the method to local conditions. The equations were calibrated using optimization methods (genetic algorithm and particle swarm optimization) to best fit the measured data. The sensitivity of the reference evapotranspiration to meteorological parameters was examined in order to achieve the most efficient optimization of the methods. The sensitivity results showed that evapotranspiration is the most sensitive, in defined urban conditions, to changes in solar radiation and maximum air temperature. The performance of the optimized equations was evaluated using statistical indicators that revealed the Priestley and Taylor method and the Stephens and Stewart method as the best optimized methods. By applying multiple linear regression, new equations were developed for the purpose of calculating evapotranspiration with a limited number of data, which has especially highlighted the method based on the ratio of minimum and maximum temperature and solar radiation.
Scientific Field:	Civil Engineering
Scientific Discipline:	Irrigation
Key words:	evapotranspiration, optimization, sensitivity, multiple linear regression, equations with limited data, urban conditions of Niš
UDC:	551.573:711.522(497.11)(043.3)
CERIF Classification:	T 220

Creative
Commons
License
Type:

CC BY-NC-ND

ЗАХВАЛНОСТ АУТОРА

Као прво желео бих да се захвалим мом ментору проф. др Славиши Трајковићу. Његов ентузијазам и веровање у мене пружили су ми мотивацију и самопоуздање да истрајем на овом путу, на чему сам му искрено захвалан. Без његове континуиране подршке, помоћи око избора теме, научног вођства, пажљивог читања рукописа тезе и драгоцених сугестија, пут би био далеко тежи ако не и немогућ.

Дугујем велику захвалност проф. др Драгану Милићевићу на охрабрењу, сарадњи на радовима, стручним саветима и посебно помоћи у делу оптимизационих процеса.

Захвалио бих се и проф. др Милану Гоцићу на мотивацији и сарадњи на бројним истраживачким пројектима. Такође, захвалио бих се и осталим члановима комисије на подршци и корисним сугестијама током израде дисертације.

Захваљујем се свим колегиницама и колегама са Катедре и Института на разумевању и подршци.

Велику захвалност дугујем г. Зорану Бојчеву шефу метеоролошке станице у Димитровграду. Љубазношћу г. Бојчева добио сам опрему потребну за процес мерења испаравања као и практична упутства за рад која су омогућила квалитетно снимање и обраду резултата према стандардима РХМЗ. Захвалност дугујем и г. Зорану Васиљевићу шефу метеоролошке опсерваторије у Нишу за метеоролошке податке и корисне сугестије код њихове обраде.

На крају велику захвалност дугујем својој породици на непоколебљивој и безрезервној подршци, стрпљењу и разумевању током израде дисертације. Посебно сам им захвалан за помоћ око праћења рада испаритеља. Њима је и посвећена ова дисертација.

САДРЖАЈ

Списак слика:		I
Списак табела:		III
Списак ознака:		IV
Списак скраћеница:		VIII
1 УВОД.....		1
1.1 Полазне хипотезе.....		3
1.2 Циљеви истраживања.....		4
1.3 Процес планираног истраживања.....		5
2 ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ.....		7
2.1 Општи појмови.....		7
2.2 Евапотранспирација – концепт.....		8
2.2.1 Метод трансфера влаге (аеродинамички метод)		9
2.2.2 Испаравање у билансу топлотне енергије.....		9
2.2.3 Метод биланса воде.....		10
2.2.4 Фактори утицаја на евапотранспирацију.....		10
2.3 Утицај урбанизације на евапотранспирацију.....		11
2.3.1 Урбанизација и хидролошки циклус.....		11
2.3.1.1 Зелена инфраструктура.....		13
2.3.1.2 Евапотранспирација у урбаном окружењу.....		14
2.3.1.3 Евапотранспирација као компонента наводњавања.....		16
2.4 Методе мерења евапотранспирације.....		18
2.4.1 Евапорационе методе.....		18
2.4.2 Метода лизиметара.....		20
2.4.3 Метода Bowen-овог односа и равнотеже енергије.....		20
2.4.4 Метода Eddy коваријансе.....		21
2.4.5 Метода сцинтилометара.....		22
2.4.6 Мерење транспирације.....		22
2.4.6.1 Метода протока сока.....		23
2.4.6.2 Метода изотопа.....		23

2.5	Једначине за процену евапотранспирације.....	24
2.5.1	Penman и Penman-Monteith једначина.....	24
2.5.2	FAO-56 Penman-Monteith једначина.....	26
2.5.3	ASCE Penman-Monteith једначина.....	26
3	ОБЛАСТ ИСТРАЖИВАЊА.....	28
3.1	Опис локације.....	28
3.2	Метеоролошка осматрања.....	29
3.2.1	Аутоматска метеоролошка станица.....	30
3.2.2	Конвенционална метеоролошка станица.....	33
3.2.3	Метеоролошки подаци.....	33
3.2.3.1	Температура ваздуха.....	33
3.2.3.2	Релативна влажност ваздуха.....	34
3.2.3.3	Сунчево зрачење.....	34
3.2.3.4	Брзина ветра.....	35
3.3	Испаравање.....	36
3.3.1	Испаритељ класе А.....	36
3.3.2	Подаци о испаравању.....	37
4	МЕТОДОЛОГИЈА.....	39
4.1	Осмотрени подаци.....	39
4.1.1	Контрола квалитета података.....	39
4.1.1.1	Могуће грешке код мерења.....	39
4.1.1.2	Хомогеност података.....	41
4.2	Прорачун референтне евапотранспирације.....	42
4.2.1	Температурни методе.....	43
4.2.1.1	Hargreaves and Samani метод.....	43
4.2.1.2	FAO-56 Penman-Monteith температурни метод.....	44
4.2.2	Радијационе методе.....	45
4.2.2.1	Stephens and Stewart метод.....	45
4.2.2.2	Priestley and Taylor метод.....	46
4.2.3	Евапорационе методе.....	46
4.2.3.1	FAO – 24 Pan метод.....	46
4.2.3.1.1	FAO – 24 Pan Orang метод.....	47
4.2.3.1.2	FAO – 24 Allen and Pruitt метод.....	48

4.2.4	Комбиноване методе.....	48
4.2.4.1	FAO – 56 Penman-Monteith метод.....	48
4.3	Анализа осетљивости.....	49
4.4	Методе оптимизације.....	53
4.4.1	Генетски алгоритам.....	54
4.4.2	Оптимизација ројем честица.....	57
4.5	Статистички тестови.....	59
5	РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА ПОСТОЈЕЋИХ И ОПТИМИЗОВАНИХ МЕТОДА РЕФЕРЕНТНЕ ЕВАПОТРАНСПИРАЦИЈЕ.....	63
5.1	Анализа осмотрених података.....	63
5.1.1	Подаци са аутоматске метеоролошке станице.....	63
5.1.2	Подаци са конвенционалне метеоролошке станице.....	64
5.1.3	Компаративна анализа података аутоматске и конвенционалне метеоролошке станице.....	65
5.1.4	Подаци са испаритеља класе А.....	69
5.2	Прорачун референтне евапотранспирације.....	70
5.2.1	Компаративна анализа референтне евапотранспирације са аутоматске и конвенционалне метеоролошке станице.....	71
5.2.2	Компаративна анализа метода референтне евапотранспирације у урбаној средини.....	73
5.3	Анализа осетљивости метода референтне евапотранспирације у урбаним условима.....	78
5.4	Анализа оптимизованих метода референтне евапотранспирације.....	90
6	РАЗВОЈ И АНАЛИЗА НОВИХ МЕТОДА ЗА ПРОРАЧУН РЕФЕРЕНТНЕ ЕВАПОТРАНСПИРАЦИЈЕ СА ОГРАНИЧЕНИМ БРОЈЕМ ПОДАТАКА У УРБАНОЈ СРЕДИНИ.....	96
6.1	Једначине за процену референтне евапотранспирације са ограниченим бројем података.....	96
6.2	Метод вишеструке линеарне регресије.....	97
6.2.1	Развој регресионих метода за прорачун референтне евапотранспирације у урбаној средини.....	99
6.3	Прорачун регресионих метода референтне евапотранспирације.....	105
6.4	Анализа регресионих метода референтне евапотранспирације.....	107

6.5	Компаративна анализа нових – регресионих и оптимизованих метода референтне евапотранспирације са ограниченим бројем података.....	112
7	ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА.....	120
7.1	Сумирање резултата истраживања.....	120
7.2	Смернице за будућа истраживања.....	123
	ЛИТЕРАТУРА.....	125

Списак слика

Слика 3.1	Истраживана урбана област у Нишу.....	28
Слика 3.2	Мерно место и инсталирана опрема у урбаним условима.....	30
Слика 3.3	Инсталирана AWS у урбаним условима.....	32
Слика 3.4	Испаритељ класе А у урбаним условима.....	37
Слика 4.1	Шематски приказ генетског алгорита (GA).....	56
Слика 4.2	Шематски приказ оптимизације ројем честица (PSO).....	59
Слика 5.1	Хистограми (лево) и дијаграми расејања (десно) података са AWS и CWS за променљиве T_{min} , T_{max} , RH, U_2 и R_s	68
Слика 5.2	Срачунате вредности ET_0 по методи Р-М код AWS.....	71
Слика 5.3	Вредности референтне евапотранспирације код AWS и CWS.....	72
Слика 5.4	Дијаграм расејања између ET_0 CWS и E_{pan} и ET_0 AWS.....	73
Слика 5.5	Карактеристике три група ET_0 метода за анализирани период.....	75
Слика 5.6	Дијаграми расејања између ET_0 Р-М и процењених вредности ET_0	77
Слика 5.7	Зависност ET_0 од Т при различитим временским скалама.....	79
Слика 5.8	Зависност ET_0 од RH при различитим временским скалама.....	81
Слика 5.9	Зависност ET_0 од U_2 при различитим временским скалама.....	83
Слика 5.10	Зависност ET_0 од R_s при различитим временским скалама.....	84
Слика 5.11	Зависност ET_0 од E_{pan} при различитим временским скалама.....	86
Слика 5.12	Вредности SC на дневном и месечном нивоу.....	89
Слика 5.13	Криве осетљивости за различите метеоролошке параметре.....	90
Слика 5.14	Taylor-ов дијаграм за процењено ET_0 применом оптимизованих метода за фазу валидације.....	94
Слика 6.1	3D модел вишеструке линеарне регресије за MLR-2, MLR-4 и MLR-5 методе.....	102

Слика 6.2	Карактеристике MLR једначина у фази калибрације.....	107
Слика 6.3	Дијаграми расејања између нових MLR једначина и Р-М једначине, за калибрациону и валидациону фазу.....	111
Слика 6.4	Taylor-ов дијаграм процењене ET ₀ применом метода са ограниченим бројем података, за фазу валидације.....	113
Слика 6.5	Taylor-ов дијаграм процењене ET ₀ применом температурне и радијационе групе метода са ограниченим бројем података, за фазу валидације.....	114
Слика 6.6	Међусобно поређење метода са ограниченим бројем улазних података за фазу валидације.....	118
Слика 6.7	Упоредна анализа најбоље оптимизоване и MLR методе са референтном ET ₀ методом током калибрације и валидације.....	119

Списак табела

Табела 4.1	Класификација вредности коефицијента осетљивости.....	52
Табела 5.1	Статистичка анализа података са AWS.....	64
Табела 5.2	Статистичка анализа података са CWS.....	65
Табела 5.3	Статистички индикатори метеоролошких параметара између две станице.....	66
Табела 5.4	Преглед просечних дневних и сумарних месечних E_{pan} вредности по годинама.....	70
Табела 5.5	Промена ET_0 (%) у односу на промену метеоролошких параметара.....	90
Табела 5.6	Статистички индикатори оптимизационих метода за фазу калибрације ET_0 једначина.....	91
Табела 5.7	Статистички индикатори оптимизационих метода за фазу валидације ET_0 једначина.....	92
Табела 6.1	Улазни параметри вишеструких линеарних регресионих једначина и оптимизованих једначина за процену ET_0	100
Табела 6.2	Вишеструке линеарне регресионе једначине за процену ET_0	100
Табела 6.3	Анализа параметара MLR метода.....	104
Табела 6.4	Анализа квалитета MLR једначина.....	105
Табела 6.5	Резултати статистичких тестова MLR метода у фази калибрације.....	108
Табела 6.6	Резултати статистичких тестова MLR метода у фази валидације.....	108

Списак ознака

A	површина (m^2)
C_1	компонента сазнања
C_2	социјална компонента
CC	коефицијент корелације
C_d	константа која се мења са референтним типом, отпором површине и временским кораком израчунавања ($s\ m^{-1}$)
$\bar{c}$	просечна вредност срачунатих података
c_i	i-та срачуната вредност
C_k	коефицијент спљоштености
C_n	константа која се мења са референтним типом и временским кораком израчунавања ($K\ mm\ s^3\ Mg^{-1}\ dan^{-1}$)
C_p	специфична топлота ваздуха ($MJ\ m^{-2}\ dan^{-1}$)
C_s	коефицијент асиметрије
CV	климатска променљива
E	испаравање ($mm\ dan^{-1}$)
e	грешка
E_a	снага сушења ваздуха
e_a	стварни притисак zasiћене паре (kPa)
E_h	флукс латентне топлоте услед испаравања
E_{in}	прилив енергије
E_{out}	одлив енергије
E_{pan}	испаравање из суда класе A ($mm\ dan^{-1}$)
e_s	притисак zasiћене паре (kPa)
$e_s - e_a$	дефицит притиска паре zasiћења (kPa)
ET_0	референтна евапотранспирација ($mm\ dan^{-1}$)
ET_{sz}	стандардизована референтна евапотранспирација усева за кратке или високе површине ($mm\ dan^{-1}$)

F	специфично растојање од суда класе А у правцу ветра (m)
F_i	фактор који утиче на осетљивост
G	топлотни флуks земљишта ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$)
G _{best}	социјални фактор
H	осетна топлота ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$)
k	итерација
KGE	Kling-Gupta ефикасност
k_m	термин који ограничава пренос масе
K_p	пан коефицијент
$\bar{m}$	просечна вредност референтних података
MAE	средња апсолутна грешка
MBE	средња грешка пристрасности
m_i	i-та референтна вредност
n	укупан број података
NSE	Nash-Sutcliffe ефикасност
O	излаз – решење модела
O_0	вредност решења модела за сваки фактор који утиче на осетљивост
P	падавине (mm)
P _{best}	индивидуални фактор
Q_0	брзина отицања површинске и подземне воде ($\text{m}^3 \text{ dan}^{-1}$)
Q_i	брзина дотока површинске и подземне воде ($\text{m}^3 \text{ dan}^{-1}$)
Q_N	нето апсорбовано зрачење
R	коефицијент линеарне корелације
$r_{1,i}^k$	случајни број у интервалу [0,1]
R^2	коефицијент детерминације
R_a	екстратерестријална радијација ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$)
r_a	аеродинамички отпор (s m^{-1})
RH	средња дневна релативна влажност ваздуха (%)

$RH_{\max}$	максимална дневна релативна влажност ваздуха (%)
$RH_{\min}$	минимална дневна релативна влажност ваздуха (%)
RMSD	централна средња квадратна разлика
RMSE	корен средње квадратне грешке
R_n	нето зрачење ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$)
R_s	сунчево зрачење ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$)
r_s	површински отпор (s m^{-1})
S	запремина воде ускладиштене у систему (m^3)
SC	коефицијент осетљивости
S_c	стандардна девијација срачунатих података
SD	стандардна девијација
S_m	стандардна девијација референтних података
T	средња дневна температура ваздуха на 2 m висине ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{\max}$	максимална дневна температура ваздуха ($^{\circ}\text{C}$)
$T_{\min}$	минимална дневна температура ваздуха ($^{\circ}\text{C}$)
T_s	температура „омотача“ површине воде ($^{\circ}\text{C}$)
u	брзина ветра (m s^{-1})
U_2	брзина ветра на 2 m висине (m s^{-1})
U_{2l}	локална брзина ветра на 2 m висине (m s^{-1})
v	брзина честице
x	положај честице
X_i	i -та независна променљива (регресор)
X_{sr}	аритметичка средина
Y	зависна променљива

α	емпиријски коефицијент
β	Bowen-ов коефицијент
β_0	одсечак (слободан члан)
β_i	регресиони коефицијенти
γ	психометријска константа ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)
Δ	пад напона засићене водене паре ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)
ΔCV	промена климатске променљиве
ΔE_{ns}	промена у складиштењу енергије
ΔET_0	промена референтне евапотранспирације
ΔO_0	постепена промена решења модела
ΔV	разлика између променљивих
ε	резидуал (случајна грешка)
λ	латентна топлота испаравања (MJ kg^{-1})
λE	латентни топлотни флуks ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$)
ρ_a	средња густина ваздуха при константном притиску (kg m^{-3})
σ	стандардна девијација
ω	инерцијална тежина

Списак скраћеница

ASCE	Америчко друштво грађевинских инжењера (American Society of Civil Engineers)
AWS	аутоматска метеоролошка станица
CWS	конвенционална метеоролошка станица
EA	еволуциони алгоритам
ET	евапотранспирација
ET _a	стварна евапотранспирација
FAO	Организација за храну и пољопривреду (Food and Agriculture Organization)
FAO-24 Pan A-P	FAO – 24 Pan Allen and Pruitt модел
FAO-24 Pan O	FAO – 24 Pan Orang модел
GA	генетски алгоритам (genetic algorithm)
H-S	Hargreaves and Samani модел
MLR	multiple linear regression
PET	потенцијална евапотранспирација
P-M	FAO – 56 Penman-Monteith модел
P-Mt	FAO-56 Penman-Monteith температурни модел
PSO	оптимизација ројем честица (particle swarm optimization)
P-T	Priestley and Taylor модел
RHMZ	Републички хидрометеоролошки завод Србије
SNHT	Standard normal homogeneity тест
S-S	Stephens and Stewart модел
ZI	зелена инфраструктура

1 УВОД

Очување природних ресурса, посебно водних, представља једну од најкритичнијих брига савременог друштва. За разлику од већине других природних ресурса, вода бескрајно циркулише из хидросфере и копнене сфере до атмосфере и назад. Природни процес кружења воде обухвата три главна система, хидросферу – главни извор воде, атмосферу – испоручиоц воде и копнену сферу – корисник воде (Singh, 2017). Хидролошки циклус је збир улазних и излазних количина воде за одређену површину у току одређеног временског периода. Циклус се заснива на равнотежном стању процеса, везаних за воду, као што су падавине, испаравање, транспирација, инфилтрација, површинско отицање и складиштење, где се као основна покретачка снага циклуса (кружења воде) издваја енергија сунчевог зрачења (Oki and Kanae, 2006).

Испаравање са површине и транспирација биљака су процеси хидролошког циклуса који омогућују враћање воде у виду водене паре у атмосферу. Однос испаравања и транспирације није сталан, већ се константно мења у зависности од развоја усева (Allen et al., 1998). Када се биљка налази у почетној фази раста, при влажном земљишту, главни разлог губитка воде је испаравање, док је транспирација занемарљива. Растом и развојем биљке, већи део земљишта је покривен и самим тим мање изложен Сунцу, константно се смањује утицај испаравања, док се са друге стране повећава утицај транспирације, односно транспирација постаје доминантан процес при губитку воде.

Испаравање воде представља једну од главних фаза хидролошког циклуса, посебно је битна при управљању водним ресурсима, јер вода која уђе у ову фазу постаје недоступна и не може се више употребити (Brutsaert, 1982). То је процес губитка воде са влажне површине и њено претварање у гасовито стање у даљем кретању ка атмосфери. Главна компонента која утиче на процес претварања воде из течног стања у гасовито је сунчева енергија, односно количина енергије потребна за испаравање назива се латентна топлота испаравања, која опада са температуром површине испаравања (Shuttleworth, 1992; Dingman, 2015). Процес се заснива на томе да са апсорбовањем довољне количине топлоте, молекули воде добијају енергију којом напуштају површину испаравања и одлазе у ваздух као пара. Испаравањем, ваздух постаје zasiћен воденом паром и процес се константно успорава, тако да је у одређеном тренутку могућ и престанак испаравања. Сходно овој чињеници, битно је нагласити да латентна топлота није довољан фактор за одвијање испаравања, већ је за несметано испаравање неопходна и разлика у садржају

влаге између површине са које се врши испаравање и атмосфере (Allen et al., 1998). Разлика у садржају влаге, замена засићеног ваздуха сувим, постиже се кретањем ваздуха, односно зависи од брзине ветра.

Транспирација је битан процес у расту и развоју биљака, јер регулише размену воде између унутрашњости биљке и атмосфере. Она обухвата процес апсорпције воде из земље кроз корен биљке, процес даљег кретања воде кроз ткиво биљке и процес изласка воде, у виду водене паре, преко стома листова биљке у атмосферу. Кретање воде контролише биљка, отварањем (испарава вода са површине листа) и затварањем (спречава се губитак воде) стома (Dingman, 2015). Интензитет транспирације зависи од фактора животне средине (сунчево зрачење, температура, релативна влажност, брзина ветра, засићеност ваздуха воденом паром) и биљних фактора (број, величина и степен отворености стома, фаза развића биљке, развијеност кореновог система, количина воде у ћелијама листа). Од апсорбоване воде скоро сва вода се губи транспирацијом (око 99 %), док се мали део воде (око 1 %) користи за процес фотосинтезе (Forster, 2017).

Процеси евапорације и транспирације се одвијају истовремено, тешко их је раздвојити, и заједно се посматрају под термином евапотранспирација (ЕТ). Евапотранспирација је збир губитака воде проузрокованих испаравањем са површине тла и транспирацијом из листова биљака (Allen et al., 1998). Она представља главну компоненту енергије на земљи и водног биланса, односно помоћу ЕТ постиже се померање велике количине воде и енергије у облику латентног топлотног флукса са тла и вегетационих површина у атмосферу (Anderson et al., 2012; Niaghi et al., 2019). С обзиром да евапотранспирација обухвата енергетску интеракцију између хидросфере, атмосфере и биосфере, њена вредност није константна већ је променљива (услед променљивости климе, земљишта и вегетације) у простору и времену. Различити природни фактори директно утичу на процес ЕТ, као што су карактеристике воде, земљишта и биљака. Такође, на ЕТ утиче и више климатских параметара: сунчево зрачење, температура и влажност ваздуха, атмосферски притисак и ветар (Allen et al., 1998).

Евапотранспирација је неопходна у планирању и управљању водним ресурсима, а значајна је и код разумевања утицаја климатских промена на водне ресурсе и земљиште. Посебно се истиче њен значај у односу вода-земљиште-принос, па се с правом сматра за примарни фактор код дефинисања захтева за наводњавањем и

распореда наводњавања, јер се вода сматра једним од најважнијих ресурса у пољопривреди (Chartzoulakis and Bertaki, 2015).

Евапотранспирација је критичан процес који повезује циклусе енергије, воде и угљеника и препозната је као кључна варијабла за разумевање ефекта урбанизације на процесе на површини земље (Peng et al., 2015; Sun and Lockaby, 2012; Lin et al., 2012). Директан утицај урбанизације на ЕТ а самим тим и на урбани хидролошки циклус огледа се у промени инфилтрације воде, запремине атмосферских вода, вегетационог покривача и урбане микроклиме (Razali et al., 2018; Saadi et al., 2020). Такође, урбанизација утиче на промену влаге и површинске енергије што изазива појаву виших температура у урбаним срединама, тј. јавља се ефекат урбаног острва топлоте (Chen et al., 2022; Таћа, 1997). На урбану евапотранспирацију утичу повећана радијација, повишене температуре, вегетација и дефицит влаге. Будуће пројекција климатских промена показују да се може очекивати повећање ЕТ у зимском и пролећном периоду, када би и повећање температуре било веће (Pereira, 2011). Квантификовање урбане ЕТ је важно како би се затворио урбани водни биланс, односно да би се утврдило како урбани дизајн и управљање кишним водама утиче на водни биланс у урбаној средини, поштујући класична и нова (зелена) инфраструктурна решења (Fletcher et al., 2013).

1.1 Полазне хипотезе

Евапотранспирација је у великој мери проучавана у пољопривреди док се најчешће не узима у обзир при пројектовању објеката урбане зелене инфраструктуре (Ebrahimian et al., 2019). Из тог разлога неопходна је модификација постојећих методологија за прорачун евапотранспирације и њихово приближавање урбаним условима.

Ова дисертација истражује неколико хипотеза како би се развила применљива метода за одређивање евапотранспирације на основу података добијених за урбану средину:

- разликују се вредности ЕТ између урбане и референтне средине,
- климатски параметри немају исти утицај на ЕТ урбане и референтне средине,
- представљање ЕТ урбане средине није могуће применом података из климатских центара, захваљујући посебним микроклиматским условима у урбаној средини и

- узимајући у обзир микроклиматске услове посматране урбане средине могуће је побољшати тачност метода за прорачун ЕТ код урбане зелене површине.

1.2 Циљеви истраживања

Комплексност истраживања обухвата широки спектар анализа урбаних услова. Узимајући у обзир дефинисане хипотезе, постављени су циљеви истраживања у дисертацији:

Општи циљ овог истраживања је да се, користећи различите изворе података, квантификује евапотранспирација референтне културе за даље прорачуне у урбаном окружењу, узимајући у обзир локалне климатске услове.

Специфични циљеви су:

- обезбеђивање релевантних података потребних за естимацију ЕТ преко различитих приступа,
- успостављење система мерења стварне стопе евапорације у урбаним условима,
- анализа климатских параметара у урбаној средини,
- упоредна анализа међузависности климатских параметара у урбаним условима и у референтним условима,
- сагледавање начина за конвертовање испаравања воде у потребе за водом референтне културе,
- евалуација перформанси различитих метода за одређивање референтне евапотранспирације користећи климатске параметре у урбаним условима и поређење са референтном средином,
- тестирање зависности референтне евапотранспирације од климатских променљивих, са издвајањем променљивих са највећим утицајем,
- калибрација и валидација постојећих евапотранспирационих једначина према дефинисаним урбаним условима и развој нових једначина.

1.3 Процес планираног истраживања

Процес истраживања у дисертацији базиран је на анализи евапотранспирације урбаних средина. У овом делу представљен је кратак преглед дисертације, са посебним освртом на процесе истраживања по поглављима.

Дисертација садржи седам поглавља, којим су обухваћени сви дефинисани циљеви истраживања.

Прво поглавље дисертације односи се на пружање основних информација о анализираној области, односно пружа увод у предмет доктората. Саставни део овог поглавља представља приказ полазних хипотеза, као и дефинисање циљева дисертације. Такође, у оквиру првог поглавља детаљно је приказан процес планираног истраживања.

Преглед литературе разматран је у другом поглављу. Он је организован у неколико целина као што су: општи појмови и информације о концепту евапотранспирације и фактора који утичу на њу. Посебна пажња посвећена је утицају урбанизације на евапотранспирационе процесе. Осим тога, дат је и приказ метода које се користе за мерење и процену потреба за водом.

Треће поглавље пружа информације о експерименталним системима за прикупљање података неопходних при сагледавању потребних количина воде за биљке. Истраживања у урбаној средини су подељена у две групе. Прва група истраживања обухвата прикупљање основних климатских параметара помоћу аутоматске метеоролошке станице, као и података из референтних услова. Друга група односи се на прикупљање података о евапорацији применом испаритеља класе А.

Четврто поглавље пружа информације о методама за утврђивање потреба биљака за водом. Представљене методе за прорачун референтне евапотранспирације, груписане су у неколико група. Саставни део овог поглавља чини метод за издвајање најдоминантнијих параметара који утичу на ЕТ и примењене оптимизационе методе.

Анализа резултата истраживања представљена је у петом поглављу. Почетне анализе односе се на статистику прикупљених низова података као и на упоредну анализу параметара референтне и нереферентне средине. Посебан осврт анализе усмерен је ка примени и упоређивању више метода за одређивање потребних количина воде за биљке и на издвајање најдоминантнијих климатских параметара на прорачун

потребне количине воде. Анализа оптимизованих једначина саставни је део овог поглавља.

Развој нових једначина за процену потребе за водом биљака представљен је у шестом поглављу. Посебан осврт усмерен је ка једначинама са минималним бројем улазних података. Анализа резултата дефинисане методологије саставни је део шестог поглавља.

Финални закључци и смернице за будућа истраживања представљени су у седмом поглављу.

2 ПРЕГЛЕД ЛИТЕРАТУРЕ

2.1 Општи појмови

Ради јасноће у читању дисертације и разумевању резултата, дате су дефиниције (појашњења) појединих термина, који су јединствени и односе се на евапотранспирацију.

Испаравање или евапорација је збирни појам који подразумева све процесе у којима се вода претвара у водену пару и преноси у атмосферу. Брзину испаравања одређују три фактора: физичко стање околног ваздуха, нето расположива топлота и влажност површине која испарава (McMahon et al., 2013).

Транспирација је посебан случај испаравања који се дешава на површини влажних ћелија у биљним ткивима, где водена пара кроз стоме биљака одлази у атмосферу. Као резултат тога, биљке имају директну контролу процеса испаравања за разлику од испаравања са водених површина (Wootton et al., 1996).

Термин евапотранспирација први пут је споменут у радовима Лојда (Lloyd, 1938) и Торнтвајта (Thornthwaite and Holzman, 1940) и подразумева комбиновано испаравање са површине тла и транспирацију биљака односно транспорт воде са земље у атмосферу, супротним смером од падавина.

Торнтвајт је дефинисао потенцијалну евапотранспирацију (PET) као (Thornthwaite, 1948): „губитак воде, који ће се десити ако ни у једном тренутку не постоји недостатак воде у земљишту за потребе вегетације“. У истом периоду када и Торнтвајт, Пенман је препоручио термин потенцијалне транспирације, који је најчешће коришћен, као (Monteith, 1965): „губитак воде из кратке, зелене вегетације, која потпуно засењује тло и никада јој не недостаје вода“. Потенцијална евапотранспирација описује горњу границу ЕТ коју одређују метеоролошки услови за недефинисану вегетацију и представља количину воде која би се изгубила са површине у ЕТ уколико би земљиште имало неограничену количину воде на располагању (Dingman, 2015; Fetter, 2000). Интензитет PET директно зависи од карактеристика земљишта (тип, структура, сланост, плодност).

Термин референтна евапотранспирација развијен је 1970-тих година да би се разрешиле нејасноће са појмом потенцијалне евапотранспирације. Референтна евапотранспирација (ET_0) представља ону ЕТ која се одвија са оптимално влажне

површине земљишта, у потпуности покривене референтном вегетацијом. Референтна вегетација представља хипотетички референтни усев са претпостављеном висином од 0,12 m, фиксним површинским отпором од 70 s m^{-1} и албедом од 0,23. За референтни усев одабрана је трава која је добро проучена у погледу својих аеродинамичких и површинских карактеристика. Интензитет референтне евапотранспирације зависи искључиво од метеоролошких услова (Allen et al., 1998).

Стварна евапотранспирација (ET_a) је количина воде која је стварно уклоњена са површине услед испаравања и транспирације. Вредности ET_a су у функцији површинских, подземних и метеоролошких услова (Dolman, 2005). Однос потенцијалне и стварне евапотранспирације у великој мери зависи од доступности влаге у земљишту. ET_a је једнака PE_T када вода у земљишту није ограничена а уколико у тлу нема довољно влаге стварна евапотранспирација је мања од потенцијалне. Стварна евапотранспирација процењује се коришћењем ET_0 и коефицијента културе. Коефицијент културе обједињује четири фактора (аеродинамички отпор, албедо, површински отпор и испаравање тла) који разликују предметни усев од референтне траве.

2.2 Евапотранспирација - концепт

Евапотранспирација је процес одвајања воде у виду водене паре кроз ситне отворе – стоме на површини биљака и испаравања са површине биљака и земљишта. ET захтева енергију како би дошло до промене молекула воде из течно у гасовито стање. Испаравање, односно размена молекула воде између површине воде и ваздуха, настаје као разлика две брзине. То су брзина кондензације услед које се молекули крећу из ваздуха према површини а која је у функцији температуре и брзине испаравања. Брзина испаравања је одређена притиском паре услед чијег дејства молекули се крећу даље од површине (Shuttleworth, 1993). Количина енергије потребне за раздвајање молекула назива се латентна топлота испаравања воде и благо опада са повећањем температуре воде. Поред ове енергије, да би дошло до испаравања, мора постојати и процес уклањања водене паре са површине која испарава. Пренос воде са површине у атмосферу је функција дефицита притиска паре, односно разлике између количине влаге у ваздуху (стварног притиска паре) и количине влаге коју ваздух може да задржи (притисак паре засићења). Са смањењем дефицита притиска паре брзина испаравања се успорава и околни ваздух постаје засићенији.

Латентна топлота испаравања и уклањање водене паре довеле су до две групе метода за описивање испаравања, и то метода трансфера влаге или аеродинамичка метода и испаравање у билансу топлотне енергије. Поред ових метода увек се разматра и метода биланса воде (Brutsaert, 2005).

2.2.1 Метод трансфера влаге (аеродинамички метод)

Метод трансфера влаге (метода преноса масе) заснива се на градијенту притиска паре са површине воде на ваздух и на транспорт паре ветром. Уобичајени облик формулације дат је у једначини:

$$E = k_m u (e_s - e_a) \quad (2.1)$$

где је E испаравање (mm dan^{-1}), k_m је термин који ограничава пренос масе, u је брзина ветра (m s^{-1}), e_s је притисак zasiћене паре (kPa), а e_a је стварни притисак zasiћене паре (kPa), однос $(e_s - e_a)$ је мера способности ваздуха да прихвати нове молекуле воде.

Основна једначина преноса масе захтева мерење температуре површинске воде, температуре ваздуха, влажности или притиска паре и брзине ветра (Jensen, 2016). Утврђено је да када су дефицит притиска паре и брзина ветра велики, метода преноса масе прецењује вредности испаравања. Код нижег дефицита притиска паре, метода потцењује процене испаравања. Овај метод пружа најдиректнији опис механизма транспорта водене паре, тако да кад год је могуће, треба да има приоритет у описивању испаравања (Brutsaert, 2005).

2.2.2 Испаравање у билансу топлотне енергије

Испаравање у билансу топлотне енергије (метода енергетског биланса) узима у обзир прилив енергије (En_{in}), одлив енергије (En_{out}) и промену у складиштењу енергије (ΔEn_s), али не укључује доступну влагу и механизам преноса масе. Поједностављену форму методе енергетског биланса приказује једначина (Abtew and Melesse, 2013):

$$En_{in} - En_{out} = \Delta En_s \pm e \quad (2.2)$$

где e представља грешку.

Ослобађање енергије кроз кондензацију и падавине је највећи појединачни извор топлоте за атмосферу а испаравање као и латентни топлотни ток игра кључну улогу у

управљању климом. Већина метода биланса енергије захтева одређивање нето зрачења односно нето расположиву количину енергије за испаравање.

Једначина енергетског биланса за једноставан повезан систем гласи:

$$H + \lambda E = R_n - G \quad (2.3)$$

где је R_n нето зрачење ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$), λ је латентна топлота испаравања (MJ kg^{-1}), λE је латентни топлотни флуks ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$), H осетна топлота ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$) и G топлотни флуks земљишта ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$).

2.2.3 Метод биланса воде

Једначина биланса воде, која изражава очување масе у просечном хидролошком систему, може се написати на следећи начин:

$$(P - E)A + Q_i - Q_o = dS / dt \quad (2.4)$$

где су P падавине (mm), A површина (m^2), Q_i брзина дотока површинске и подземне воде ($\text{m}^3 \text{ dan}^{-1}$), Q_o брзина отицања површинске и подземне воде ($\text{m}^3 \text{ dan}^{-1}$) док је S запремина воде ускладиштене у систему (m^3).

Сматра се да ове методе генерално нису практичне због неизбежног присуства грешака при мерењу које могу да компромитују крајњи резултат. Ово објашњава зашто је обично потребно одредити испаравање, независно од водног биланса, на основу метеоролошких података (Brutsaert, 1982).

2.2.4 Фактори утицаја на евапотранспирацију

Евапотранспирацију чине евапорација и транспирација, два различита процеса који се третирају заједно јер фактори који покрећу и контролишу ова два процеса су слични, односно доминантни су метеоролошки фактори. Реч је о четири променљиве: сунчево зрачење, температура ваздуха, влажност ваздуха и брзина ветра. Поред ових климатских параметара на ЕТ утичу и други фактори као што су доступност воде, стабилност атмосфере, карактеристике усева, салинитет земљишта, аспекти животне средине и сл. (Allen et al., 1998). Када је у питању ET_0 утицајни су једино климатски фактори, тј. фактори тла не утичу на ET_0 . Наиме, из дефиниције ET_0 следи да је реч о

референтној површини где су усеви здрави, добро оплођени и активно расту под добро заливеним условима, тако да су од утицаја једино климатски фактори.

Енергија потребна за испаравање воде обезбеђује се сунчевим зрачењем и температуром ваздуха. Такође, битни су и релативна влажност ваздуха и брзина ветра који обезбеђују уклањање воде са површине која испарава. Са порастом температуре, сунчевог зрачења и брзине ветра расте и ЕТ док са порастом релативне влажности ЕТ опада. Код биљака транспирацију контролишу заштитне ћелије (ћелије затварачнице) и главни фактори који контролишу њихов рад су светлост, влажност и садржај воде у ћелијама листа. Ови фактори заправо имају исто порекло као они који управљају евапорацијом (Dingman, 2015). Такође, стопе транспирације варирају у зависности од типа биљке, фазе раста, сезоне и животне средине.

Сунчево зрачење је највећи извор енергије која је потребна за ЕТ јер обезбеђује латентну топлоту, потребну за претварање воде у водену пару. Количина зрачења која доспе до површине која испарава зависи од низа фактора као што су присуство облака, надморска висина, околина и слично.

Релативна влажност која представља количину водене паре у ваздуху у односу на максималну количину паре коју би ваздух могао да прими, је у обрнутом односу са температуром. Градијент влажности, као разлика између притиска паре на површини која испарава и у ваздуху који непосредно окружује површину која испарава, одређује могућност за ЕТ. Када је влажан ваздух, релативна влажност је висока а градијент је низак па је мали потенцијал за складиштење нове воде у атмосфери, односно нижа је ЕТ (Sentelhas, 2010). Кретање ваздуха под дејством ветра изазива транспорт влажног ваздуха са површине која испарава, мења аеродинамички и површински отпор вегетације и самим тим ствара потенцијал за замену са сувљим ваздухом, што изазива повећање стопе ЕТ (Allen et al., 1998).

2.3 Утицај урбанизације на евапотранспирацију

2.3.1 Урбанизација и хидролошки циклус

Урбани развој довео је до промена у клими урбаних подручја које се огледају у повећању температуре, повећању или смањењу падавина, смањењу брзине ветра и смањењу краткоталасне радијације (Ren, 2015; Ren et al. 2021; Zhang et al., 2022). Битна

одлика урбане средине је одсуство велике површине влажне вегетације и тла што усмерава нето радијацију на претежно осетне топлотне токове, а не на латентне токове. Наиме, у руралним областима, влажна вегетација и земљишни покривач омогућују значајном проценту тока топлотне енергије да иде ка латентној топлоти испаравања и тиме повећава атмосферску водену пару, хладећи околни ваздух (Endreny, 2006).

Велике површине природног високопропусног тла замењене су нископропусним вештачким површинама, које су промениле циклус површинске воде као и енергетски биланс и изазвале ефекат урбаног топлотног острва због већег топлотног капацитета од вегетације и тенденције да се топлота поново емитује у окружење (Stone and Rodgers, 2001). Урбане структуре апсорбују велику количину топлотне енергије током дана и полако емитују ускладиштену топлоту током поднева и ноћу. Поред урбаних острва топлоте јавља се и повећање потрошње енергије, загађење ваздуха и поремећај еко система.

Урбанизација, у хидролошком смислу, подразумева процес у коме се природни пејзажи као што су шуме и земљишта претварају у градска подручја која се састоје од значајног дела поплочаних и непропусних површина. Непропусне површине (кровови, путеви, паркиралишта и сл.) а такође и топографске промене (нивелација терена, уклањање вегетације, збијање тла приликом изградње објеката) доводе до измене природног система што утиче на све компоненте природног хидролошког циклуса (Whitford et al., 2001). Измењена површина показује промену величине вегетативног покривача односно промену механизма који враћа воду у атмосферу. Хидролошки циклус урбане средине у највећој мери се мења у току изградње објеката када се мења земљиште и изграђује инфраструктура за одводњавање. У урбаној средини мењају се релативни односи воде која се инфилтрира у тло, испарава, одлази у подземне воде или се преноси као површински ток, односно у крајњем, вода из падавина, непропусним површинама, у највећој мери постаје површинско отицање (Shaw et al., 2011). У руралној средини природне површине дозвољавају падавинама да продру у тло, где се део воде складишти и постепено се инфилтрира у подземне воде. Урбанизација доводи до модификације земљишта, које самим тим мења водне и енергетске билансе. Покривање површине земљишта углавном непропусним материјалима, као резултат антропогених интервенција, има за последицу повећане стопе и запремину површинског отицаја, смањења инфилтрације и промену времена протока кишних вода и њиховог складиштења. Ове промене услед уклањања вегетације утичу на смањење

евапотранспирације и перколације а повећавају површинско отицање, односно пикове и запремине кишних вода које могу да изазову градске поплаве (Ouedraogo et al., 2022).

2.3.1.1 Зелена инфраструктура

Зелена инфраструктура (ZI) представља нов начин побољшања услова животне средине у градовима, односно ублажавања загађења из урбаних извора и обнављање природног циклуса воде. ZI пружа атрактивне и правовремене одговоре за све урбанију популацију односно на ублажавање негативних последица које урбанизација доноси. Присутне су и друге повољности ZI – унапређење квалитета кишне воде, омогућавање инфилтрације, унапређење здравља људи, ублажавање утицаја урбаног острва топлоте, побољшање квалитета ваздуха (Tu et al., 2020).

Термин зелена инфраструктура се јавља 1990-их година и у почетку је представљао мрежу зелених површина које спајају издвојена урбана подручја. У даљем развоју термин ZI обухвата и објекте који нису засновани на вегетацији као што су пропусни тротоари и разни системи за прикупљање кишнице. Такође, у ZI спадају и природне мере задржавања воде, односно урбани зелени простори, нпр. урбани травњаци, шуме, пољопривредна земљишта, паркови и кишне баште (Feng, 2018).

Постоје многе дефиниције ZI које су дате у зависности од циља истраживања. (Lin et al., 2012). Европска комисија дефинише зелену инфраструктуру као стратешки планирану мрежу природних и полуприродних подручја са осталим еколошким карактеристикама, која је осмишљена и којом се управља тако да може да пружи широк спектар екосистемских услуга (ЕС, 2013).

Зелена инфраструктура се јавља као стратегија ублажавања утицаја урбанизације, фокусирајући се на вегетацију на терену (паркови) и на зградама (зелени кровови). Вегетација је круцијална компонента циклуса воде која покреће токове воде преко система тло-биљка-атмосфера и реагује на промену доступности воде путем биохемијских процеса (Damm et al., 2018). ZI обухвата развој и планирање мрежа повезаних мултифункционалних зелених површина које доприносе заштити природних станишта и биодиверзитета, пружајући одговор на климатске промене и друге промене биосфере, омогућавајући виши ниво одрживости и здравији начин живота.

Услед процеса брзе урбанизације урбани пејзаж је често фрагментисан односно састављен од више изолованих целина. ZI се јавља као веза између раздвојених целина,

што је важно посебно за биолошку разноврсност (Meerow and Newell, 2017). Посебна карактеристика ZI је њена мултифункционалност што је квалификује као алтернативу традиционалној сивој инфраструктури кишних вода и као стратегију која становницима градова пружа вишеструке користи екосистема.

Зелена инфраструктура је ресурс локалног развоја и значајан елемент функционисања простора који се сагледава као скуп различитих природних и полуприродних подручја повезаних у један функционални еколошки систем. Суштина у примени ZI је да се користе предности природних процеса као што је инфилтрација кишних вода, обезбеђивање сенчења и апсорпција топлоте, чиме се реагује на еколошке поремећаје услед климатских промена.

Урбана ZI хлади изграђено окружење углавном кроз два механизма, кроз евапотранспирацију и сенчење. Путем ЕТ, вегетација редистрибуира доступну сунчеву енергију која пада на површину копна за латентну топлоту испаравања и смањује осетни топлотни флуks. При планирању и пројектовању ZI система, ЕТ се није узимала у обзир услед сложене интеракције земљишта, биљака и климе која отежава њену квантификацију. Да би се побољшала функционалност и ефикасност вегетације за смањење запремине отицања, методе пројектовања треба да разматрају ЕТ и процесе инфилтрације истовремено (Ebrahimian et al., 2019).

2.3.1.2 Евапотранспирација у урбаном окружењу

Познавање вредности евапотранспирације је неопходно због значајног броја урбаних хидролошких питања, посебно везаних за: водоснабдевање, квалитет воде, допуну подземних вода и отицање поплава. Урбана ЕТ је кључни процес екосистема који повезује водни биланс, енергетски биланс и циклус угљеника, што га чини изузетно важним за управљања водама, за ублажавање последица климатских промена и смањење CO₂ у атмосфери. Овај процес укључује испаравање тла, транспирацију вегетације, испаравање са непропусних површина и испаравање са слободних водних површина, па представља кључну компоненту у урбаном циклусу воде. То је природни процес који може да ублажи негативне ефекте проузроковане урбанизацијом и глобалним загревањем (Qiu et al., 2023).

Управљање екосистемима захтева тачне вредности урбане евапотранспирације јер се градови разликују по клими и вегетационом покривачу. Градски центри са

високим зградама (непропусним површинама) имају ниже стопе ЕТ него подручја са ниским зградама и високим вегетационим покривачем. (Grimmond and Oke, 1995; Grimmond, 2006). Одређивање тачне вредности ЕТ у урбаној средини добија на значају када се зна да је већ у 2014. години живело више од половине (54,6 %) светске популације у урбаним насељима и да се процењује да ће се тај удео у наредним годинама повећати (DESA, 2010; 2015).

Упркос присуству вештачких непропусних површина као што су тротоари и зграде, ЕТ је значајна компонента биланса за воду у урбаним срединама, посебно узевши чињеницу да у многим урбаним подручјима дрвеће и друге површине са вегетацијом покривају значајну површину. ЕТ може имати кључну улогу у доношењу одлука у вези са смањењем отицаја кишних вода, као и коришћењем водних ресурса и ублажавањем урбаних топлотних острва путем хлађења испаравањем. У многим случајевима урбана ЕТ премашује количину падавина и одржава се спољашњим коришћењем воде из градског водовода (Grimmond and Oke, 1999; Grimmond et al., 2010).

Битна карактеристика урбане ЕТ је да се њеном количином може управљати, самим тим ЕТ постаје ефикасна мера за управљање водним ресурсима и представља важну компоненту градског водног биланса. Могуће је постићи регулацију вредности ЕТ низом мера, тј. избором вегетације (врста, покривеност), развојем технологије ЗИ и применом принципа развоја града сунђера. Принципи изградње сунђер града обухватају ресурсе урбане воде, еколошко управљање водама, зелену инфраструктуру и урбане пропусне тротоаре (Nguyen et al., 2019). Ови принципи утичу на повећање ЕТ односно на побољшање инфилтрације и омогућавање поновне допуне тла водом, смањење пика и запремине површинског отицаја.

Вегетација, од које дрвеће има највећу вредност ЕТ, може да ублажи климу и хлади околни простор комбинованим ефектом сенчења који снижава температуру ваздуха и вредности ЕТ, односно захтева значајну количину топлоте која се узима из околине (Zhao and Fong, 2017). Вредност ЕТ исте врсте дрвећа значајно варира у зависности од урбаног окружења јер микрометеоролошки услови могу бити значајно различити на малој удаљености због хетерогености простора (Rahman et al., 2017). Мању ЕТ од дрвећа имају травњаци и пејзажне биљке. Примена технологија ЗИ, за процес ЕТ, има значаја у томе да после падавина омогућују инфилтрацију а такође и смањују површинско отицање. Процеси евапотранспирације и инфилтрације су међусобно повезани јер ЕТ зависи од доступности влаге у земљишту (Berggren et al., 2013). Након

падавина евапотранспирација може смањити влагу у земљишту и тиме обезбедити простор за евентуалне нове падавине.

Урбана евапотранспирација је важна компонента урбаног енергетског биланса. У урбаној средини зграде, путеви, вегетација стварају своју микроклиму. Како се ове структуре понављају долази до стварања већих јединица као што су урбани кањони који формирају сопствене климатске карактеристике. Наиме, урбани енергетски биланс, који се заснива на одржању енергије, од улаза има нето зрачење и антропогени флуks а са друге стране су латентни и осетни флуks и складиштење топлоте (Grimmond and Oke, 1999). Урбана ЕТ врши одузимање топлоте из градова и утиче на латентну топлоту у енергетском билансу. ЕТ повезује кретање воде кроз урбани пејзаж са локалном климом што је процес који користи енергију, која би допринела повишеној температури ваздуха. Како је вегетација просторно распоређена унутар урбаних кањона ЕТ ствара хладна места у урбаном екосистему. Практично, ова пасивна контрола локалне климе има директан утицај на урбани енергетски биланс (Cleugh et al., 2005).

Урбана ЕТ доприноси смањењу нето емисије гасова стаклене баште, на два начина: директно, где у процесу транспирације биљка узима CO_2 током фотосинтезе који може ући у биљку само када је растворен у води и индиректно, где смањена потрошња енергије смањује гасове стаклене баште који се троше при сагоревању фосилних горива за производњу електричне енергије.

Не постоји општа сагласност о утицају урбанизације на вредност ЕТ, што је и разумљиво с обзиром на хетерогеност урбане средине. Неколико студија сматра да урбана експанзија доводи до смањења ЕТ и слабљења брзине ветра, што за последицу има повећање ефеката урбаног топлотног острва (Carlson and Arthur, 2000). С друге стране, постоје студије које закључују да урбанизација, ширењем непропусних површина, значајно побољшава ЕТ градског земљишта (Cong et al., 2017; Liu et al., 2022).

С обзиром на значај ЕТ у урбаном водном билансу, важно је развити методе за што тачнију процену евапотранспирације у урбаном контексту.

2.3.1.3 Евапотранспирација као компонента наводњавања

Циљ одрживог и ефикасног управљања наводњавањем је да се усевима обезбеди довољна количина воде како би се на време надокнадила исцрпљена вода из земљишта, односно да би се избегао физиолошки стрес воде код биљака. За пољопривредне

културе, у циљу постизања оптималног приноса, наводњавање и падавине треба да замене укупну воду изгубљену евапотранспирацијом (Alexandris et al., 2008; Трајковић, 2009).

Урбани пејзажни вегетациони системи имају низ специфичности у погледу потребе за наводњавањем. За пејзажне биљке принос није приоритет, већ циљ наводњавања је постизање раста, доброг изгледа, здравља и на крају опстанак биљака. Присутна је разноликост у врстама биљака укључујући дрвеће, жбуње и травњаке које имају своје посебне захтеве за водом због различитих висина, микроклиме, карактеристике земљишта и просторне и временске варијабилности.

Предности зелене вегетације су неспорне али за њихово одржавање потребно је да се узме у обзир и очување природних ресурса и посебно, већа ефикасност у одрживости воде, тј. у њеном коришћењу. Овај аспект је посебно значајан у случај несташица воде где се захтеви за наводњавањем вегетације сукобљавају са другим потребама за водом.

Последњих деценија честа је примена нових метода наводњавања, тзв. метода дефицита наводњавања помоћу којих се биљке наводњавају мањом количином воде. У те методе спадају регулисани дефицит наводњавања и делимично сушење корена. Регулисани дефицит наводњавања је техника наводњавања где се наводњава коренов систем биљака мањом количином воде у односу на могућу евапотранспирацију. На тај начин се биљке излажу умереном водном стресу, али тако да се не умањи значајно принос. Ова пракса се примењује код наводњавања у пољопривреди а доказано је да се може применити и код наводњавања урбане вегетације (Sachs et al., 1975).

Повећање ефикасности урбаног наводњавања поред дефицитарног наводњавања, може се постићи и применом алтернативних водних ресурса, као што су кишна вода и рециклирана отпадна вода. Наравно, за примену било којег приступа потребно је претходно одредити процену потреба биљака за водом, односно што прецизније проценити ЕТ урбане вегетације.

Наводњавање травњака обухвата константна и интензивна испитивања услед сталног повећања броја становника и смањења доступности воде, посебно у урбаним срединама. Посебно забрињава чињеница да су многи травњаци уништени не због тога што нису довољно наводњавани већ због превеликог наводњавања (Бошњак 2003).

Прецизно одређивање ЕТ омогућује спровођење рационалног заливног режима, који обезбеђује биљкама потребне количине воде где нема превлаживања и нерационалног трошења воде. Више аутора дало је примере наводњавања урбане вегетације које је резултирало значајном уштедом воде (White et al., 2004; Haley et al., 2007). Коришћење ЕТ модификоване са коефицијентом пејзажа и величином пејзажа дало је реалну количину воде и пружио могућност уштеде воде. Такође, употреба аутоматског система за наводњавање са контролерима, покретаним сензорима влаге у тлу, дало је значајне уштеде. Значајна уштеда воде може се постићи и инсталирањем локалне метеоролошке станице која ће обезбедити поуздане податке за прецизно одређивање ЕТ, што ће омогућити побољшану процену потражње за водом.

2.4 Методе мерења евапотранспирације

Постоји велики избор метода којима се може квантификовати ЕТ, при чему свака од метода има своје мане и предности (тачност, временска скала, цена). Методе мерења ЕТ у урбаном окружењу могу се поделити на праћење биланса масе, метеоролошко осматрање и биолошку дијагностику, при чему се прве методе најчешће усвајају због једноставности и исплативости (Feng, 2018; Rana and Katerji, 2000). Метода са тежинским лизиметром се широко користи код зелене инфраструктуре, на пример код одређивања ЕТ зелених кровова (Wadzuk et al., 2013). Eddy коваријанса спада у групу метода са микрометеоролошким приступом и сматра се најтачнијом методом за мерење ЕТ. Мерење транспирације биљака заснива се на биолошкој дијагностици биљака и у овој групи посебно се издвајају метода протока сока и метода изотопа.

2.4.1 Евапорационе методе

Последњих деценија развијен је велики број метода за индиректну процену ЕТ. Међутим, директно мерење испаравања је потребно да би се развиле и потврдиле методе и једначине за прорачун пан испаравања на основу метеоролошких података који су релативно лако доступни. У директне технике мерења спада и мерење испаравања преко испаритеља. Испаритељ је једноставан инструмент који се користи за процену потенцијалног испаравања. Корелација између потенцијалне евапотранспирације и евапорације са слободне водене површине омогућила је индиректан обрачун евапотранспирације на основу измерене евапорације. Битно је нагласити да се сматра да

је ова метода мерења много поузданија од емпиријских формула заснованих на метеоролошким факторима, за процену ЕТ, односно боље и једноставније је мерити евапорацију преко које се сагледава ЕТ уз помоћ корекционог коефицијента (Бошњак 1982).

Посуде (пан) за испаравање – испаритељи или евапориметри користе се више од двеста година и пружају једну од најједноставнијих, најјефтинијих и најчешће коришћених метода за процену губитака воде испаравањем из језера и резервоара (Irmak and Haman, 2003).

Евапориметри обезбеђују мерење интегрисаног ефекта нето радијације, ветра, температуре и влаге на испаравање са отворене водене површине (Allen et al., 1998): имају разумно проширену површину, занемарљиво складиштење топлоте и нема енергије од дотока воде осим оне услед кише. Сам процес мерења испаравања користи физички модел заснован на билансима масе и енергије где се промене испаравања у посуди приписују променама радијације, температуре, влажности и брзине ветра. (Roderick et al., 2007)

Међу различитим типовима пан евапориметара истичу се три типа и то суд класе А, руски пан GGI-3000 и руски резервоар од 20 m². Сваки од њих је једноставна велика кружна посуда напуњена водом а испаравање се мери одређивањем разлике у површини воде унутар суда. Штавише, препоручено је усвајање руског резервоара од 20 m² као међународног референтног евапориметра (WMO-No.8, 2006).

Брзине испаравања зависе од доступности воде, енергије и градијента притиска паре, где сви зависе од метеоролошких варијабли као што су температура ваздуха и тла, сунчево зрачење, брзина ветра и атмосферски притисак (Xu and Singh, 1998). Поред мерења нивоа воде у испаритељу, неопходно је мерити и количину падавина. За прорачун испаравања на основу метеоролошких елемената и проучавања релације између измерених и израчунатих вредности потребно је на истом месту мерити температуру и влажност ваздуха, брзину ветра, зрачење и температуру површинског слоја воде у испаритељу.

Испаритељ класе А је веома једноставна конструкција али није тако једноставан за инсталацију и рад. Веома је битно место на коме се посуда налази. Потреба за добро обученом особом за подешавање, одржавање и посматрање овог инструмента чини њен редован рад релативно скупим. Овај испаритељ има недостатак јер су странице изложене

сунцу, што доводи до тога да достиже вишу температуру (и последично повећано испаравање) од испаритеља постављених у земљу.

2.4.2 Метода лизиметара

Метода лизиметра је дуги низ година била једна од најтачнијих метода за мерење ЕТ, при чему се посебно издваја тип тежинског лизиметара. Тежински лизиметар мери стварну евапотранспирацију мерењем промене тежине вегетације и земљишта у контејнеру. То је затворена запремина земљишта засађена вегетацијом са постројењем за мерење прилива и одлива воде. Промена тежине лизиметра указује на количину воде која је изгубљена испаравањем и транспирацијом. Лизиметар мора да је окружен истим усевом који расте у лизиметру да би се обезбедила једнодимензионалност при мерењу (Allen and Pruitt, 1991). Може се користити за мерење ЕТ малих биљака и усева, биоретензија, зелених кровова и кишних башти. Важан недостатак лизиметара је тај што су генерално неприкладни за мешовиту вегетацију. Иако су генерално тачни, захтевају значајна финансијска улагања, одржавање и дуг период проучавања.

Пошто се лизиметром бележе само очитавања масе, ова техника захтева додатна осматрања како би се разликовале промене тежине изазване ЕТ од промена услед кишних вода, одводњавања и перколације. Ова метода представља тачкасто мерење и екстраполација на већу површину може бити упитна, посебно за хетерогену вегетацију у урбаним условима.

2.4.3 Метода Bowen-овог односа и равнотеже енергије

Метод Bowen-овог односа је аутоматизована индиректна метода одређивања ЕТ. Овом методом мери се биланс енергије латентног топлотног флукса површине, покривене усевом који активно расте (Nouri et al., 2013). Bowen-ов однос (Bowen, 1926) преуређује једначину енергетског биланса тако што дефинише однос осетне топлоте и испаравања:

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \gamma \frac{T_s - T}{e_s - e_a} \quad (2.5)$$

где је T температура ваздуха на референтној висини ($^{\circ}\text{C}$), γ психометријска константа ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$), T_s је температура „омотача“ површине воде ($^{\circ}\text{C}$).

Bowen-ов коефицијент (β) може се користити за процену ЕТ уз прецизно мерење температуре ваздуха и стварног притиска паре на две референтне висине:

$$\lambda E = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (2.6)$$

Овај приступ се највише користи у истраживањима и вероватно је приступ који захтева највише података за процену испаравања, тј. да би се користио овај однос, потребни су: сензор атмосферске влажности и сензор температуре, мрежни радиометар и процена топлотног флуksа земљишта.

Потребни улазни подаци укључују температуру и влажност ваздуха, на две различите висине, нето зрачење и топлотни флуks тла. Тачност одређивања ЕТ зависи од тачног мерења нето радијације и топлотног флуksа тла (Allen et al., 2011a). Овај метод је углавном погодан за отворене и равномерне подлоге са малом брзином ветра и релативно високом влажношћу, као на пример код мерења урбане ЕТ отворених травњака (Qiu et al., 2017).

2.4.4 Метода Eddy коваријансе

Метода Eddy коваријансе је једна од најуспешнијих техника за одређивање размене воде, енергије и гасова између копнене површине и атмосфере (Allen et al., 2011a). Метод квантификује размену флуksа између површине и атмосфере. Eddy коваријанса мери осетну и латентну топлоту из коваријансе топлоте и влаге заједно са вертикалном брзином уз помоћ сензора (Wang and Dickinson, 2012).

Eddy (вртложна) циркулација подиже влажан ваздух из близине копнене површине и замењује га сувљим ваздухом са више тачке, што резултира нето кретањем влаге нагоре, пропорционално разлици у концентрацији паре између горње и доње ваздушне масе. Токови водене паре латентне и осетне топлоте су пропорционални разликама у притиску паре и температуре.

Опрема за мерење eddy коваријансе састоји се од тродимензионалног сензора ветра за добијање вертикалних компоненти ветра и брзине звука, и инфрацрвеног гасног анализатора за добијање података о густини водене паре и концентрацији CO₂. Сва мерења се морају вршити на скоро истој тачки да би се измериле карактеристике истог вртлога (Allen et al., 2011b). Ова метода је скупа, јер захтева квалификовано и добро обучено особље, скупу опрему а потребан је и торањ адекватне висине, јер висока урбана

хетерогеност и коваријанса захтевају прецизно мерење на различитим нивоима изнад површине. Овај метод сматра се најтачнијим методом за *in situ* мерење ET_a на скали од 0,1 до 1 km (Rana and Katerji, 2000).

2.4.5 Метода сцинтилометара

Сцинтилометрија је нова техника за индиректну процену интегрисане ЕТ на великим површинама кроз процену осетне топлоте и расположиве енергије. Техника се ослања на мерење преноса и расејања електромагнетног зрачења кроз турбулентну атмосферу. Сцинтилометар је оптички уређај који мери флукутације у преламању ваздуха изазване температуром и влажношћу и варијације изазване притиском (Allen et al., 2011b) Сцинтилометарски системи се састоје од оптичког или радио предајника, пријемника, регистратора података и јединице за обраду сигнала.

Метод је веома погодан за дуготрајна мерења због тога што је систем прилично неосетљив на услове околине као што су киша, снег и прашина. Посебна погодност ових система је да захтевају мала одржавања. Када се систем примењује у урбаним и сложеним срединама постоје практична и теоријска ограничења која се морају узети у обзир да би се добили поуздани подаци. Урбана и сложена окружења са својим утицајима као што су адвекција, циркулације, дренажни токови искривљују флукс ваздуха и могу утицати на резултате мерења (Ward, 2017).

2.4.6 Мерење транспирације

Раније је наглашено да се евапотранспирација састоји од два процеса евапорације и транспирације и да је њих тешко раздвојити и независно посматрати (Allen et al., 1998). Међутим, унутар екосистема функције испаравања и транспирације су различите. Транспирација везује се за раст и продуктивност биљака а испаравање не доприноси директно производњи, тако да када се говори о продуктивности воде, транспирација се сматра пожељном док је испаравање непожељна компонента (Agam et al., 2012).

Боље разумевање компоненти ЕТ, односно односа транспирације и ЕТ може помоћи у истарживању ефикаснијег наводњавања и продуктивнијем коришћењу воде. На климатске промене транспирација утиче на вишеструке и супротне начине. На пример, вегетација са транспирацијом утиче на климатске промене повећаним уносом

CO₂, хлађењем и влажењем атмосфере. С друге стране вегетација изазива губитак воде у земљишту, смањује алbedo чиме доприноси повећању површинске температуре.

2.4.6.1 Метода протока сока

Метода протока сока примењује се за мерење транспирације појединачних стабала. Код ове методе одређује се брзина протока сока у ксилему као резултат кретања топлотног пулса или конвекције топлотне енергије у стабљикама (Allen et al., 2011b). Генерално методе протока сока се могу категорисати као методе топлотног биланса, топлотног импулса и методе константног грејања. Код метода топлотног биланса стабљика се загрева електричним путем и количина топлоте коју узима покретна струја сока користи се за израчунавање масеног протока сока у стабљници. Код метода топлотних импулса масени проток сока одређује се из брзине топлотних импулса који се крећу дуж стабљике (Wang and Dickinson, 2012).

Услед разноликости стабала у врсти, старости, величини и окружењу које је присутно у урбанизованој средини, тешко је користити резултате ове методе, без обзира што је могуће уз помоћ индекса површине листова резултате повећати на ниву површине (Rana and Katerji, 2000). Метод је погодан за мерење протока сока код појединачних биљака али је генерално неприкладан за мешовите услове вегетације (Nouri et al., 2013).

2.4.6.2 Метода изотопа

Метода изотопа, партиционисање ЕТ, односно одређивање односа транспирације са ЕТ, заснива се на принципу да је изотопски састав воде у биљци исти као код воде из оближњег земљишта, коју биљка користи. Код ове методе присутне су бројне претпоставке углавном везане за хомогеност изотопског састава у води (Wang and Dickinson, 2012). Изотопски састави испаравања и транспирације изразито су различити и партиционисање ЕТ заснива се на разлици близу површине у стабилном изотопском саставу водене паре (Kool et al., 2014).

Прецизно партиционисање ЕТ, односно односа транспирације и ЕТ захтева тачну процену појених компоненти. Транспирациона фракција битна је за анализу односа вегетације и климе, тј. за валидацију хидролошких предвиђања. Такође, однос транспирације и ЕТ је од великог значаја код управљања водним ресурсима, планирања, пројектовања и режима рада система за наводњавање (Allen et al., 1998).

2.5 Једначине за процену евапотранспирације

За процену евапотранспирације постоје многи модели засновани на разним метеоролошким варијаблама. Модели се разликују у зависности од сложености и захтева за потребним подацима, специфични су за сваку локацију понаособ и нису универзално применљиви. Процене су да их има више од 50 (Grismer et al., 2002), али ови модели често дају недоследне вредности при процени ET_0 , јер су развијени за специфичне климатске регионе и као такви захтевају калибрацију (Trajkovic, 2007; Jensen et al., 2016). Непоштовање оригиналног временског корака код примене емпиријске једначине можда представља разлог за ограничење у примени ових једначина. У зависности од података које користе и прорачуна, једначине се могу категорисати као температурне методе, радијационе методе, методе преноса влаге – масе (аеродинамичке методе) и комбиноване методе.

Савремене методе за процену ЕТ које користе податке о мерењу температуре ваздуха, влажности, ветра и сунчевог зрачења заснивају се на Penman-овој једначини (Penman, 1948). У кратким цртама дат је преглед развоја једначине коју је развио Хауард Пенман комбинујући енергетски биланс и аеродинамички приступ користећи концепт Bowen-овог односа. Његова једначина комбинује енергију потребну за одржавање испаравања и механизам дифузије којим се енергија уклања са површине као водена пара па је стога ова једначина груписана у комбиноване методе. Касније је Џон Монтејт преформулисао Penman-ову једначину комбинујући једначину са аеродинамичком транспортном компонентом.

2.5.1 Penman и Penman-Monteith једначина

Penman (1948) је први извео једначину која комбинује енергију потребну за одржавање испаравања и емпиријски опис дифузије којим се водена пара уклања са површине. Ова једначина пружа основу за све друге комбиноване методе процене ЕТ. Једначина је развијена 1948. године и комбинује функције равнотеже енергије и преноса масе а притом не захтева податке о површинској температури воде:

$$E_h = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Q_N + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad (2.7)$$

где је E_h флуks латентне топлоте услед испаравања, Δ пад напона засићене водене паре, Q_N нето апсорбовано зрачење и E_a снага сушења ваздуха.

Ову комбиновану једначину топлотне енергије и аеродинамичког приступа даље су унапређивали многи истраживачи и проширили је на површине под усевима. Penman-ова једначина довела је до многих физички заснованих једначина, које се и данас користе под различитим условима (Singh, 2017).

Ова једначина може се представити на следећи начин:

$$ET_0 = \frac{\Delta \cdot \text{neto radijacija} + \gamma \cdot \text{transfer mase}}{\Delta + \gamma} \quad (2.8)$$

односно може се преставити као однос брзине испаравања услед нето радијације и брзине испаравања услед преноса масе. Трансфер масе зависи од разлике између стварног притиска паре и паре засићења на температури ваздуха а не зависи од температуре површине воде (Dingman, 2015).

Један од најбољих видова унапређења Penman-ове једначине је Penman-Monteith једначина. Ова једначина развијена је 1965. године (Monteith, 1965), комбиновањем Penman-ове једначине са вегетативним параметрима који укључују аеродинамички и површински отпор (Allen et al., 1996):

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{e_s - e_a}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (2.9)$$

где $e_s - e_a$ представља дефицит притиска паре засићења (kPa), ρ_a је средња густина ваздуха при константном притиску (kg m^{-3}), c_p је специфична топлота ваздуха ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$), а r_s и r_a су површински и аеродинамички отпори (s m^{-1}), респективно.

Највећа разлика између Penman-ове и Penman – Monteith једначине је спајање два члана отпора (површинског и аеродинамичког) у Penman–Monteith једначини, а не коришћење функције ветра. Међутим, показало се да код средина са умереним до јаким ветровима Penman – Monteith једначина прецењује вредности ET (Allen et al., 1996). Иако претходне једначине моделирају физички процес ET, па не би требало да захтевају локалну калибрацију, више истраживача урадило је побољшања са локално калибрисаном факторима (Allen et al., 1996; Walter et al., 2000; Milanovic et al., 2025).

2.5.2 FAO-56 Penman-Monteith једначина

Аеродинамички и површински отпори специфични су за поједине усеве чије вредности могу значајно да варирају у зависности од локације и фазе развоја биљке што условљава процену ЕТ за сваки усев понаособ. Увођењем концепта референтне површине добијена је основа за стандардни и јединствени приступ за све типове корисника. Испаравање са површине оваквог референтног усева је врло слично испаравању са веће површине под зеленом травом која је уједначене висине и активно расте, под претпоставком да се адекватно залива. Нов приступ омогућио је да се вредности ЕТ различитих усева добијају уз помоћ ET_0 и коефицијената усева.

Организација за храну и пољопривреду (Food and Agriculture Organization – FAO) при Уједињеним Нацијама је 1998. године промовисала стандардну референтну Penman – Monteith једначину као стандардну методу за срачунавање ET_0 (Allen et al., 1998). Препоручена једначина гласи:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2.10)$$

где је ET_0 (mm dan^{-1}), T је средња дневна температура ваздуха на 2 m висине ($^{\circ}\text{C}$), U_2 је брзина ветра на 2 m висине (m s^{-1}).

2.5.3 ASCE Penman-Monteith једначина

Америчко друштво грађевинских инжењера (American Society of Civil Engineers – ASCE) је 2000. године стандардизовало Penman – Monteith једначину референтне евапотранспирације за сатне и дневне вредности и то за кратку и за високу референтну културу (луцерка):

$$ET_{Sz} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + C_d U_2)} \quad (2.11)$$

где је ET_{Sz} стандардизована референтна ЕТ усева за кратке или високе површине (mm dan^{-1}), C_n је константа која се мења са референтним типом и временским кораком израчунавања ($\text{K mm s}^3 \text{ Mg}^{-1} \text{ dan}^{-1}$), C_d је константа која се мења са референтним типом, отпором површине и временским кораком израчунавања (s m^{-1}). ASCE је дао дефиницију ET_{Sz} као „брзина евапотранспирације са дефинисане униформне површине густе,

активно растуће вегетације са специфицираном висином и површинском отпорношћу, не мањој од воде у земљишту, и која представља простор од најмање 100 m исте или сличне вегетације“ (Walter et al., 2005). Ова једначина даје различите параметре отпора за дан и ноћ.

3 ОБЛАСТ ИСТРАЖИВАЊА

3.1 Опис локације

Истраживање је спроведено у југоисточној Србији, односно за град Ниш – општина Медијана. Градска општина Медијана обухвата површину од 16 km² на којој живи око 90 000 људи. Конкретна анализирана локација ограничена је Габровачком реком и булеварима: Медијана, Булеваром Немањића и Византијским булеваром као и путем Е-771 и обухвата површину од око 1 km² са надморском висином од 197,2 m, слика 3.1. Становништво на анализираној површини живи претежно у породичним кућама просечне висине од око 10 m. Оквирна процентуална покривеност земљишта је: зелене површине – 30 %, кровови објеката – 50 % и путеви и стазе – 20 %.



Слика 3.1 – Истраживана урбана област у Нишу
(базирано према Google map)

Посматрана област има умереноконтиненталну климу са умерено хладним зимама и умерено топлим летима. Просечна температура ваздуха варира између 11 и 12 °C, при чему је најхладнији месец јануар док је најтоплији месец јули. Просечне температуре ваздуха су у константном порасту. Август се издваја као месец са највећим бројем сунчаних сати (277). Просечне годишње падавине су 580,3 mm. Највлажнији месец је јун са 88 mm падавина, док је фебруар најсушнији месец са 40 mm падавина. Просечна јачина ветра је нешто мања од 3 бофора, са доминантним југоисточним и северозападним ветром.

3.1 Метеоролошка осматрања

Метеоролошка осматрања представљају основни корак у анализи и предикцији климатских параметара. Репрезентативност података је променљив и кључан елемент у обради параметара, који зависи од дефинисаног интервала мерења и експозиције података (WMO-No.8, 2006). Природно је да се карактеристике места мењају кроз време. Ове промене су посебно изражене у урбаној средини (раст вегетације, изградња околних објеката), што додатно утиче на репрезентативност података. На слици 3.2 приказано је мерно место са инсталираном опремом у урбаној средини. Одржавање мерних инструмената и локације на којој се врши мерење је саставни део метеоролошких осматрања. Такође, инструменти морају да задовоље минималне услове у погледу поузданости, стабилности, неизвесности, калибрације и одржавања, како би омогућили квалитетно прикупљање података (WMO-No.8, 2006).



Слика 3.2 – Мерно место и инсталирана опрема у урбаним условима

3.2.1 Аутоматска метеоролошка станица

Аутоматска метеоролошка станица (AWS) је метеоролошка станица у којој се процеси осматрања и преноса података врше аутоматски (WMO-No.182, 1992). Прикупљање и пренос података код AWS се врши електронским путем где су процеси бржи и генерално тачнији од конвенционалних станица. Електронски пренос прикупљених података на централни рачунар је повољност која елиминише могућност људске грешке, до података се долази много брже а омогућено је и аутоматско тестирање квалитета (Snyder et al., 1996). Велика предност примене AWS огледа се код: прибављања поузданих података у условима са отежаним приступом и постизање константног мерења са великом учесталošћу (WMO-No.8, 2006). Применом једне

станции могуће је истовремено задовољити потребе за подацима у више области (хидрологија, метеорологија, аеронаутика, климатологија). Технологија на којој се заснива рад AWS се драстично разликује од оне која се примењује код конвенционалних станица, па је неопходно константно спроводити валидацију рада станице. Поред побројаних предности AWS присутне су неке опасности које могу да компромитују прикупљење податке а које потичу од кварова над сензорима, физичких оштећења станице, оксидације каблова и сл. Зато је потребно периодично одржавање станица, провера сензора на терену, валидација података уз помоћ статистичких тестова и редовна калибрација сензора.

AWS постављена је у урбаном делу Ниша - општина Медијана, 43°19' северне географске ширине и 21°56' источне географске дужине, са надморском висином од 197,2 m. Станица је почела са радом 17.7.2022. године. AWS опремљена је сензорима који омогућују мерење температуре ваздуха и релативне влажности ваздуха (HC2S3-L Temperature and Relative Humidity Probe, Campbell Scientific, USA), брзине и правца ветра (05103-5 Wind Monitor RM Young, Campbell Scientific, USA) и соларне радијације (CS300-L Pyranometer, Campbell Scientific, USA). Управљање свим сензорима врши се преко даталогера (CR1000 Measurement and Control Datalogger, Campbell Scientific, USA), који прикупља податке са сензора на сваких 5 минута и затим их обрађује. Слика 3.3 приказује инсталирану AWS на конкретној локацији.



Слика 3.3 – Инсталирана AWS у урбаним условима

3.2.2 Конвенционална метеоролошка станица

Конвенционална метеоролошка станица (CWS) представља метеоролошку станицу коју опслужује (врши мерења, контролу инструмената) задужена стручна особа. CWS, чији ће подаци бити анализирани у овом истраживању, је главна метеоролошка станица – Метеоролошка опсерваторија Ниш, позиционирана у Нишу у референтним условима, 43°20' северне географске ширине и 21°54' источне географске дужине, надморске висине од 202 m. Станица је почела са радом 1889. године и опремљена је свим мерним инструментима који задовољавају стандарде и прописе Републичког хидрометеоролошког завода Србије (RHMZ).

3.2.3 Метеоролошки подаци

Истраживања у оквиру дисертације обухватила су коришћење метеоролошких података на дневном нивоу и то: температуру ваздуха, релативну влажност, сунчево зрачење и брзину ветра. Подаци су подељени на три временска периода 17.7.2022. – 30.11.2022., 1.4.2023. – 30.11.2023. и 1.4.2024. – 30.11.2024. Приликом оптимизације и развоја нових евапотранспирационих једначина фаза калибрације обухватила је године 2022. и 2023., а 2024. година коришћена је за фазу валидације.

3.2.3.1 Температура ваздуха

Температура ваздуха представља степен загрејаности ваздуха, тј. меру топлотног стања ваздуха. Она варира на дневном нивоу и то је директна последица карактеристика сунчевог и земљиног зрачења. Услед ротације Земље температуре су у току дана више него ноћу, јер је долазно сунчево зрачење веће од излазног земљиног зрачења. Поред дневног јављају се и сезонска варирања температуре ваздуха и она прате варирања сунчевог зрачења у току годишњег циклуса. Ово се објашњава углом под којим сунчеви зраци доспевају на тло, обзиром да је Земљина оса нагнута. Са повећањем географске ширине долазни угао сунчевог зрачења опада па су и варијације зрачења и температуре више изражене. Такође, надморска висина има велики утицај на температуру ваздуха, тј. са повећањем надморске висине температура опада. Ваздух топлоту прима и од подлоге, изнад које се налази, па намена и врста подлоге имају велики утицај на температуру ваздуха.

Инструмент који се користи за мерење температуре је термометар, при чему мора се посебна пажња посветити његовом инсталирању. Локација инструмента мора бити на отвореном простору без препрека као што су дрвеће и зграде. Лако може доћи до грешке код мерења и најчешћи узрок су неправилне инсталације и квар инструмента.

3.2.3.2 Релативна влажност ваздуха

Водена пара је променљив састојак у атмосфери, чији се садржај у ваздуху одређује преко вредности влажности ваздуха. Сходно томе, различите величине: притисак водене паре, апсолутна влажност ваздуха, релативна влажност ваздуха, тачка росе..., на различите начине дефинишу садржај водене паре у ваздуху. Релативна влажност је однос посматраног притиска водене паре и максималног притиска водене паре, при истој температури ваздуха, односно то је степен засићености ваздуха воденом паром, изражен у процентима. Она долази на прво место када је реч о степену влажности ваздуха, тј. када се говори о влажном или сувом ваздуху, увек се мисли на релативну влажност. Директно зависи од температуре у обрнуто пропорционалном смислу, са порастом температуре смањује се релативна влажност ваздуха.

Вредности релативне влажности се крећу од 0 % (сув ваздух) до 100 % (ваздух засићен воденом паром). У нашем климатском поднебљу вредности релативне влажности више од 70 % су знак сувог времена, док су вредности више од 50 % знак врло сувог времена. Инструмент који се користи за мерење релативне влажности назива се хигрометар.

3.2.3.3 Сунчево зрачење

Сунчево зрачење на хоризонталној површини (инсолација) је укупно сунчево зрачење које доспе до земљине површине. Оно представља збир интензитета директног и дифузног сунчевог зрачења и траје од изласка до заласка Сунца, под претпоставком да је небо ведро. Сунчево зрачење, његова јачина и трајање, директно су пропорционални величини угла под којим сунчеви зраци падају на Земљу, док су са друге стране обрнуто пропорционални степену облачности. Такође, трајање сунчевог зрачења зависи и од географске ширине, надморске висине и рељефа земљишта.

Сунчево зрачење директно утиче на температуру земље и ваздуха, а и на остале атмосферске појаве које имају било какав вид повезаности са температуром. Посебно се

истиче значај сунчевог зрачења на вегетацију, јер под утицајем сунчеве светлости долази до асимилације (прерада хранљиве материје у органску) код биљака.

За процену вредности евапотранспирације користи се нето зрачење, које представља нето количину енергије зрачења која је доступна на површини земљишта или вегетације. Могуће га је предвидети помоћу краткоталасног зрачења, притиска водене паре и температуре ваздуха. Инструмент који се користи за мерење сунчевог зрачења назива се пиранометар.

3.2.3.4 Брзина ветра

Хоризонтално кретање ваздушних маса у односу на земљину површину назива се ветар. Заправо кретање ваздуха се одвија и у хоризонталном и у вертикалном правцу, али како је угао кретања ваздуха мали (у односу на површину земљишта), занемарује се вертикална компонента кретања ветра.

Ветар настаје као последица градијента силе притиска, силе теже, Кориолисове силе и силе трења. Он преноси карактеристике климе одакле дува, самим тим деловање ветра се првенствено односи на промену температуре, облачности, влаге у ваздуху и падавина. Ветар представља моћно средство за промену климе како на великом пространству тако и на локалном нивоу. У највећем броју случајева ветрови делују као расхлађујуће средство услед брзог одношења топлоте. Ветар је дефинисан својим правцем и брзином или јачином.

Брзина ветра расте са висином, односно профил ветра се моделује логаритамском функцијом. Стандардна метеоролошка станица мери брзину ветра на висини од 10 m. Међутим, за израчунавање евапотранспирације користи се брзина ветра на 2 m изнад површине, стога се ветар измерен на другим висинама мора прерачунати. Инструменти који се користе за мерење брзине ветра су анемометар (мери се брзина ветра) и анамограф (мери се правац и брзина ветра). У новије време користе се ултразвучни сензори са уграђеним микроконтролором за прихват и обраду података. Референтни услови за мерење брзине ветра захтевају отворен простор без препрека као што су зграде, оgrade и вегетација.

3.3 Испаравање

Процес испаравања представља почетну фазу у кружењу воде у природи. Овим процесом водена пара са земље, мора и океана доспева у атмосферу, односно под испаравањем подразумева се прелазак материје из течног агрегатног стања у гасовито (McCuen, 1998). Процес се одвија уз константан утрошак енергије и при различитим температурама (и најниже температуре представљају неко топлотно стање). Такође, испаравање је саставни део топлотног и водног биланса. Супротан процес испаравању је кондензација где водена пара из гасовите фазе прелази у течну фазу. Испаравање са водене површине и са земље представља битан податак при моделовању разних метеоролошких и хидролошких процеса, а посебно се издваја његов значај код дефинисања потреба за водом биљака (Jensen et al., 2016).

Директно мерење испаравања у природним условима (помоћу природних водених и копнених површина) готово да није изводљиво. Обзиром да директно мерена вредност представља најсигурнији и најквалитетнији податак о испаравању, развијене су индиректне методе (инструменти - испаритељи) мерења које омогућују поуздане, тачкасте податке о испаравању (Allen et al., 1998).

3.3.1 Испаритељ класе А

Испаритељ који је нашао најширу примену у свету, примењен у овој студији, је испаритељ класе А. Испаритељ је развијен у Сједињеним Америчким Државама и испаравање се мери променом нивоа водене површине. Битно је нагласити да на промену нивоа воде (испаравање) утицај имају бројни метеоролошки параметри, што се директно одражава на неопходност додатних инструмената у непосредној близини испаритеља (WMO-No.8, 2006).

Основни елемент испаритеља класе А је суд цилиндричног облика пречника 121 cm (46,5 inch) и дубине 25,5 cm (10 inch). Израђен је од поцинованог лима дебљине 0,8 mm. Суд је постављен на дрвену платформу висине 15 cm (дно суда је хоризонтално), како би се омогућила циркулација ваздуха испод посуде и елиминисао утицај тла на додатно загревање и хлађење воде у суду. Саставни део суда је комора за умирење воде на којој се поставља микрометарски завртањ, преко кога се читава промена нивоа воде (на почетку испаритељ се пуни водом до висине 5 cm испод горње ивице суда – референтни ниво), слика 3.4. Такође, саставни део испаритеља су термометар за мерење

површинске температуре воде, анемометар за мерење брзине ветра, постављен на 2 m висине и кишомер (Хелманов) за мерење количине падавина (ХС, 1974). Испаритељ је прекривен ретком жичаном мрежом за заштиту од животиња. Мрежа је постављена тако да не умањује вредности испаравања, односно пре почетка мерења, током три климатски веома слична дана, урађена су пробна мерења са мрежом и без ње и резултати нису показали значајнија одступања. Поступак бележења и обраде података спроводи се према Упутству за обраду података испаравања (испаритељ класе А) (ХС, 1973).



Слика 3.4 – Испаритељ класе А у урбаним условима

3.3.2 Подаци о испаравању

Истраживања у оквиру дисертације обухватила су коришћење података о испаравању, прикупљених помоћу испаритеља класе А, постављеног у урбаној средини (43°19' северне географске ширине, 21°56' источне географске дужине, 197,2 m надморска висина), подељена на три временска периода 17.7.2022. – 30.11.2022., 1.4.2023. – 30.11.2023. и 1.4.2024. – 30.11.2024. Подела података код оптимизације и

развоја нових једначина је таква да је калибрације обухватила 2022. и 2023. годину, а валидација 2024. годину.

Испаравање представља количину испарене воде са јединице површине у посматраном времену, односно то је висина воденог слоја испарена за посматрано време и изражава се у mm. Ова комплексна појава зависи од низа фактора: температуре површине – одакле вода испарава, релативне влажности ваздуха, брзине ветра, ваздушног притиска, падавина, рељефа као и позиције посматраног места и биљног покривача (Милосављевић, 1982). Интензитет испаравања воде мањи је уколико је околни ваздух ближи стању засићености. Такође, велики утицај на интензитет има и струјање ваздуха где се посебно издвајају хоризонтална и вертикална турбулентна и конвективна струјања. Треба истаћи да ветар може имати утицаја на испаравање само уколико доноси сувији ваздух у односу на ваздух који директно належе на површину испаравања, у супротном, испаравање је мало или уопште не постоји. Испаравање зависи од ваздушног притиска (обрнуто је пропорционално), тако што при високом ваздушном притиску долази до успорења дифузије молекула водене паре (Shuttleworth, 1993).

Посебно се истиче утицај облика земљишта на испаравање, да ли је конкавно или конвексно. Конвексна земљишта имају веће испаравање, јер су у овим срединама појачани ветрови које обликују узвишења на терену. Биљни покривач има велики утицај на смањење испаравање. Земљиште са вегетацијом се мање загрева, што изазива нижу температуру и повишену влажност ваздуха. Ваздушна струјања су много слабија изнад биљног покривача, посебно изнад шума (McMahon et al., 2013).

Ради што ефикасније анализе испаравања врши се подела на стварно (висина стварно испарене воде кроз одређено време) и потенцијално (висина воде која би могла да испари у истим условима у којима се посматра стварно испаравање) испаравање (Милосављевић, 1982). Стварно испаравање највише зависи од стања влаге у земљишту. Потенцијално испаравање је исто код земљишта које је достигло вредност пољског капацитета, код оптимално влажне травнате површине и код водене површине.

4 МЕТОДОЛОГИЈА

4.1 Осмотрени подаци

4.1.1 Контрола квалитета података

Процена квалитета метеоролошких података је неопходан корак ка израчунавању тачне и репрезентативне евапотранспирације. Поступци контроле квалитета примењују се за откривање и идентификацију грешака направљених у процесу снимања, манипулације, форматирања, преноса и архивирања података. Контрола и осигурање квалитета података обухвата и неизоставну проверу екстремних вредности, као и проверу временских изузетака, односно оних вредности података које су много веће или мање од суседних вредности али нису веће од екстремума (Feng et al., 2004). Појава екстремних вредности и изузетака може директно утицати на процес хомогенизације, па је препорука да се контрола квалитета изврши пре хомогенизације података (WMO-No.1245, 2020). Како би се прецизније утврдиле грешке међу подацима, контрола квалитета података може да се спроведе поново након процеса хомогенизације. Потребно је прегледати податке и идентификовати сумњиве или погрешне податке (који су неизбежни код сваког мерења) и њих одбацити или заменити процењеним вредностима, јер тачност прорачуна евапотранспирације зависи од квалитета метеоролошких података. Сматра се да људска контрола, и даље, има главну улогу у валидацији података (You and Hubbard, 2005). Према Walter et al. (2005), процес прегледа података подразумева да корисник има осећај за разумне и неразумне вредности, односно да сваку од променљивих упореди са историјским подацима са суседних станица.

4.1.1.1 Могуће грешке код мерења

У току мерења могуће су грешке, јер ниједно мерење није сасвим тачно већ увек даје неки приближни резултат. Извори грешака у праћењу испаравања укључују факторе околине као што су локација, инсталација, ометање струјања ветра, адвективни извори топлоте. Могућа је појава грешака и у околини испаритеља као што су висина суда, заштита од птица и учесталост чишћења (Shuttleworth, 1993).

Грешке приликом мерења деле се на систематске, случајне и грубе. Систематске грешке код мерења везане су за неисправну опрему, неправилну функцију сензора,

неадекватно повезивање и обраду података, нерепрезентативне карактеристике вегетације и неправилну интеграцију временског корака. Повећање броја мерења неће смањити ове грешке.

Случајне грешке везане су за сам поступак мерења, као што је неправилно читавање нивоа воде, мерење температуре воде на различити висинама (висина мора бити константна). Ове грешке се могу умањити или елиминисати понављањем поступка мерења (Allen et al., 2011). Саставни део мерења нивоа воде у испаритељу је и мерење падавина, што представља још један потенцијални извор грешке. Кишомер се инсталира у непосредној близини испаритеља класе А, али од значаја за појаву грешака је да отвор испаритеља и кишомера нису на истој висини, односно према упутству RHMZ-а, кишомер се поставља на стандардној висини од 0,9 m (ХС, 1974). Приликом мерења падавина присутне су систематске грешке чији узроци могу бити: аеродинамички ефекти, влажење унутрашњих зидова посуде, испаравање акумулиране воде у посуди, немогућност потпуног пражњења мерног контејнера и прскање капи кише даље од мерача. Вонпасси (1991) у својим анализама је утврдио да наведене грешке могу произвести умањење испаравања од 4,4 до 17,2 % на месечном нивоу.

Грубе грешке, изазване људима, могу бити и веће од систематских и случајних грешака. Међутим, са искуством оператера могуће је значајно смањити ове грешке (Allen et al., 2011). Појава грубих грешака дешава се приликом бележења резултата мерења, доливања воде (када ниво воде у суду падне испод 17,5 cm) и одливања воде. Наиме, код јаких киша дешава се да вода прелије ивице суда, па је нужно одливање воде, што захтева посебну пажњу. Потребу за додатним опрезом представља и чишћење суда, када исти мора потпуно да се испразни (уобичајено чишћење суда је једном месечно, у зависности од запрљања воде).

Код електронски прикупљених података са аутоматске мерне станице, људски надзор је ограничен, али је такође потребна опрезност јер подаци понекад могу бити угрожени кваром сензора, старењем сензора, чистоћом сензора, погрешном калибрацијом и програмирањем даталогера (Allen, 2008). Такође, климатске прилике (снег и лед) могу да утичу, да онемогуће рад сензора. Разни спољни фактори могу случајно да активирају рад сензора у тренуцима када нема природних услова за њихову активацију.

4.1.1.2 Хомогеност података

Подаци прибављени мерењем испаравања или метеоролошких параметара морају бити хомогени како би даљи прорачуни засновани на њима, били квалитетни и поуздани. Метеоролошка временска серија се сматра хомогеном ако су варијације у серији проузроковане само варијацијама у клими (WMO-No.1245, 2020). Нехомогеност података огледа се у изненадној промени средње вредности и варијансе, у односу на оригиналне вредности. Постоје више типа хетерогености које се могу јавити и утицати на крајње резултате прорачуна и то су: промена локације пан испаритеља и метеоролошке станице, промене у опреми, промене у пракси осматрања и нагле промене очигледне у временским серијама (Peterson and Easterling, 1994). Поједине промене, у зависности од своје природе, могу узроковати оштре дисконтинуитете, док друге промене, посебно везане за окружење мерне опреме, могу изазвати постепене пристрасности у подацима. До нехомогености може доћи и услед погоршања рада или механичког квара сензора и њихове калибрације, а такође и услед промена насталих садњом високог дрвећа или изградњом зграда у близини мерног места на коме је инсталирана опрема, што је чест случај у урбаним срединама. Урбанизација има посебан утицај на временске серије јер нема наглог прекида хомогености већ се јавља постепени тренд промена података, који са друге стране може да се веже само за локалну средину, око мерне опреме, а не за цео град. Такође, утицај урбанизације варира кроз време, а у зависности од места које се посматра. Наиме, промена података је мања уколико је опрема првобитно инсталирана у високо урбанизованој целини, док је драстично израженија уколико је опрема инсталирана у благо урбанизованој средини која се кроз време значајно развила (WMO-TD No.1186, 2003).

Детектовањем промена у серији података, употреба истих може бити проблематична уколико услови рада станице нису правилно сагледани и детаљно описани, јер промена указује или на појаву нехомогености у серији или да је дошло до наглих - стварних промена климе. За потребе детектовања промена временских серија користе се тестови хомогености, док се процес уклањања нехомогености ослања на рачунске технике које за основу углавном користе поређења података са суседних метеоролошких станица. Peterson et al. (1998) даје анализу метода за процену хомогености временских серија различитих резолуција. Rhoades and Salinger (1993) посветили су посебну пажњу ка статистичким процедурама за анализу и хомогенозацију података са изолованих метеоролошких станица.

Како би се на најсвеобухватнији начин испитала хомогеност временске серије примењена је апсолутна метода тестирања (за сваку станицу посебно), која је обухватила четири теста хомогености: Pettitt's, Standard normal homogeneity (SNHT), Buishand's и von Neumann's ratio тестови, са нивом значајности од 5%. Wijngaard et al. (2003) и Bickici Arikan and Kahya (2019) показали са да је ова група тестова довољна за дефинисање хомогености података. Pettitt's тест (Pettitt, 1979) је непараметарски тест за откривање тачке промене у временској серији и има велику примену при почетним анализама метеоролошких података. SNHT тест (Alexandersson, 1986) представља једноставан и флексибилан тест намењен за испитивање хомогености, уз основу претпоставку да испитивани подаци подлежу нормалном закону расподеле. Иста претпоставка неопходна је и за примену Buishand's (1982) теста. Такође, поред претпоставке о нормалности серије, за Buishand's тест, неопходно је да подаци буду независни и насумично распоређени. Прицип рада тестова заснива се на оцени хипотеза, односно нулта хипотеза означава серију која нема значајније промене средње вредности, хомогена је, док алтернативна хипотеза показује нехомогену серију, серију у којој долази до степенасте промене средње вредности.

Pettitt's и Buishand's тестови имају способност бољег откривања промене средње вредности временске серије у средини серије, односно прецизнији су у централном подручју серије, док је SNHT погоднији за откривање промене средње вредности на почетку и крају временске серије. За разлику од наведених тестова, von Neumann's ratio тест (von Neumann, 1941) – повезан са серијском корелацијом, се издваја јер не пружа информације о томе када и на којем месту је нарушена хомогеност временске серије (Wijngaard et al., 2003).

Применом ове групе тестова омогућена је анализа временских серија које могу да припадају различитим расподелама уз прецизно дефинисање промене средње вредности серије.

4.2 Прорачун референтне евапотранспирације

Постоје бројне методе процене референтне евапотранспирације које варирају по сложености и просторно временској скали. FAO је препоручила Penman-Monteith методу, која има високе захтеве за подацима који често нису доступни, па је неопходно користити алтернативне методе.

Емпиријске методе имају ограничену применљивост јер су обично тачне само у ограниченом опсегу. Њихове променљиве можда неће бити доступне и лако мерљиве на другим местима. Такође, због специфичности самих метода тешко је поредити једану методу са другом (Singh and Xu, 1997).

Ради једноставности анализе, методе се могу сврстати у четири категорије према врсти параметара (Jensen et al., 2016; Trajkovic and Kolakovic, 2009):

- Температурне методе, које се ослањају на температуру ваздуха,
- Радијационе методе, које узимају у обзир само енергетски биланс,
- Евапорационе методе, које процену ET_0 сагледавају као пропорцију измерених брзина испаравања из посуде и
- Комбиноване методе, које узимају у обзир енергетски биланс заједно са преносом топлоте и масе.

4.2.1 Температурне методе

Температурне методе спадају у најстарије методе за процену ЕТ и од података користе само температуру ваздуха да би представили количину енергије потребне за ЕТ усева. Ове методе дају лошије резултате у поређењу са комбинованим методама зато што не узимају у обзир параметре као што су брзина ветра и сунчево зрачење. Велику примену су пронашли на местима где су ограничени метеоролошки подаци. Генерално, ове методе су прецизније за прорачун ET_0 са краћим временским корацима (дневни). С обзиром да су методе развијене за дефинисану локацију, локална калибрација је потребна да би се побољшала тачност одређивања ET_0 (Xu and Singh, 2002). У овој студији, од температурних метода, примењена је Hargreaves-Samani једначина и температурна Penman-Monteith једначина.

4.2.1.1 Hargreaves and Samani метод

Hargreaves and Samani (H-S) (Hargreaves and Samani, 1985) једначина заснована је на температури и развијена је на основу Christiansen-ове једначине (Christiansen, 1966), елиминацијом параметара који у већој мери не утичу на вредност ET_0 . Наиме, Харгривс је у својим експериментима утврдио да вредност температуре и соларне радијације објашњава 94 % вредности ET_0 (Hargreaves and Allen, 2003). Изостављајући утицај ветра и релативне влажности са циљем да се подстакне једноставност у прорачуну и употреба

минималног броја података, Харгривс је доказао да се процена ET_0 може добити само на основу температуре, односно у једначини је уместо података о сунчевом зрачењу, који често нису доступни, узета екстратерестријална радијација и разлика максималних и минималних температура. Hargreaves and Allen (2003) дали су историјат развоја ове методе и константовали да ова рачунски једноставна једначина може се користити у различитим климатским условима уз минималну количину потребних климатских података.

Једначина H-S често је калибрисана, под различитим климатским и еколошким условима, и прилагођавана према локалним условима ради што прецизније процене ET_0 . Прилагођавање коефицијената једначине локалним условима је алтернативни начин за побољшање њене процене, штавише Allen et al. (1998) је препоручио калибрацију H-S једначине у односу на Penman-Monteith једначину, на регионалном нивоу, посебно за услове субхумидне до хумидне климе. За климатске услове који су владали на западном Балкану (хумидна клима) седамдесетих и осемдесетих година прошлог века, Трајковић (2007) извршио је рекалибрацију Харгисовог експонента при константним осталим коефицијентима и доказао да тај коефицијент износи 0,424.

У овој студији разматраће се оригинална H-S једначина, за хумиде услове:

$$ET_0 = a(T + b)(T_{\max} - T_{\min})^c R_a \quad (4.1)$$

где је ET_0 референтна евапотранспирација (mm dan^{-1}), $T_{\max}$ и $T_{\min}$ су максимална и минимална дневна температура ваздуха ($^{\circ}\text{C}$), респективно, R_a је екстратерестријална радијација (mm dan^{-1}). a , b и c су вредности коефицијената чије оригиналне вредности износе 0,0023, 17,8 и 0,5, респективно.

4.2.1.2 FAO-56 Penman-Monteith температурни метод

FAO-56 Penman-Monteith температурна метода (P-Mt) спада у групу метода са минималним бројем података, односно од потребних података тражи само податке о температури. Ова метода је настала у тежњи да се на основу ограничених података дође до релативно тачне процене ET_0 . Наиме, раније је истакнуто да је FAO-56 Penman-Monteith најтачнија једначина у различитим климатским условима (Allen et al., 1998; Kisi and Ay, 2016), али њено ограничење је у томе што захтева велики број података који се могу добити само у главним метеоролошким станицама. Бројне студије су доказале да се P-Mt приступ може успешно користити за процену ET_0 (Todorovic et al., 2013; Stöckle

et al., 2004; Trajkovic, 2005; Raziei and Pereira, 2013; Pereira et al., 2003). У анализи коришћена је верзија Р-Mt која усваја локалну брзину ветра U_{2l} ($m\ s^{-1}$) (Трајковић, 2009):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{a}{T + 273} U_{2l} (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(b + cU_{2l})} \quad (4.2)$$

где су a , b и c вредности коефицијената чије оригиналне вредности износе 900, 1 и 0,34, респективно.

4.2.2 Радијационе методе

Радијационе методе користе сунчево зрачење заједно са температуром ваздуха и често се користе јер захтевају мање података од комбинованих метода. Количина сунчевог зрачења је значајан фактор при процени ET_0 током краћих временских интервала, тако да ове методе могу бити боље од температурних. Сунчево зрачење се може користити директно или индиректно, како би се обезбедила мера нето доступног зрачења за процену ET_0 . Ове методе су карактеристичне за влажне регионе, где је влажност висока а дефицит притиска паре низак. Сматра се да емпиријске једначине које користе зрачење као примарну променљиву пружају адекватне и поуздане процене ET_0 када су ограничени метеоролошки подаци. Према Jensen (1966), радијационе једначине генерално пружају поузданије процене ET_0 од оних заснованих само на температури ваздуха.

4.2.2.1 Stephens and Stewart метод

Stephens and Stewart (1963) (S-S) метод спада у групу радијационих метода и настао је током истраживања евапорације. Од података метод захтева само податке о краткоталасном зрачењу и температури ваздуха. Генерализовани облик формуле је:

$$ET_0 = (a + bT) R_s \quad (4.3)$$

где је R_s сунчево зрачење ($mm\ dan^{-1}$), a и b су коефицијенти са оригиналним вредностима 0,1 и 0,027.

4.2.2.2 Priestley and Taylor метод

Priestley and Taylor (1972) (P-T) предложили су поједностављену верзију комбинованих једначина, када су површине тла генерално влажне. Penman-ова једначина је послужила као основа, поједностављена је тако што су аутори изоставили аеродинамичку компоненту и методу свели на компоненте зрачења. Од података, метод захтева само податке о нето зрачењу, температури ваздуха и емпиријски коефицијент α , за израчунавање ET_0 , тако да је примена методе једноставна у регионима са оскудним подацима. P-T једначина даје добре процене за ниске адвективне услове у хумидној клими, за коју је $\alpha = 1,26$ (има улогу компензовања недостатка аеродинамичке компоненте). Полусушне до сушне климе представљене су вредностима α вишим од 1,26 (сматра се да P-T једначина не важи без калибрације у семиаридним и аридним подручјима). Детаљнији преглед вредности коефицијента α спровео је McMahon et al., (2013), са варијацијама од 0,53 до 1,57. P-T метод коришћен у овој студији има облик:

$$ET_0 = a \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} R_n \quad (4.4)$$

где је a коефицијент са оригиналном вредношћу 1,26.

4.2.3 Евапорационе методе

Бројне студије показале су високу корелацију између испаравања из испаритеља и ET_0 (Doorenbos and Pruitt, 1977; Jensen, 1966; Pruitt, 1966), и доказале успешно коришћење губитка воде из испаритеља за процену ET_0 . У зависности од примењене методологије, однос E и ET_0 може директно да зависи од метеоролошких параметара, карактеристика локације и времена или од јединственог коефицијента који групише утицај појединих метеоролошких параметара и само окружење испаритеља.

4.2.3.1 FAO – 24 Pan метод

Испаритељ (суд) класе А је стандардизован инструмент који представља посуду за испаравање напуњену водом где се промена дубине бележи током времена. Регистроване промене дубине воде представљају процесе E и могу се довести у корелацију са ET_0 других површина. Како се услови у испаритељу разликују од других површина (у овој студији урбаних површина) потребно је увести емпиријске

коэффициенте који E конвертују у ET_0 . E у испаритељу класе А повезано је са ET_0 помоћу пан коефицијента (Doorenbos and Pruitt, 1977):

$$ET_0 = K_p E_{pan} \quad (4.5)$$

где је K_p пан коефицијент и E_{pan} је испаравање из суда класе А (mm dan^{-1}).

Вредности пан коефицијента за испаритељ класе А, са разним ограничењима (смер ветра, средња релативна влажност), дате су табеларно (Doorenbos and Pruitt, 1977). Шири распон K_p , на основу претходне табеле, дао је Shuttleworth (1993), где се вредности K_p крећу у распону од 0,65 до 0,85. У влажним условима овај коефицијент је виши док у сушним има нижу вредност. Вредност од 0,7 је применљива када су температуре воде и ваздуха приближно једнаке (Wootton, et al., 1996). Битно је нагласити да препоручене вредности представљају само смернице и указују на чињеницу да употреба табеле није довољна, односно да нису обухваћени сви локални елементи који утичу на K_p и да је од суштинског значаја потребна локална калибрација да би подаци о испаритељу били корисни у процени ET_0 .

Више аутора (Kohler et al., 1955; Allen et al., 1998; Snyder, 1992) предложило је емпиријски изведене изразе за K_p на основу података о брзини ветра, релативној влажности и специфичном растојању у правцу ветра. Једначине су развијене коришћењем техника регресије на основу оригиналне табеле (Doorenbos and Pruitt, 1977) која је узета као референтна вредност.

У овој студији за анализу FAO-24 Pan методе, од многих једначина за прорачун K_p , коришћене су две које су дале сличне резултате у области која покрива ова студија (Milanovic et al., 2017), Allean and Pruitt (1991) (FAO-24 Pan A-P) и Orang (1998) (FAO-24 Pan O).

4.2.3.1.1 FAO – 24 Pan Orang метод

Orang (1998) је развио једначину за K_p комбинујући технике линеарне регресије са интерполацијом између специфичног растојања, користећи средњу дневну релативну влажност – RH (%) и специфично растојање од суда у правцу ветра – F (m). Финални облик једначине за ET_0 је:

$$ET_0 = (a - bU_2 + c \ln(F) + dRH - eRH \ln(F))E_{pan} \quad (4.6)$$

где су a , b , c , d и e коефицијенти са оригиналним вредностима 0,51206, 0,000321, 0,031886, 0,002889 и 0,000107, респективно.

4.2.3.1.2 FAO – 24 Allen and Pruitt метод

Allen and Pruitt (1991) су представили нелинеарну једначину за процену K_p , која зависи од RH (%), U_2 (km dan⁻¹) и F (m).

$$ET_0 = (a - bU_2 + c \ln(F) + d \ln(RH) - e(\ln(F))^f \ln(RH)) E_{pan} \quad (4.7)$$

где су a , b , c , d , e и f коефицијенти са оригиналним вредностима 0,108, 0,000331, 0,0422, 0,1434, 0,000631 и 2, респективно.

4.2.4 Комбиноване методе

Комбиноване једначине потичу из теорије коју је првобитно изнео Penman (1948), према којој је увео једначину која је комбиновала енергетски биланс и аеродинамичку компоненту како би апроксимирао енергетски флуks између атмосфере и слободне површине воде, усредњен током 24 сата (Jensen et al., 2016). Комбиноване методе су физички засноване методе, могу узети у обзир ситне промене климатских услова, што није случај код једноставних метода, па су стога погодне за употребу у веома кратким временским корацима. Ове методе дају најбољи резултат за различите површине, са и без вегетације, и климатске средине, али захтевају велики број улазних параметара (температура, ветар, влажност и радијација).

4.2.4.1 FAO – 56 Penman-Monteith метод

FAO је у сарадњи са више релевантних институција усвојио модификовану Penman-Monteith (P-M) једначину као стандард за процену ET_0 . Референтни усев дефинисан је као хипотетички усев са претпостављеном висином од 0,12 m, површинским отпором од 70 s m⁻¹ и албедом од 0,23 (Allen et al., 1998). Модификација Penman-ове једначине од стране Монтејта била је да се објасни отпор дифузији водене паре и преносу осетне топлоте кроз ваздух. P-M једначина укључује све значајне параметре који управљају разменом енергије и одговарајућим латентним топлотним флуksом и доказала се као једна од најробуснијих метода ET_0 (Jensen et al., 2016):

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (4.8)$$

где је ET_0 референтна евапотранспирација (mm dan^{-1}), Δ пад напона zasiћене водене паре ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), R_n нето зрачење ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$), G топлотни флуks земљишта ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dan}^{-1}$), γ психометријска константа ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), T средња дневна температура ваздуха на 2 m висине ($^\circ\text{C}$), U_2 брзина ветра на 2 m висине (m s^{-1}), e_s притисак zasiћене паре (kPa), e_a стварни притисак zasiћене паре (kPa), $e_s - e_a$ је дефицит притиска паре zasiћења (kPa).

P-M је једна од најпризнатијих метода за процену ET_0 када су потребни скупови података доступни и (Shuttleworth, 2007) представља метод који обезбеђује реалистичне вредности ET_0 у свим регионима и климама, Такође, представља стандард којим се може упоредити ET_0 у различитим временским периодима. У условима када постоји неограничена залиха воде ова једначина се може користити за израчунавање потенцијалног испаравања (Endreny, 2006). У овој анализи FAO-56 Penman-Monteith метод коришћен је као референтна једначина.

4.3 Анализа осетљивости

Развијене методе у студијама ET_0 могу бити у корелацији са појединим улазним параметрима, где мале промене у улазној вредности производе значајне промене у излазу. Како би се измерио утицај једног фактора на други, дефинише се осетљивост као стопа промене једног фактора у односу на промену другог.

Утицај урбанизације на климатске факторе раније је анализиран и константовано је да она утиче на повећање или смањење брзине ветра, сунчевог зрачења, температуре и релативне влажности. Елиминисање било ког метеоролошког параметра у једначинама може бити значајан извор несигурности у процени ET_0 . Да би се утврдило понашање, односно промене код процењене ET_0 у локалним урбаним условима извршена је анализа осетљивости. Различите ET_0 методе са различитом структуром и захтевима за подацима разликују се у својој осетљивости на климатске улазе (McKenney and Rosenberg, 1993). Резултати анализа су од великог значаја за одређивање приближне промене ET_0 која се очекује за познату промену једне од променљивих. Познавање осетљивости методе ET_0 потребно је ради одређивања тачности при мерењу променљивих, које се користе за

прорачун ET_0 (Irmak et al., 2006), а исто тако и код унапређења постојећих и развоја нових формула за ET_0 .

Идентификовање најутицајније променљиве од метеоролошких података може значајно помоћи приликом формирања нових израза за процену ET_0 , посебно оних са минималним бројем улазних података. Примена метода за прорачун ET_0 , са ограниченим бројем података, могла би да доведе до нетачних резултата уколико променљиве нису репрезентативне, односно по извршеној анализи осетљивости нису узети у обзир најосетљивији параметри. Под најосетљивијим параметром подразумева се онај параметар код кога и минималне промене проузрокују значајне промене у резултату методе.

Анализа осетљивости може бити од кључног значаја приликом калибрације методе. Непознавање осетљивости методе на промене појединих параметара може, приликом модификације методе, усмерити пажњу на оне параметре који имају незнатан утицај на метод, док осетљиви параметри могу бити игнорисани, што калибрацију чини бесмисленом. Фокусирање на осетљиве параметре може довести до бољих финалних вредности што је од значаја за развој и валидацију методе.

Осетљивост методе, као однос улазних фактора и излазне вредности, омогућује препознавање потенцијалних недостатака у структури методе и пружа смернице за поједностављење методе као и за детектовање улазних фактора који имају значајан утицај на метод.

Више аутора закључило је да не постоји стандардна или општеприхваћена, уобичајена процедура за израчунавање коефицијента осетљивости (SC) на климатске променљиве (Irmak et al., 2006; Debnath et al., 2015; Gong et al., 2006; Ndiaye et al., 2017), односно у литератури је могуће наћи више различитих приступа за анализу осетљивости. Оквирна подела приступа за анализу осетљивости је на методе глобалне и локалне анализе. Глобалне методе користе се за валидацију утицаја више променљивих на излаз једначина (Saltelli et al., 2008) док се локалне користе за процену утицаја једне променљиве на излаз једначине а притом су остале променљиве константне (Irmak et al., 2006). Анализа помоћу локалних метода не пружа интегрисани ефекат свих променљивих на резултат, али зато методе имају јасан исход и једноставну процедуру прорачуна (Yin et al., 2010).

У овој студији примењена је анализа осетљивости локалном методом која је присутна у бројним рецензираним радовима и која се показала ефикасном за метод ET₀ (McCuen, 1974; Beven, 1979; Rana and Katerji, 1998; Gong et al., 2006). Општа дефиниција осетљивости методе може се изразити у математичком облику (McCuen, 2003):

$$O = f(F_1, F_2, \dots, F_n) \quad (4.9)$$

где је O излаз – решење методе а F_i фактор који утиче на осетљивост.

Промена фактора O која настаје услед промене фактора F_i дата је Taylor-овим редом:

$$f(F_i + \Delta F_i, F_{j|j \neq i}) = O_0 + \frac{\partial O_0}{\partial F_i} \Delta F_i + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 O_0}{\partial F_i^2} \Delta F_i^2 + \dots \quad (4.10)$$

где је O_0 вредност O на неком одређеном нивоу сваког F_i . Како су нелинеарни чланови једначине мали у поређењу са линеарним члановима, могуће је да се једначина редукује на следећи начин:

$$f(F_i + \Delta F_i, F_{j|j \neq i}) = O_0 + \frac{\partial O_0}{\partial F_i} \Delta F_i \quad (4.11)$$

па је постепена промена O :

$$\Delta O_0 = f(F_i + \Delta F_i, F_{j|j \neq i}) - O_0 = \left(\frac{\partial O_0}{\partial F_i} \right) \Delta F_i \quad (4.12)$$

Пошто се заснива само на линеарним члановима из Taylor-овог реда, једначина (4.12) се назива линеаризована једначина осетљивости, и мери промену фактора O , која је резултат промене фактора F_i .

Општа дефиниција коефицијента осетљивости је парцијални извод функције O у односу на сваки фактор F .

$$SC = \frac{\partial O_0}{\partial F_i} = \frac{f(F_i + \Delta F_i, F_{j,j \neq i}) - f(F_1, F_2, \dots, F_n)}{\Delta F_i} \quad (4.13)$$

Често је тешко наћи парцијалне изводе сложених метода који се јављају у хидрологији, па се за десну страну једначине (4.13) примењује факторска пертурбација, односно користи се метод најмањих разлика у апроксимацији парцијалних извода (Zhang et al., 2010).

Коефицијент осетљивости се изражава бездимензионалним индексом, који се израчунава као однос између релативне промене излаза методе и релативне промене

посматраног параметра. Да би се добио SC , потребна је нормализација истог, па је осетљивост ET_0 на климатске променљиве дефинисана изразом:

$$SC = \frac{\Delta ET_0}{\Delta CV} \frac{CV}{ET_0} \quad (4.14)$$

где је SC коефицијент осетљивости, CV посматрана климатска променљива а ΔET_0 и ΔCV представљају промене ET_0 и CV , респективно.

Анализа осетљивости извршена је повећањем и смањењем независних променљивих и то минималне и максималне температуре ваздуха, сунчевог зрачења и брзине ветра. Код ових променљивих, приликом анализе осетљивости, вариран је један параметар док су остали били константни. Релативне промене биле су у опсегу од ± 20 % у интервалу од ± 5 % (-5 %, -10 %, -15 %, -20 %, +5 %, +10 %, +15 %, +20 %). Са наведеним променама вршена је процена ET_0 на дневној бази, што је на крају довело до срачунавања просечне вредности SC на дневном нивоу. Утицаји промене параметара на промену ET_0 приказани су на дијаграму као крива осетљивости.

Вредности SC пружају увид о утицају параметара на ET_0 . С обзиром да је коефицијент бездимензионалан, могуће је вршити упоређивање односно сортирање SC према вредностима и промењеним параметрима. Што је коефицијент већи, то је и утицај параметра на ET_0 већи и обрнуто. Lenhart et al. (2002) су ради што јасније процене осетљивости, предложили класификацију вредности SC према степену осетљивости, табела 4.1.

Табела 4.1 – Класификација вредности коефицијента осетљивости

Коефицијент осетљивости	Степен осетљивости
$0,00 \leq SC < 0,05$	мали до занемарљив
$0,05 \leq SC < 0,20$	средњи
$0,20 \leq SC < 1,00$	висок
$ SC \geq 1,00$	веома висок

4.4 Методе оптимизације

Под оптимизацијом се обично подразумева изналажење најбољег решења неког проблема, које је оптимално или је близу оптималног у односу на постављене циљеве и присутна ограничења. Како су сами проблеми често дефинисани параметрима који утичу на решења, оптимизацијом се стварају комбинације и вредности параметара који најбоље одговарају за дати задатак.

Емпиријске једначине за ЕТ садрже параметре који су применљиви у условима у којима су настале. У идеалном случају вредности параметара би требало да се добију директним *in situ* мерењима, што обично није могуће и стога се морају проценити кроз калибрацију методе (Scheerlinck, 2009). Методе развијене за једну агроклиматску средину можда неће дати добре резултате у другачијим климатским условима, услед различитих претпоставки и захтева за улазним подацима, па је потребно извршити рекалибрацију, односно оптимизовати параметре методе према конкретним локалним условима, на основу измерених података.

Уместо употребе тачних математичких метода јављају се метахеуристичке методе које се могу применити на скоро све проблеме код којих се захтева оптимизација параметара. Савремене методе оптимизације, метахеуристичке методе, за разлику од традиционалних приступа који користе математичко програмирање, су моћне и атрактивне методе за решавање сложених оптимизационих задатака, и укључују елементе структуриране случајности за претрагу, често мотивисане посматрањима природних феномена (Collette and Siarry, 2003).

Сам термин „метахеуристика“ сковао је Fred Glover (1986) и односи се на алгоритамску структуру која може да се примени на бројне проблеме оптимизације уз мање модификације за прилагођавање појединачном проблему. Метахеуристике се појављују као популарни алати за проблеме оптимизације, а током последњих неколико деценија присутне су и у области водних ресурса, као што је калибрација једначина, планирање, пројектовање и рад система водоснабдевања и слично. (Maier et al., 2014) Постоји више класификација метахеуристичких метода а најчешћа класификација је према „заснованој на путањи и заснованој на популацији“ и „инспирисаној природом и неинспирисаној природом“. Abdel-Basset et al. (2018) представио је нову класификацију која дели метахеуристике на оне засноване на метафорама и на оне које нису засноване на метафорама. У прву групу су алгоритми који симулирају природне појаве и људско

понашање у савременом – стварном животу, односно заснивају се на принципима биолошке еволуције. У другој групи су метахеуристике које не користе никакву симулацију за одређивање своје стратегије претраживања.

Проблем оптимизације укључује четири главне компоненте (Yang, 2023): избор алгоритма, руковање ограничењима, евалуацију функције циља и давање смисла решењу. Не постоји јединствен оптимизациони метод за решавање свих проблема. Како би се дошло до најбољег решења, потребно је применити више метода које користе различите стратегије и упоредити резултате њихове примене.

Практично метахеуристички алгоритми су класификовани у зависности од њиховог понашања и то на алгоритме засноване на еволуционом рачунању, алгоритме базиране на интелигенцији роја, алгоритме утемељене на физици и на хибридне метахеуристичке алгоритме (Abdel-Basset et al., 2018).

Еволуциони алгоритми (ЕА) су стохастичке метахеуристике које се успешно примењују на многе реалне и сложене проблеме. Они су најпроучаванији алгоритми и засновани су на популацији (Talbi, 2009). ЕА представљају приступе проналажењу одговора на проблем оптимизације, који се односе на проучавање неких техника случајног претраживања, развијених на основу концепта генетике и природне еволуције (Вох, 1957). Они симулирају биолошки напредак еволуције на ћелијском нивоу користећи операторе селекције, укрштања, мутације и репродукције како би генерисали све боља кандидатска решења. Они су породица алгоритама за оптимизацију инспирисана биолошком еволуцијом и природном селекцијом.

За еволуционо израчунавање постоје четири историјске парадигме: еволуционо програмирање, еволуционе стратегије, генетски алгоритми и генетско програмирање. У овој студији, за оптимизацију параметара једначина за процену ET_0 , примењени су ЕА и то: генетски алгоритам (genetic algorithm – GA) и оптимизација роја честица (particle swarm optimization – PSO).

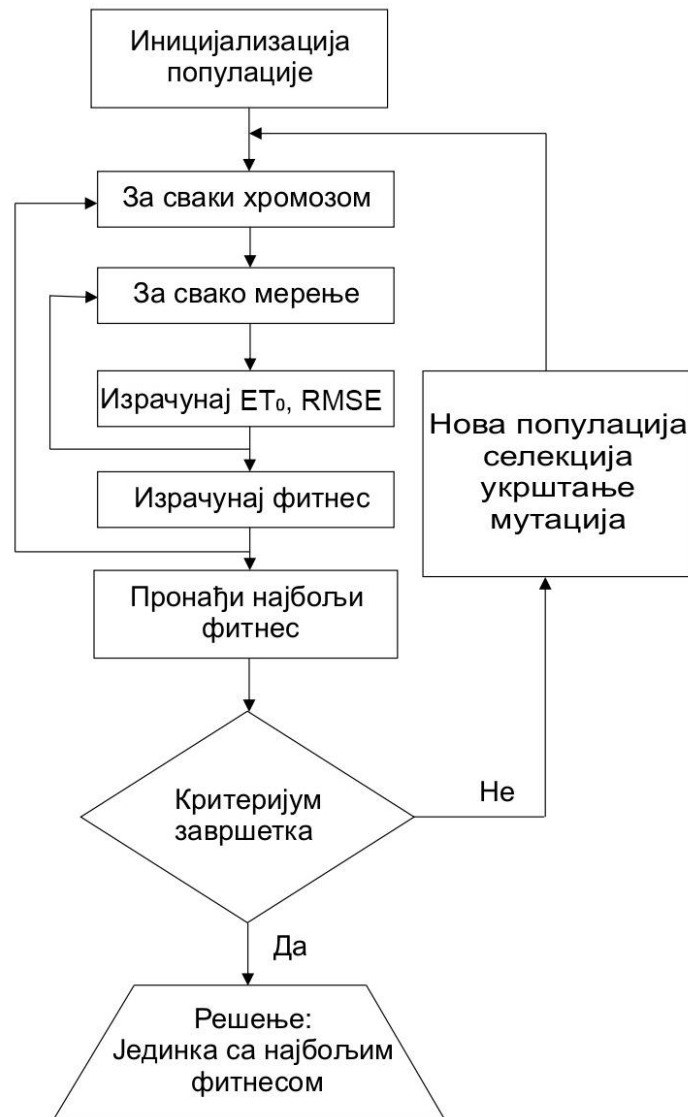
4.4.1 Генетски алгоритам

Генетски алгоритам, заснован на принципима природне генетике и природне селекције, је најпознатији тип еволуционог алгоритма. Основе GA дефинисао је John Holland (1992), где је главни принцип рада алгоритма заснован на генима као улазним

варијаблама. GA се широко користи у хидролошким наукама, углавном због своје робусности, једноставности и применљивости (Kawamura and Tarek, 2017).

Основни објекат генетског алгоритма је хромозом и његова искоришћеност назива се фитнес. Фитнес функција даје меру исправности предложеног решења. Алгоритам се примењује на скуп јединки који се назива популација где свака јединка одговара неком решењу и представљена је генетским кодом. У оригиналној примени кодирање је бинарно (нула и један), касније су уведени разни типови гена. Кодирање је битно за ефикасност алгоритма, јер неодговарајући избор кода може да доведе до сумњивих резултата без обзира на остале делове алгоритма. Начин кодирања је у тесној вези са природом проблема који се решава. У терминологији GA, генетски оператори су операције које се користе на појединцима у популацији ради добијања бољих решења. Ови оператори користе се за генерисање најспособнијих појединаца односно за избор најбољег решења проблема.

Постоји пет процедура које описују процес GA (Holland, 1992): иницијализација популације, процена способности, селекција, укрштање и мутација. GA функционише са колекцијом хромозома, која се назива популација. Формирање почетне популације почиње тако што се она насумично иницијализира. Свакој јединки у популацији (у пракси их је највише до неколико стотина) на одређен начин се додељује функција прилагођености која је мерило квалитета јединке (односно одговарајућег решења). Како се претрага развија, популација укључује све боља и боља решења, врши се процена способности популације, и на крају конвергира, што значи да њој доминира једно решење, слика 4.1.



Слика 4.1 – Шематски приказ генетског алгоритма (GA)
(базирано према Nedic et al., 2014)

Селекција је у вези са функцијом прилагођености и свакој јединки даје се шанса пропорционална њеној прилагођености. Овај начин се назива проста рулет селекција а може се користити и селекција заснована на рангирању генетских кодова или селекција заснована на принципу турнира.

GA користи два оператора за генерисање нових решења из постојећих и то су укрштање и мутација. Према Konak et al. (2006), оператор укрштања је најважнији оператор GA. Циљ укрштања је стварање нових стрингова разменом информација између стрингова, односно укрштање омогућава мешање две или више јединки и

стварање нових јединки, потомака. Након укрштања врши се мутација да би се обезбедила одређена случајност код нових хромозома. Избор овог оператора значајно утиче на перформансе GA. Мутација може довести до дегенеративних решења (које ће процес вероватно брзо елиминисати) или до потпуно новог решења. Мутацијом се тежи ка проналажењу глобалног оптимума. Итеративном применом оператора укрштања и мутације генерише се нова популација, у којој се добри гени чешће појављују, што у крајњем доводи до бољег решења. Процена популације врши се коришћењем функције фитнес која одређује да ли је неко решење боље од других.

GA се могу извршавати бесконачно дуго, па је потребно да се одреди критеријум заустављања. Постоји неколико критеријума завршетка GA: максимални број генерација, сличност јединки у популацији, најбоља јединка је поновљена максимални број пута, ограничено време извршавања GA, прекид од стране корисника. Комбиновање критеријума заустављања је добро решење, јер сваки од критеријума има добре и лоше стране. У овој студији максималан број генерација коришћен је као критеријум заустављања.

4.4.2 Оптимизација ројем честица

Оптимизација ројем честица спада у групу еволуционих метода за оптимизацију заснованих на популацији (Eiben and Smith, 2015). Овај метод је инспирисан друштвеним понашањем животиња као што су јата птица и јата риба, како би пронашли место са довољно хране. Када једна јединка пронађе повољан правац ка храни она тренуно преноси информације осталима. Све остале јединке брзо ће почети да је следе али не директно јер постоји компонента сопственог независног размишљања као и њено прошло памћење. Овакав метод симулира претрагу за максималну вредност функције циља.

Методе оптимизације засноване на интелигенцији роја називају се алгоритми инспирисаним понашањем, за разлику од генетских алгоритама, који се називају поступцима заснованим на еволуцији (Rao, 2020). Методу су предложили Kennedy and Eberhart (1995) и спада у стохастичке и хеуристичке методе јер се почетна решења из симулација побољшавају следећим итерацијама док се не добије оптимално решење. За разлику од генетских алгоритама, код PSO алгоритма не постоје еволуцијски оператори (укрштање или мутације).

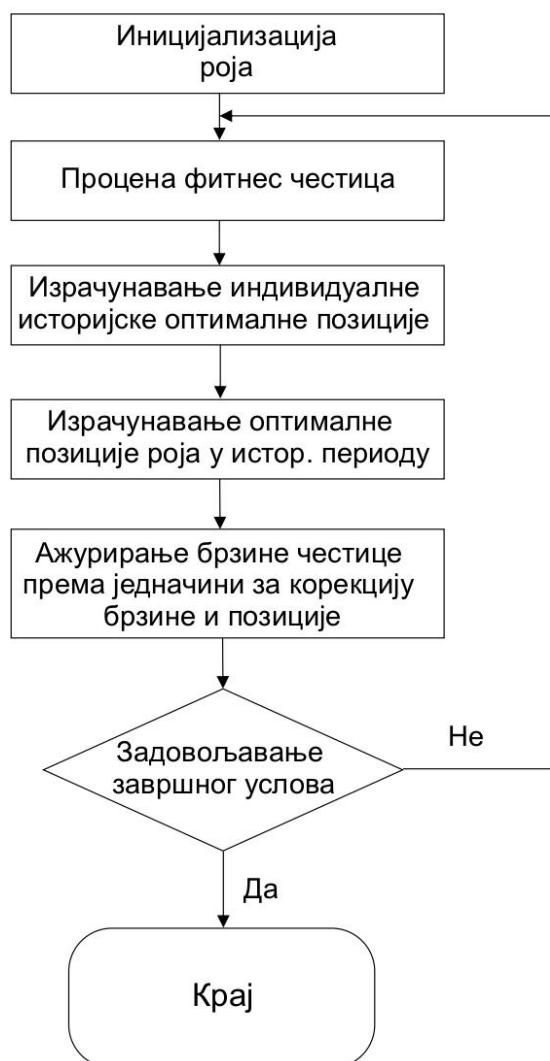
У PSO алгоритму свака јединка у роју назива се честица (particle) и има две карактеристике: положај и брзину, што значи смер лета и корак честице. Успех неких честица утицаће на понашање њихових вршњака. Свака честица прилагођава своју позицију ка оптимуму, ка месту са којег се ажурирају две најбоље позиције за све честице, односно „Pbest“ и за сваку честицу „Gbest“. У свакој итерацији k , свака честица ажурира своју брзину и позицију (Nedic et al., 2014):

$$v_i^{k+1} = \omega v_i^k + c_1 r_{1,i}^k (Pbest_i^k - x_i^k) + c_2 r_{2,i}^k (Gbest_i^k - x_i^k) \quad (4.15)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (4.16)$$

где је v брзина честице, x положај честице, ω инерцијална тежина, $r_{1,i}^k$ и $r_{2,i}^k$ случајни бројеви у интервалу $[0, 1]$, $Pbest_i^k$ и $Gbest_i^k$ су најбоље позиције које су до сада постигле сама честица и цео рој, респективно, c_1 и c_2 су коефицијенти убрзања, односно фактори учења. Фактор c_1 представља компоненту сазнања – најбољи положај сваког члана роја у прошлости а c_2 је социјална компонента – најбољи тренутни положај поменутог члана роја.

Процес претраживања одређују Pbest (индивидуални фактор) и Gbest (социјални фактор). Критеријум за заустављање итерација може да се одреди на више начина: извршење унапред задатог броја, стагнирање просечног или најбољег фитнеса, конкретно коришћен је корен средње квадратне грешке (RMSE) као критеријум заустављања, слика 4.2.



Слика 4.2 – Шематски приказ оптимизације ројем честица (PSO)
(базирано према Wang et al., 2018)

4.5 Статистички тестови

Тачност и перформансе проучаваних метода за процену ET_0 утврђене су упоређивањем срачунатих и осматрених података коришћењем разних статистичких индикатора (Ritter and Muñoz-Carpena, 2013). Чињеница је да не постоји општа сагласност и јединствена процедура за процену перформанси метода, али постоји прихваћено мишљење да анализи треба приступити у вишеобјективном смислу (Gupta et al., 1998). Наиме, сматра се да процена перформанси метода треба да укључи најмање један индикатор грешке апсолутне вредности (у јединицама варијабли), један бездимензионални индекс за квантификацију добротe прилагођавања и графички приказ

односа између процена метода и запажања (Legates and McCabe, 1999; Harmel et al., 2010; Biondi et al., 2012). Услед сложености, метрика са једним резултатом не може да одражава све аспекте хидролошких метода па је нужна употреба више критеријума за квантификацију различитих аспеката метода (Moriasi et al., 2007; Legates and McCabe, 1999; Gupta et al, 1998)

Перформансе анализираних метода, процењене су коришћењем шест статистичких индикатора: коефицијент детерминације (R^2), корен средње квадратне грешке (RMSE), средња грешка пристрасности (MBE), средња апсолутна грешка (MAE), Nash-Sutcliffe-ова ефикасност (NSE) и Kling-Gupta ефикасност (KGE).

Коефицијент детерминације описује степен колинеарности између израчунатих и измерених података. Вредност R^2 се креће од 0 до 1 где више вредности указују на мању варијансу грешке (Moriasi et al., 2007). Сматра се да је овај показатељ осетљив на високе екстремне вредности а неосетљив на пропорционалне разлике између метода и измерених података (Legates and McCabe, 1999).

Корен средње квадратне грешке је једна од најчешће коришћених статистика и представља стандардну девијацију резидуала и пружа информације о краткорочним перформансама метода. MAE представља просечну апсолутну разлику израчунатих и измерених вредности. RMSE и MAE описују разлику између симулација метода и посматрања у јединицама варијабле. Њихове вредности близу нуле указују на савршено уклапање, међутим, вредности мање од половине стандардне девијације посматрања могу се сматрати ниским. Резултати упоредне анализе RMSE и MAE (Willmott and Matsuura, 2005) указују да је MAE најприроднија мера просечне величине грешке, која је посебно погодна за процену регресије методе.

MBE пружа информације о дугорочним перформансама методе. Позитивна вредност даје просечан износ прецењивања у процењеним вредностима и обрнуто, са идеалном вредношћу 0. Сматра се да метод са нижим RMSE и апсолутним вредностима MBE заједно са вишим вредностима R^2 и NSE има добре резултате за дневну процену $E_{\text{ран}}$ на одређеној метеоролошкој станици (Lu et al., 2018)

Nash-Sutcliffe-ова ефикасност је бездимензионални коефицијент који одређује релативну величину варијансе у поређењу са варијансом измерених података (Nash and Sutcliffe, 1970). NSE показује колико добро се дијаграм посматраних и симулираних података уклапа у односу на линију 1:1. NSE се креће између $-\infty$ и 1,0 (укључујући 1),

при чему је 1 идеална вредност. Вредности између 0,0 и 1,0 се генерално посматрају као прихватљиви нивои перформанси, док вредности мање од 0,0 указују да је средња посматрана вредност бољи предиктор од симулиране вредности, што указује на озбиљне грешке у улазним или излазним подацима. Овај индикатор је често коришћен у хидрологији због своје флексибилности, односно лаке примене на различитим математичким моделима (Gupta et al., 2009). Индекс може бити осетљив на бројне факторе, као што су величина узорака, одступања и пристрасност величине. Препорука је да израчунавање вредности индекса треба да буде праћено другим анализама (McCuen et al, 2006)

Kling-Gupta ефикасност је побољшана верзија NSE индикатора. Овај индикатор представља робуснију меру слагања измерених и израчунатих вредности, са идеалном вредношћу од 1 (Gupta et al., 2009).

Прорачун наведених статистичких тестова спроводи се на основу једначина:

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})(m_i - \bar{m}))^2}{\sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2 \sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} \quad (4.17)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (c_i - m_i)^2} \quad (4.18)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (c_i - m_i) \quad (4.19)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |c_i - m_i| \quad (4.20)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - c_i)^2}{\sum_{i=1}^n (m_i - \bar{m})^2} \quad (4.21)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(R-1)^2 + (\frac{S_c}{S_m} - 1)^2 + (\frac{\bar{c}}{\bar{m}} - 1)^2} \quad (4.22)$$

где је: c_i i -та срачуната вредност, $\bar{c}$ просечна вредност срачунатих података, m_i i -та референтна вредност, $\bar{m}$ просечна вредност референтних података, n укупан број података, R коефицијент линеарне корелације, S_c стандардна девијација срачунатих података, S_m стандардна девијација референтних података.

Taylor-ов дијаграм представља додатак статистичким индикаторима, служи као графички приказ перформанси израчунатих и референтних података (Taylor, 2001). Дијаграм сажето приказује степен подударности између два поља: поље симулирано моделом („тестно“ поље) и референтно поље (које представља „истину“). Свака од тачака у дводимензионалном Тејлоровом дијаграму представља три статистике, односно три индикатора: стандардну девијацију (SD), коефицијент корелације (CC) и централну средње квадратну разлику (RMSD). Перформансе сваке методе представљене су једном тачком на дијаграму. Заједно, ове статистике пружају брз преглед степена подударности, омогућавајући да се процени колико тачно модел симулира референтну вредност. Дијаграм је посебно користан за процену сложених модела, односно за међусобно поређење и избор најповољније методе. Најтачнији метод је онај који је најближи референтној тачки.

5 РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА ПОСТОЈЕЋИХ И ОПТИМИЗОВАНИХ МЕТОДА РЕФЕРЕНТНЕ ЕВАПОТРАНСПИРАЦИЈЕ

5.1 Анализа осмотрених података

5.1.1 Подаци са аутоматске метеоролошке станице

Анализа прикупљених података са аутоматске метеоролошке станице обухватила је 8 метеоролошких параметра ($T_{\min}$, $T_{\max}$, T , минималну дневну релативну влажност ваздуха ($RH_{\min}$), максималну дневну релативну влажност ваздуха ($RH_{\max}$), RH , U_2 и R_s) на дневном нивоу. Прве анализе обухватиле су контролу квалитета података, односно испитивање хомогености података. Срачунате вредности p -value, за сва четири теста (Pettitt's, SNHT, Buishand's и von Neumann's ratio), у односу на дефинисани ниво значајности (5 %), за све податке, указале су на хомогеност података и могућност њихове даље примене у истраживању. Резултати тестова били су очекивани обзиром на квалитет и константност рада мерне опреме и самог процеса мерења, а и на чињеницу да није дошло до значајнијих промена у урбаној средини.

Статистичка анализа података спроведена је помоћу аритметичке средине (X_{sr}), стандардне девијације (σ), коефицијента асиметрије (C_s) и коефицијента спљоштености (C_k), табела 5.1. Највећу концентрацију података око X_{sr} има $RH_{\min}$, односно око 10 % података одступа од X_{sr} , док су са друге стране велике вредности σ уочљиве су код R_s , $T_{\min}$ и U_2 података. Вредност C_s показује велику симетричност функције густине расподеле за R_s и RH , готово идеалну симетричност за R_s . Позитивна асиметричност густине расподеле изражена је код $RH_{\min}$ и U_2 . Највећа негативна асиметричност (-1,304), издуженост функције густине расподела на леву страну, примећена је код $RH_{\max}$ података. Резултати C_k јасно издвајају $RH_{\max}$ и R_s дистрибуције података као лептокуртичне и платикуртичне, респективно. Од свих анализираних података, $T_{\max}$ серија има издуженост дистрибуције података најприближнију нормалној расподели.

Табела 5.1 – Статистичка анализа података са AWS

	$T_{\min}$	$T_{\max}$	T	$RH_{\min}$	$RH_{\max}$	RH	U_2	R_s
X_{sr}	12,285	26,012	18,471	36,499	86,460	63,414	0,362	14,369
σ	5,812	7,877	6,713	15,692	8,858	13,075	0,151	8,081
C_s	-0,350	-0,416	-0,327	0,893	-1,304	-0,112	0,972	0,014
C_k	-0,662	-0,319	-0,526	0,550	1,787	-0,482	1,812	-1,348

5.1.2 Подаци са конвенционалне метеоролошке станице

Податке са конвенционалне метеоролошке станице представљају $T_{\min}$, $T_{\max}$, T , $RH_{\min}$, $RH_{\max}$, RH , U_2 и R_s , на дневном нивоу. Ове групе података, исто као код AWS, подвргнуте су испитивању хомогености помоћу тестова: Pettitt's, SNHT, Buishand's и von Neumann's ratio. Резултати свих тестова показали су хомогеност временских серија и омогућили даљи рад са њима. Резултати тестова били су очековани уколико се узме у обзир да је CWS постављена у референтној средини, без икаквог значајнијег спољашњег утицаја и да је опремељена професионалном опремом којом руководе стручна лица.

Статистичка анализа података са CWS извршена је помоћу истих параметара као код AWS, односно помоћу X_{sr} , σ , C_s и C_k , табела 5.2. Стандардна девијација показује највећу концентрацију код $RH_{\max}$ и RH података, 13,6 % и 20 % је одступање у односу на X_{sr} , респективно. Највеће одступање временских серија у односу на X_{sr} уочено је код $T_{\min}$ и R_s података. Исто као код AWS, готово идеална симетричност густине расподеле вероватноће је уочена код R_s , а такође је веома велика и код RH . Посебно изражена негативна асиметричност густине вероватноће уочава се код $RH_{\max}$, док је позитивно C_s , нагнутост на десну страну расподеле вероватноће, изражена код $RH_{\min}$. Највеће вредности C_k код U_2 и R_s , издвајају ове расподеле података као најизраженије лептокуртичне и платикуртичне расподеле, респективно.

Табела 5.2 – Статистичка анализа података са CWS

	$T_{\min}$	$T_{\max}$	T	$RH_{\min}$	$RH_{\max}$	RH	U_2	R_s
X_{sr}	11,968	24,944	17,925	47,472	85,981	68,226	0,805	15,684
σ	5,979	7,961	6,814	18,284	11,714	13,654	0,303	7,064
C_s	-0,370	-0,357	-0,285	0,763	-1,266	-0,167	0,608	-0,069
C_k	-0,657	-0,353	-0,550	0,112	0,883	-0,446	1,667	-1,214

5.1.3 Компаративна анализа података аутоматске и конвенционалне метеоролошке станице

Подаци о минималној температури ваздуха добијени са AWS, генерално су виши од минималних температура добијених са CWS. Ово је разумљиво јер је AWS смештена у урбаним градским условима, док су подаци добијени са CWS која се налази на вишој надморској висини и окружена је вегетацијом и дрвећем што је од значаја посебно када су у питању минималне температуре ваздуха. Највеће разлике уочене су у октобру и новембру, и то 12 % и 55 %, респективно, док су најмање разлике у летњим месецима. Средње разлике су веома мале и не прелазе 0,4 °C. Истоветан закључак је и код максималне температуре с тим да је средња разлика нешто већа од 1 °C. Када је у питању RH, више вредности су забележене код података са CWS, а иста ситуација је и код упоређивања брзине ветра. Подаци о R_s прикупљени са CWS имају више вредности од оних прикупљених са AWS, односно просечне вредности разлика R_s између станица су релативно мале (1,315 MJ m⁻² dan⁻¹). Октобар и новембар се издвајају као месеци са највећим R_s разликама, 19 % и 24 %, респективно, док је мај месец са минималним разликама (0,1 %).

Упоредна анализа података спроведена је аналитички уз помоћ статистичких тестова и графички, путем хистограма и дијаграма расејања. У табели 5.3 приказане су вредности статистичких индикатора два низа по параметрима. Резултати показују високу корелацију између низова када је у питању температура, R^2 за $T_{\min}$ и $T_{\max}$ је 0,833 и 0,816 респективно. Уочљиво је да корелација не постоји код брзине ветра (0,065), јер је AWS окружена објектима (дрвеће, куће) вишим од 2 m, а такође постоји и значајна разлика у надморској висини станица. Комбинована употреба R^2 , RMSE и NSE указује да су највеће поклапање имали подаци $T_{\min}$, $T_{\max}$ и R_s . Параметар R_s заостаје за $T_{\min}$ и

$T_{\max}$ за 2 % односно 4 %, респективно. Најнижи, односно најповољнији RMSE забележен је (пored U_2) код $T_{\min}$ са 2,489 °C, нешто је слабији код $T_{\max}$ и R_s док је код релативне влажности најнеповољнији (11,6 %). Према показатељима NSE и KGE најповољнији параметар је $T_{\min}$, док је на другом месту R_s са вредностима $NSE = 0,625$ и $KGE = 0,754$. Генерално, на основу тестова, може се закључити да параметар $T_{\min}$ има највеће слагање између станица, док RH има највеће одступање.

Табела 5.3 – Статистички индикатори метеоролошких параметара између две станице

	R^2	RMSE	MBE	MAE	NSE	KGE
$T_{\min}$	0,833	2,489	-0,317	1,956	0,816	0,904
$T_{\max}$	0,816	3,638	-1,068	2,666	0,786	0,895
RH	0,474	11,603	4,811	8,586	0,211	0,676
U_2	0,065	0,537	0,444	0,460	-11,624	-0,752
R_s	0,656	4,943	1,315	3,703	0,625	0,754

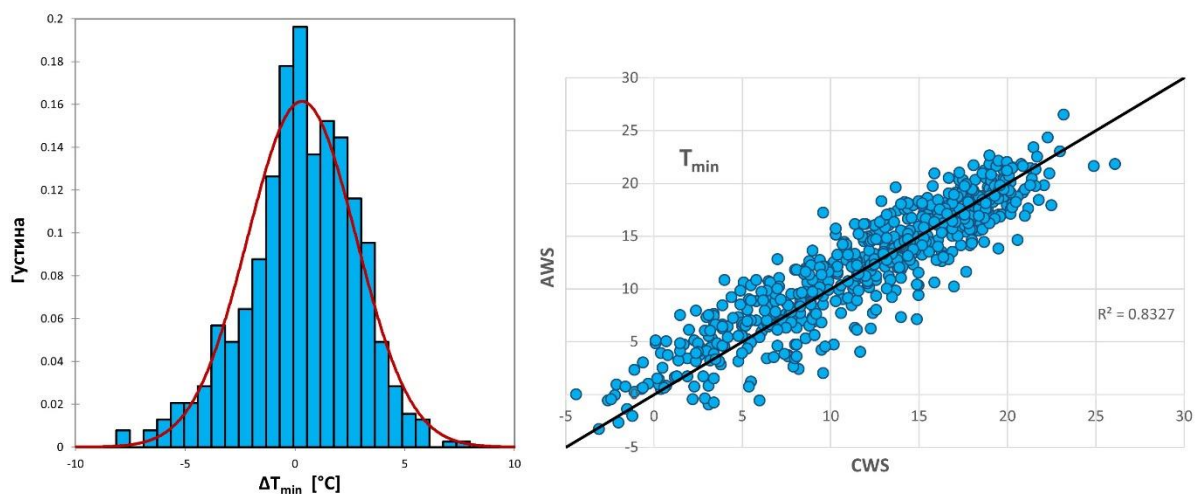
За визуелну анализу података са AWS и CWS израчуната је разлика за сваку променљиву:

$$\Delta V = V_{AWS} - V_{CWS} \quad (5.1)$$

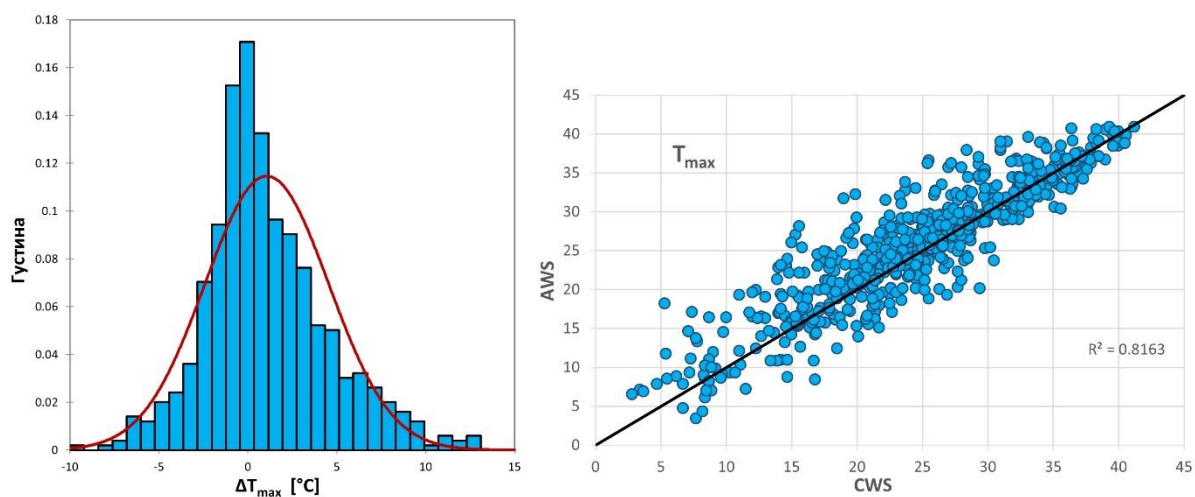
где је ΔV разлика између променљивих креираних са AWS и CWS.

На слици 5.1. приказан је однос података (хистограм са нормалном расподелом и дијаграм расејања) за $T_{\min}$, $T_{\max}$, RH, U_2 и R_s . На дијаграму расејања који приказују међузависност променљивих за које не постоји функционална зависност, приказани су односи података са AWS и CWS. На свим дијаграмима је присутна растућа или позитивна зависност података, код R_s је овај вид зависности значајно ослабљен, док код U_2 не постоји. Резултати дијаграма расејања се поклапају са вредностима статистичких тестова, где је $T_{\min}$ параметар који најмање одступа између станица, а следи га $T_{\max}$. На основу дијаграма за $T_{\min}$ и $T_{\max}$, закључује се да је однос ових параметара између станица константан, односно да нема значајнијих промена током анализираног периода. Вредности RH показују изражену дисперзију података при максималним вредностима, а вредности R_s изражену дисперзију имају у односу на просечине вредности података, за цео анализирани период. Вредности брзине ветра, као што су показали статистички

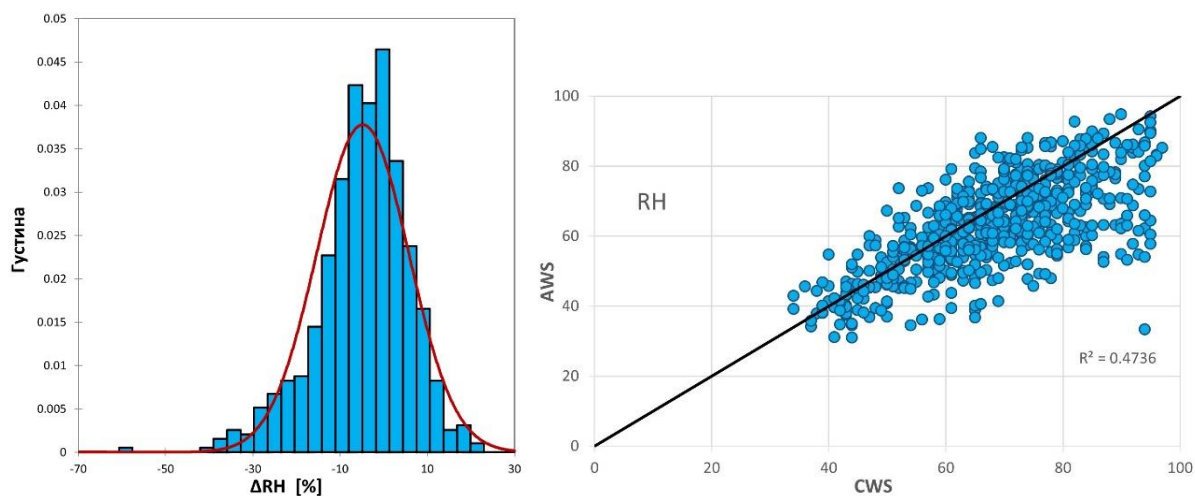
тестови, имају најмање поклапање између станица, тако да у односу на линију 1:1 може се рећи да су подаци у колизији.



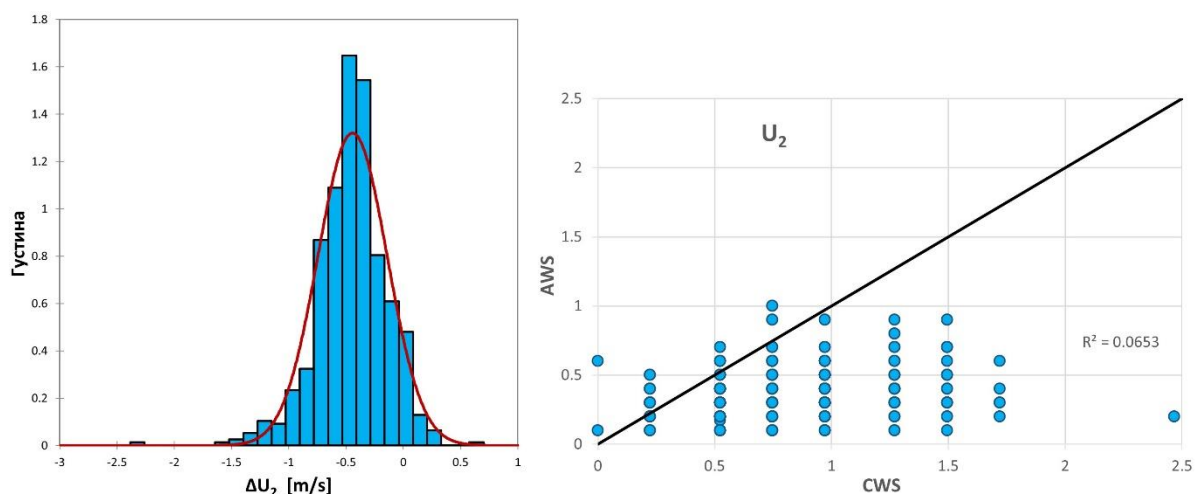
Слика 5.1.1 – Хистограм и дијаграм расејања података са AWS и CWS за $T_{\min}$



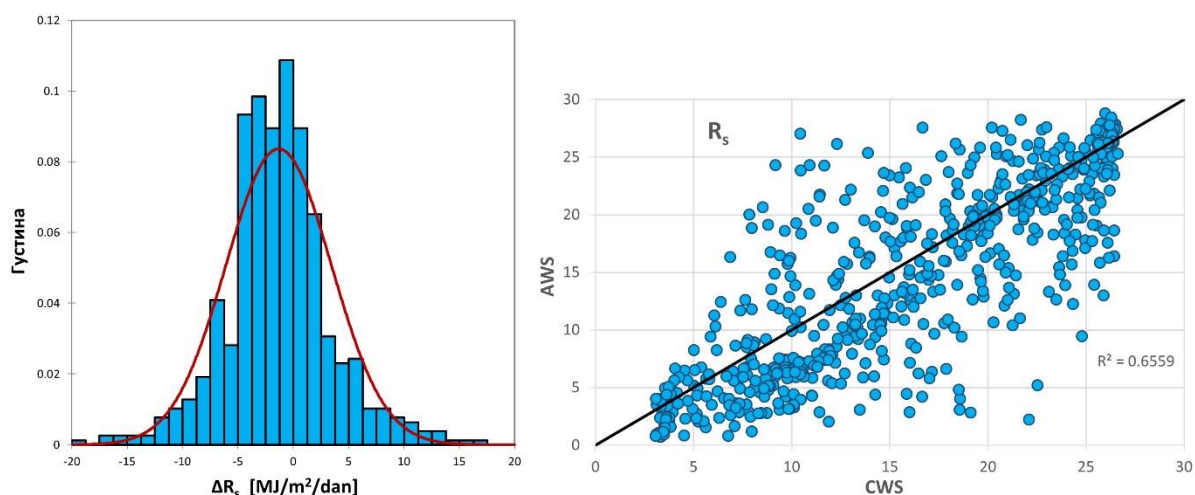
Слика 5.1.2 – Хистограм и дијаграм расејања података са AWS и CWS за $T_{\max}$



Слика 5.1.3 – Хистограм и дијаграм расејања података са AWS и CWS за RH



Слика 5.1.4 – Хистограм и дијаграм расејања података са AWS и CWS за U_2



Слика 5.1.5 – Хистограм и дијаграм расејања података са AWS и CWS за R_s

Слика 5.1 – Хистограми (лево) и дијаграми расејања (десно) података са AWS и CWS за променљиве T_{min} , T_{max} , RH , U_2 и R_s

Резултати анализе показали су да постоје изражене разлике између података са AWS и CWS. Под претпоставком да су сензори као и конвенционални мерни инструменти добро калибрисани, разлике у вредностима могу се приписати удаљености између станица и разликама у локацији, односно окружењу самих станица. У току дана рефлексије од оближњих зграда могу изазвати значајне варијације (повећање или смањење) параметара.

5.1.4 Подаци са испаритеља класе А

Податаке са испаритеља представљају вредности испаравања из суда класе А, на дневном нивоу. Слично као код података са AWS и CWS, подаци о $E_{\text{пан}}$ подвргнути су испитивању хомогености користећи тестове Pettitt's, SNHT, Buishand's и von Neumann's ratio. Тестови су показали да је временска серија $E_{\text{пан}}$ хомогена и да је могуће користити податке о испаравању у анализама. С обзиром на квалитет мерне опреме и самог процеса мерења резултати хомогености су очекивани. Такође, не треба изоставити чињеницу да током периода осматрања није било значајнијих промена урбане средине.

Резултати статистичке анализа података за $E_{\text{пан}}$ податке износе $X_{\text{sr}} = 2,825$, $\sigma = 1,966$, $C_s = 0,450$, $C_k = -0,879$. Велике вредности σ су пре свега последица постојања малог броја екстремних вредности код осматрених података, док резултат C_k указује да је реч о платикуртичној расподели података.

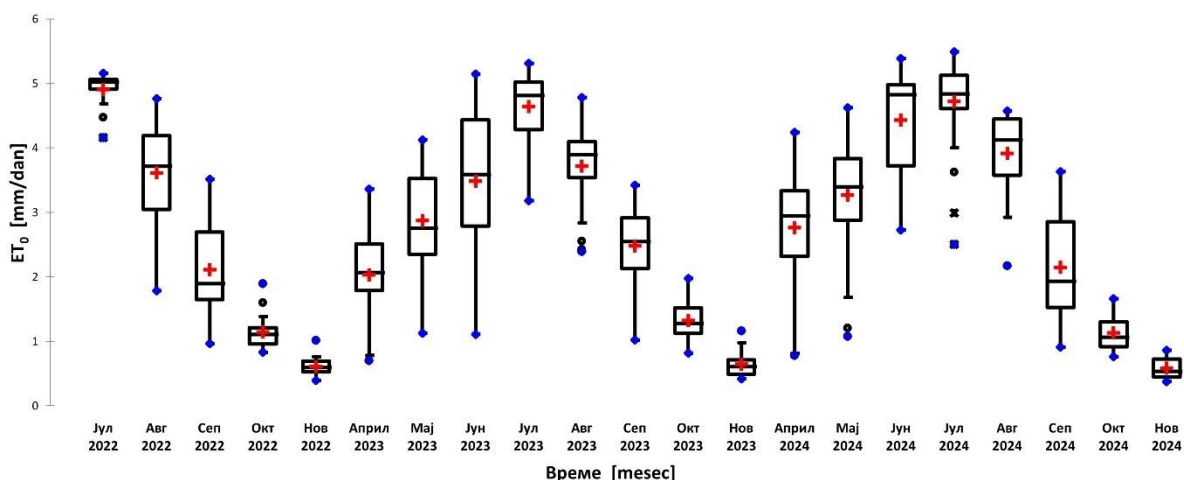
Табела 5.4 показује дневне минималне, максималне, просечне и сумарне месечне вредности $E_{\text{пан}}$, за целокупан анализирани период. Највише вредности $E_{\text{пан}}$ уочене су током летњег периода (јун – август), док су минималне вредности забележене током јесењег периода (октобар – новембар). Просечне максималне вредности су посебно изражене у јулу и износе $7,6 \text{ mm dan}^{-1}$. Упоређењем просечних месечних минималних, максималних и средњих вредности по годинама приметано је да су екстремне вредности посебно изражене у 2024. години. Такође, тренд анализа за исте групе података показала је опадајући тренд, који је највише изражен код росечних средњих вредности $E_{\text{пан}}$. Тренд просечних сумарних месечних $E_{\text{пан}}$ вредности понаша се супротно од ранијих анализа, односно јавља се растући тренд током целокупног анализираног периода. Просечан пораст просечних сумарних месечних вредности $E_{\text{пан}}$ износи 33,7 %, односно по годинама за 2023. и 2024., 25 % и 11,5 %, респективно.

Табела 5.4 – Преглед просечних дневних и сумарних месечних E_{pan} вредности по годинама

Месец	E_{pan} (mm dan ⁻¹)											
	2022.				2023.				2024.			
	min	max	pros.	suma	min	max	pros.	suma	min	max	pros.	suma
Април					0,2	4,2	2,0	61,2	1,2	6,0	3,1	94,2
Мај					0,7	4,7	3,1	94,9	0,7	6,8	3,5	108,2
Јун					0,8	6,3	3,6	107,6	1,6	6,5	4,8	143,0
Јул	4,3	7,7	6,3	95,2	2,9	7,0	5,2	161,4	3,0	8,1	5,6	173,1
Август	1,4	7,0	4,0	124,8	1,7	6,9	3,9	121,2	2,2	6,5	4,8	145,4
Септембар	0,0	3,4	1,8	53,3	0,8	3,2	2,3	69,4	0,3	5,0	2,1	61,8
Октобар	0,1	1,5	0,9	27,8	0,4	3,3	1,4	45,2	0,4	3,2	1,0	29,9
Новембар	0,0	1,3	0,6	17,2	0,0	2,1	0,6	18,5	0,0	0,9	0,4	12,2

5.2 Прорачун референтне евапотранспирације

Вредности ET_0 за AWS, за цео период истраживања, приказане су на слици 5.2. Посматрајући месечне вредности издвајају се април, мај, јун и август као месеци код којих је дошло до смањења вредности ET_0 , за приближно 26 %, 12 %, 20 % и 8 %, респективно, у периоду од 2022. до 2024. године. Са слике 5.2 јасно се уочава да су конзистентније вредности ET_0 у јулу 2022 и октобру и новембру 2022., 2023. и 2024. године. У јулу 2022. значајна концентрација ET_0 је изнад 5,1 mm dan⁻¹, док новембар (2022., 2023. и 2024.) има значајну концентрацију испод 0,65 mm dan⁻¹. Велика дисперзија вредности евапотранспирације уочена је у јуну 2023. а такође постоји и у 2022. (август и септембар), 2023. (мај) и 2024. (јун и септембар) за које је отприлике слична. Просечна годишња вредност ET_0 на дневном нивоу, у урбаним условима, за 2022. износи 2,21 mm dan⁻¹, за 2023. је 2,66 mm dan⁻¹ а за 2024. је 2,87 mm dan⁻¹. Иако постоји очигледно повећање просечне годишње вредности (16,8 % између 2022. и 2023. и 7,6 % између 2023. и 2024. године), дневне вредности ET_0 показују благо опадајући тренд за цео посматрани период.

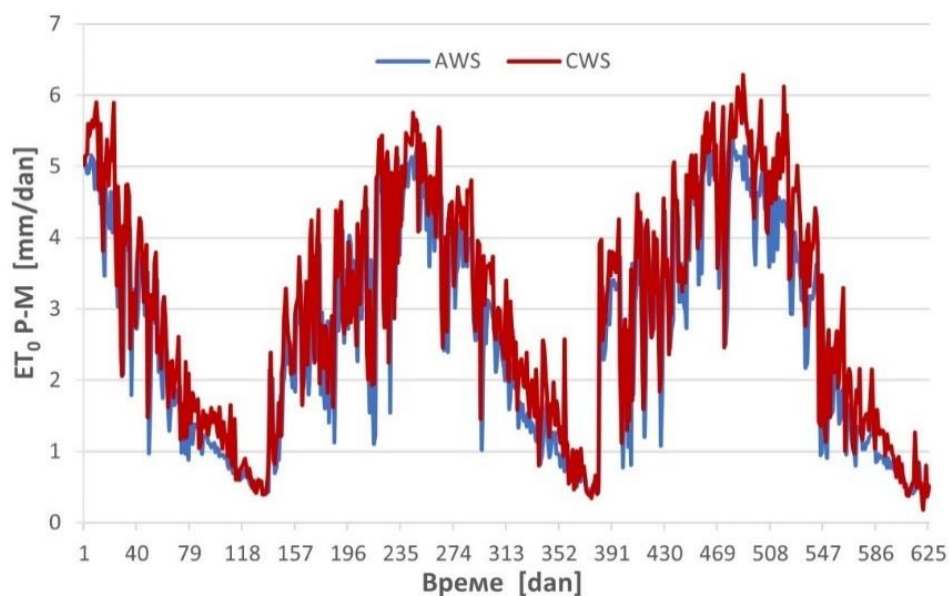


Слика 5.2 – Срачунате вредности ET_0 по методи P-M код AWS

5.2.1 Компаративна анализа референтне евапотранспирације са аутоматске и конвенционалне метеоролошке станице

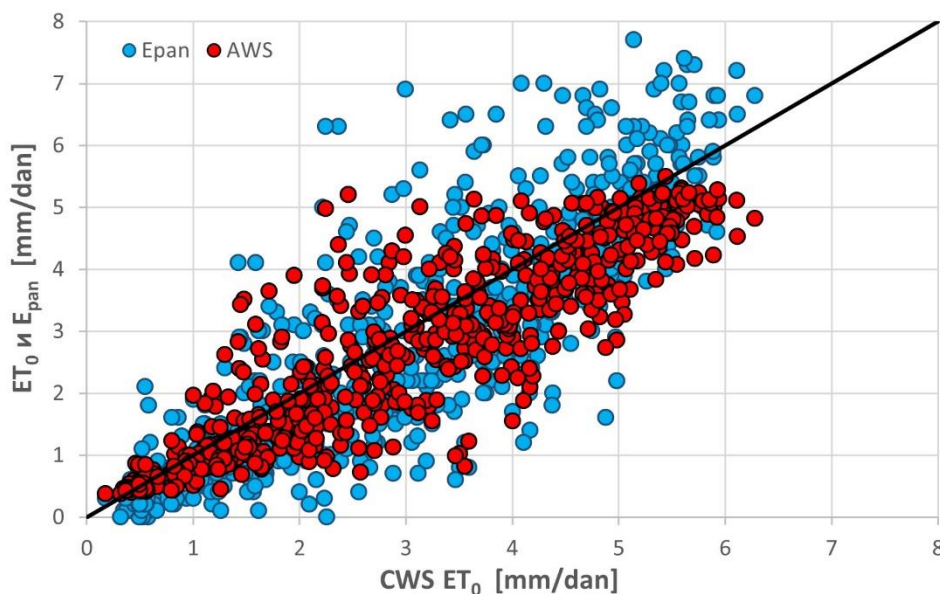
Испитивање утицаја урбане средине на потребе за водом референтне културе (траве) у урбаним условима спроведено је упоређивањем вредности ET_0 у референтним условима (подаци са CWS) и ET_0 у урбаним условима (подаци са AWS). Анализа срачунатих вредности ET_0 (по референтној методи – P-M) издвојила је јул месец као месец са максималним вредностима ET_0 , са просечном вредношћу од $5,14 \text{ mm dan}^{-1}$ за референтну и $4,76 \text{ mm dan}^{-1}$ за урбану средину. Највећа вредност ET_0 износила је $6,28 \text{ mm dan}^{-1}$ (16.7.2024.) за CWS, а за AWS износила је $5,49 \text{ mm dan}^{-1}$ (8.7.2024.). Месец са најнижим вредностима ET_0 је новембар, са минималном вредношћу од $0,18 \text{ mm dan}^{-1}$ (26.11.2024.) за CWS, и $0,37 \text{ mm dan}^{-1}$ (25.11.2024.) за AWS.

Поређењем вредности ET_0 урбане и референтне средине, јасно се уочава да су вредности ET_0 у референтној око 11 % више неголи у урбаној средини, слика 5.3. Ова разлика је посебно изражена током летњих месеци, са екстремним вредностима ET_0 , (јул, август и септембар), док током новембра готово да нема разлике између ET_0 . Директним поређењем ET_0 са AWS и CWS, уочава се да вредности имају исти образац понашања и да су у пролећном периоду и почетком лета посебно изражене варијације ET_0 .



Слика 5.3 – Вредности референтне евапотранспирације код AWS и CWS

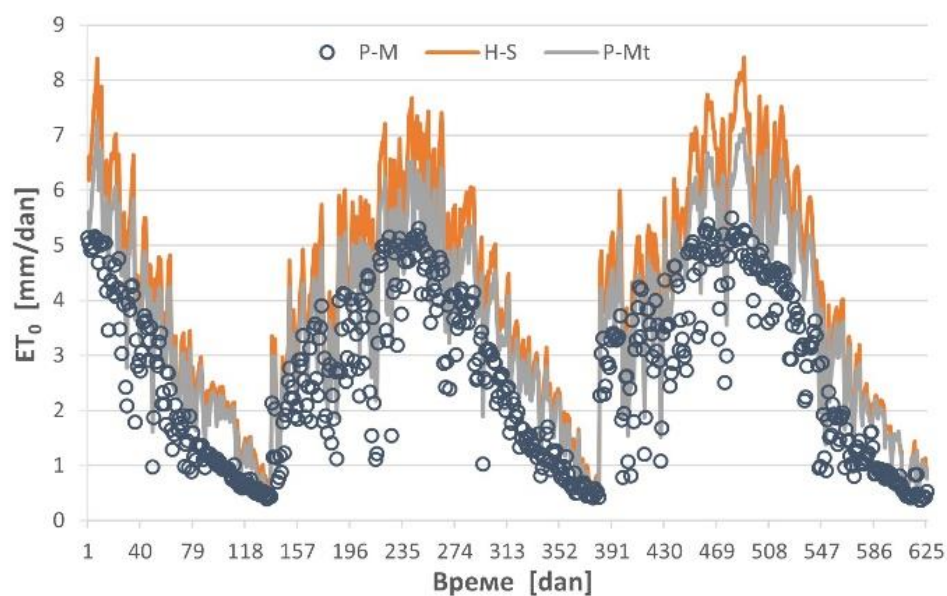
Анализа међусобног односа ET_0 са CWS и ET_0 са AWS и $E_{\text{пан}}$ приказана је на слици 5.4. Вредности ET_0 са AWS имају изражену концентрацију, али и склоност ка потцењивању вредности ET_0 , у односу на ET_0 са CWS. Потцењивање је изражено за све распоне вредности ET_0 . Дисперзија која се јавља код AWS везана је за распоне вредности ET_0 од 3–5 mm dan⁻¹. Вредности $E_{\text{пан}}$ су равномерно распоређене око линије 1:1, с тим да имају велику дисперзију, која је посебно доминантна за $E_{\text{пан}}$ веће од 5 mm dan⁻¹, односно код већих вредности $E_{\text{пан}}$ приметно је прецењивање вредности ET_0 са CWS. Ниже вредности $E_{\text{пан}}$ и ET_0 са AWS имају израженију концентрацију ET_0 вредности, него ли више. На основу слике 5.4 може се закључити да је боље слагање између ET_0 са CWS и AWS, него ли са $E_{\text{пан}}$.



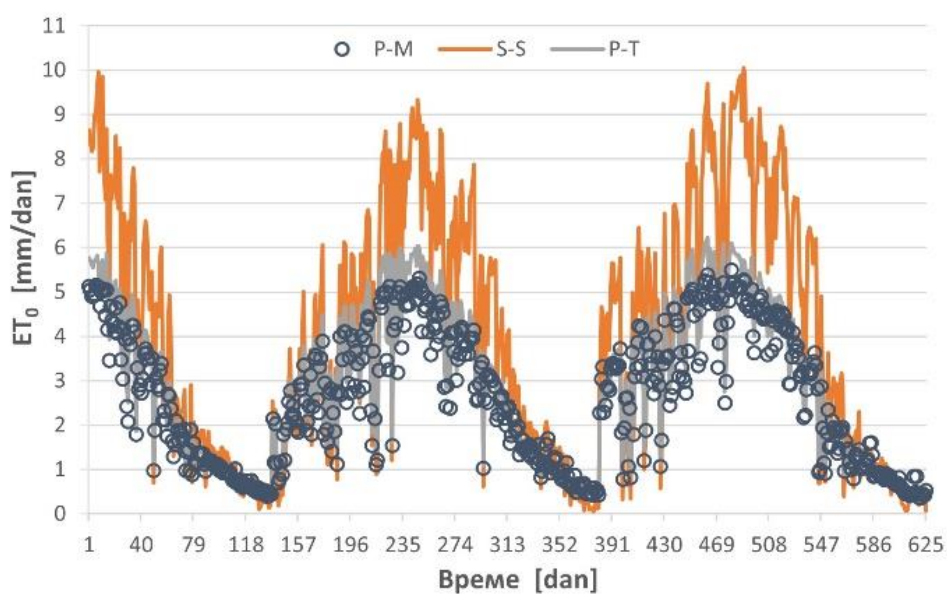
Слика 5.4 – Дијаграм расејања између ET_0 CWS и E_{pan} и ET_0 AWS

5.2.2 Компаративна анализа метода референтне евапотранспирације у урбаној средини

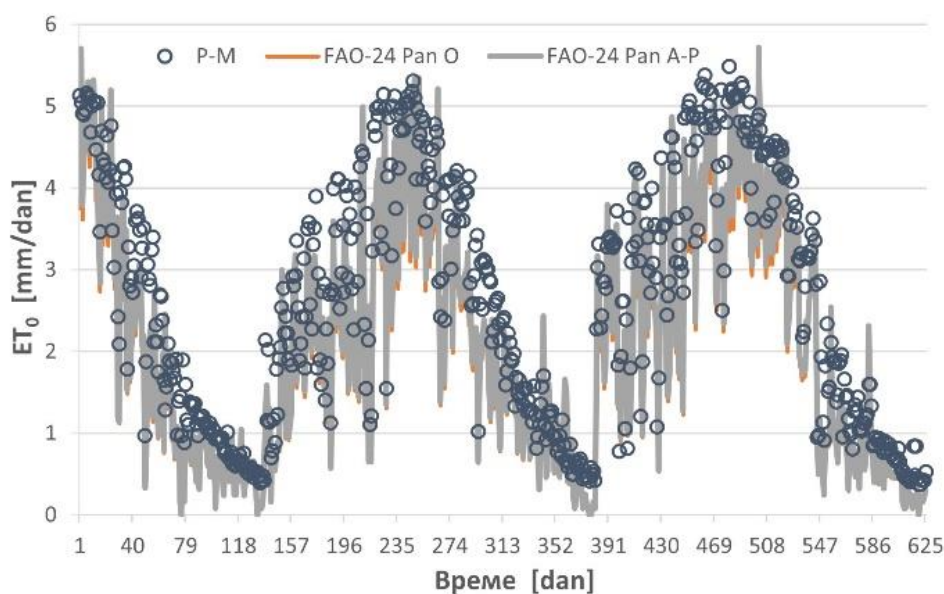
Компаративна анализа између вредности ET_0 срачунате применом референтне једначине FAO-56 Penman-Monteith и предложених метода, за цео анализирани период, показује да група евапорационих једначина (FAO-24 Pan O и FAO-24 Pan A-P) има најбоље поклапање са референтном методом, слика 5.5. С обзиром да ова група анализираних метода показује готово незнатна међусобна одступања између метода, може се рећи да обе методе имају велико подударење са Р-М једначином у мају, октобру и новембру 2023. и 2024. године. Такође, приметно је да евапорациона група потцењује референтне ET_0 вредности, током периода јул-септембар за све посматране године. Након евапорационе групе, температурна група се издваја по усклађености са референтним ET_0 вредностима. Заједничко за све методе (H-S и P-Mt) ове групе је да константно прецењују референтне вредности ET , током целокупног период истраживања. Радијациона група ET_0 (S-S и P-T) издваја се генерално као група са највећим одступањима од Р-М, група прецењује референтне вредности. Месеци октобар и новембар, за све посматране године, издвајају се као периоди када радијационе једначине остварују значајну (скоро идеалну) усклађеност са референтним подацима, док су највећа одступања уочљива током летњих месеци, са екстремним вредностима ET_0 , слика 5.5.



Слика 5.5.1 – Карактеристике температурне групе ET_0 метода за анализирани период



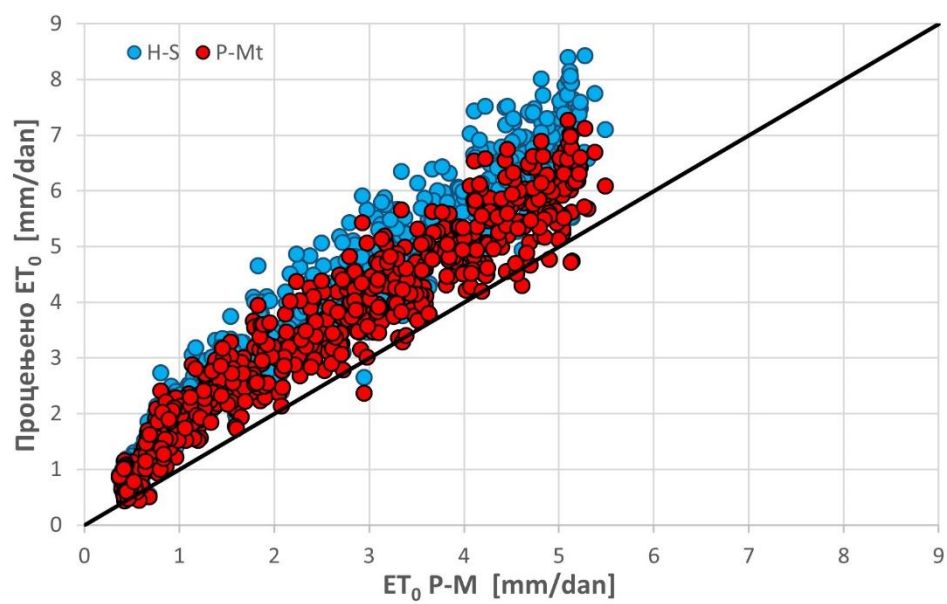
Слика 5.5.2 – Карактеристике радијационе групе ET_0 метода за анализирани период



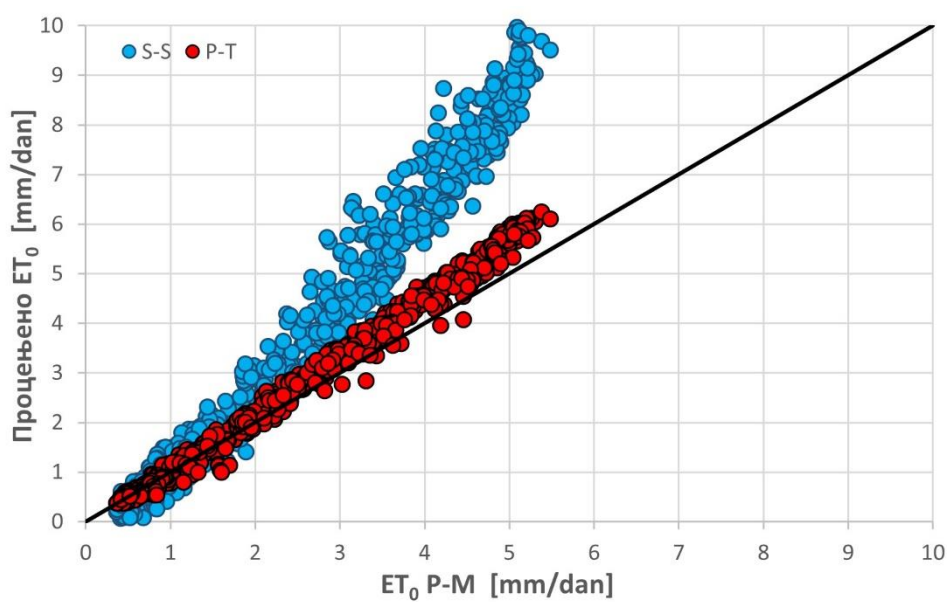
Слика 5.5.3 – Карактеристике евапорационе групе ET_0 метода за анализирани период

Слика 5.5 – Карактеристике три групе ET_0 метода за анализирани период

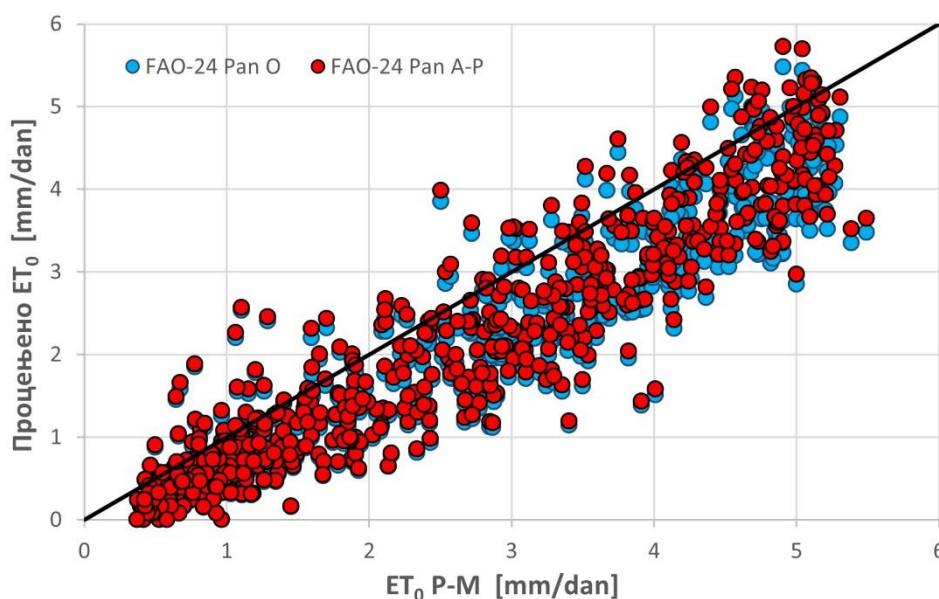
Као додатни вид анализе понашања ET_0 метода наспрам Р-М методе у урбаним условима, посматрани су дијаграми расејања посебно за сваку групу метода, слика 5.6. Групно гледано, слика 5.6 потврђује резултате слике 5.5, где је евапорациона група издвојена као група која има најсличније резултате са Р-М методом. Међутим, приметна је значајна дисперзија ET_0 вредности код обе једначине евапорационе групе, са константним својством метода да потцењују ET_0 вредности. Код радијационе групе јавља се драстична разлика између метода које је чине, док им је заједничка карактеристика да прецењују ET_0 при вишим вредностима. Једначина Р-Т има велику концентрацију вредности и минимална одступања у односу на линију 1:1, док су одступања код S-S драстична. Одступања (прецењивање ET_0), код обе методе, почиње од око $2,5 \text{ mm dan}^{-1}$ и расте са порастом вредности, да би при максималним вредностима ET_0 износило и до 4 mm dan^{-1} , између метода. Слика 5.6 потврђује резултате добијене на основу слике 5.5, односно да све температурне методе прецењују референтне вредности ET_0 , добијене Р-М једначином.



Слика 5.6.1 – Дијаграм расејања између ET_0 P-M и температурне групе ET_0 модела



Слика 5.6.2 – Дијаграм расејања између ET_0 P-M и радијационе групе ET_0 модела



Слика 5.6.3 – Дијаграм расејања између ET_0 P-M и евапорационе групе ET_0 модела

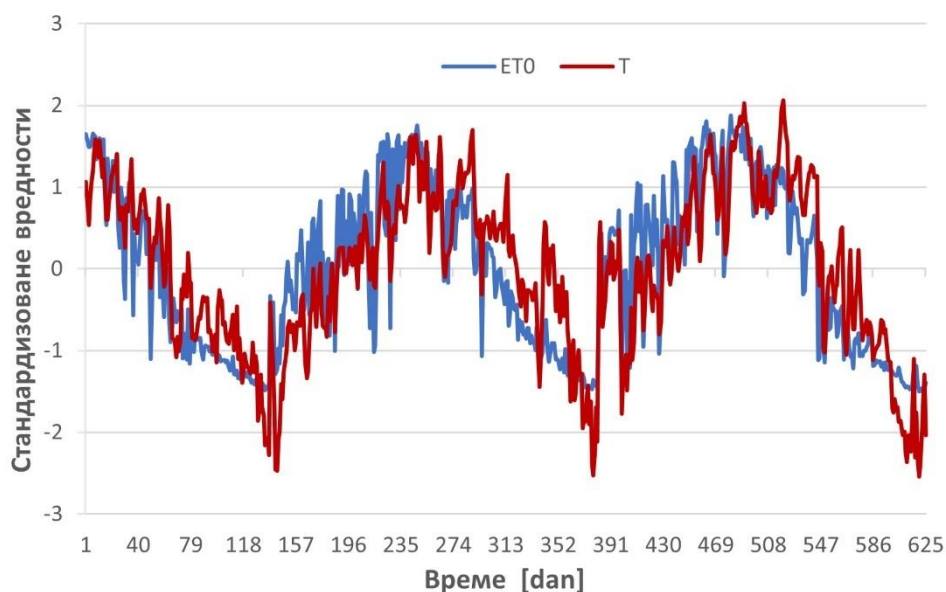
Слика 5.6 – Дијаграми расејања између ET_0 P-M и процењених вредности ET_0

Анализа статистичких тестова показала је да P-T има најбоље поклапање са референтним ET_0 вредностима, а на другом месту је евапорациони метод FAO-24 Pan A-P са вредностима тестова $R^2 = 0,990$, $RMSE = 0,396 \text{ mm dan}^{-1}$, $MBE = -0,262 \text{ mm dan}^{-1}$, $MAE = 0,309 \text{ mm dan}^{-1}$, $NSE = 0,931$, $KGE = 0,808$ и $R^2 = 0,865$, $RMSE = 0,746 \text{ mm dan}^{-1}$, $MBE = -0,495 \text{ mm dan}^{-1}$, $MAE = 0,603 \text{ mm dan}^{-1}$, $NSE = 0,757$, $KGE = 0,796$, респективно. Добри резултати P-T методе су и очекивани, с обзиром да се методологија прорачуна у великој мери ослања на методологију P-M методе. Као једначина која највише одступа од референтних вредности ET_0 издваја се S-S са вредностима тестова $R^2 = 0,964$, $RMSE = 1,915 \text{ mm dan}^{-1}$, $MBE = 1,325 \text{ mm dan}^{-1}$, $MAE = 1,417 \text{ mm dan}^{-1}$, $NSE = -0,598$, $KGE = -0,009$. Метод H-S константно прецењује референтне вредности током целог периода истраживања, при чему су одступања посебно изражена за време летњих месеци. Нешто мања одступања од H-S показује P-Mt метод, који током пролећних месеци има извесних поклапања са P-M једначином. Метод S-S показује скоро дупло веће вредности ET_0 од P-M и готово је неупотребљив за моделовање ET_0 сем за месеце октобар и новембар. Добијени резултати за H-S и S-S методе су доста разочаравајући, поготову ако се узме у обзир да они не користе податке о ветру, чији утицај у урбаној средини може да буде занемарљив.

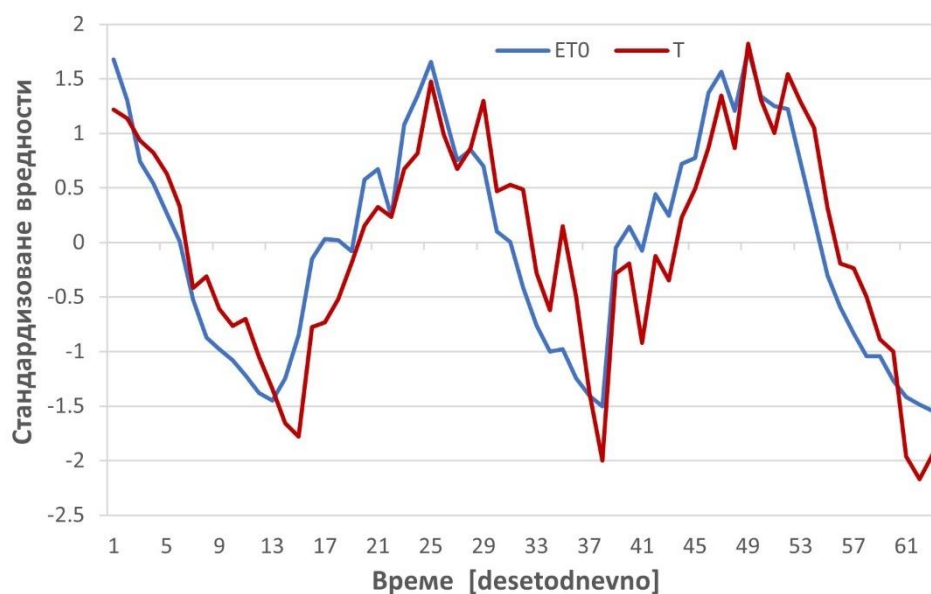
5.3 Анализа осетљивости метода референтне евапотранспирације у урбаним условима

На процес евапотранспирације утиче енергија која обезбеђује латентну топлоту испаравања, транспорт водене паре изнад површине испаравања и снабдевање влагом на површини испаравања, односно процес зависи од многих метеоролошких фактора као што су температура, брзина ветра, градијент притиска, сунчево зрачење које такође зависи од локације, годишњег доба и слично. Анализа утицаја појединих метеоролошких фактора на ЕТ, због саме природе проблема, мора се сагледати кроз различите временске скале, на дневном, десетодневном и месечном нивоу. Како би се омогућило поређење ЕТ и фактора, с обзиром да су у различитим јединицама, спроведена је стандардизација посматраних величина.

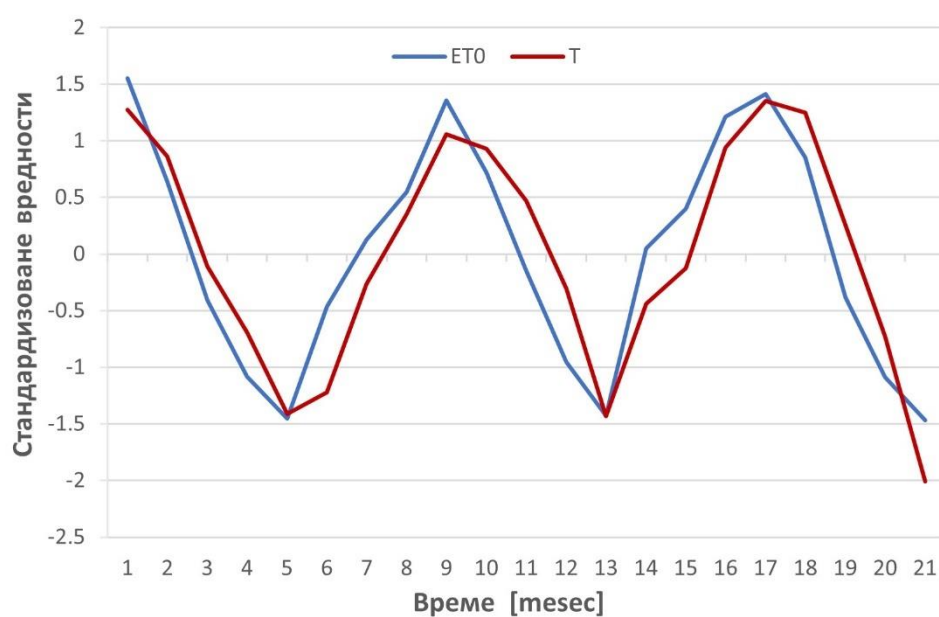
Слика 5.7 показује како зависност ET_0 и T варира са временском скалом. На дневном нивоу уочава се разлика између посматраних величина током пролећњег и јесењег периода, с тим да је она најизраженија у новембру месецу (за све посматране године). Најбоље слагање на дневном нивоу је у летњим месецима, кад T достиже свој максимум. Разлика се постепено повећава са повећањем временске скале, па је код месечне скале уочљив временски размак од око месец дана између ET_0 и T , посебно у пролеће и јесен.



Слика 5.7.1 – Зависност ET_0 од T на дневној скали



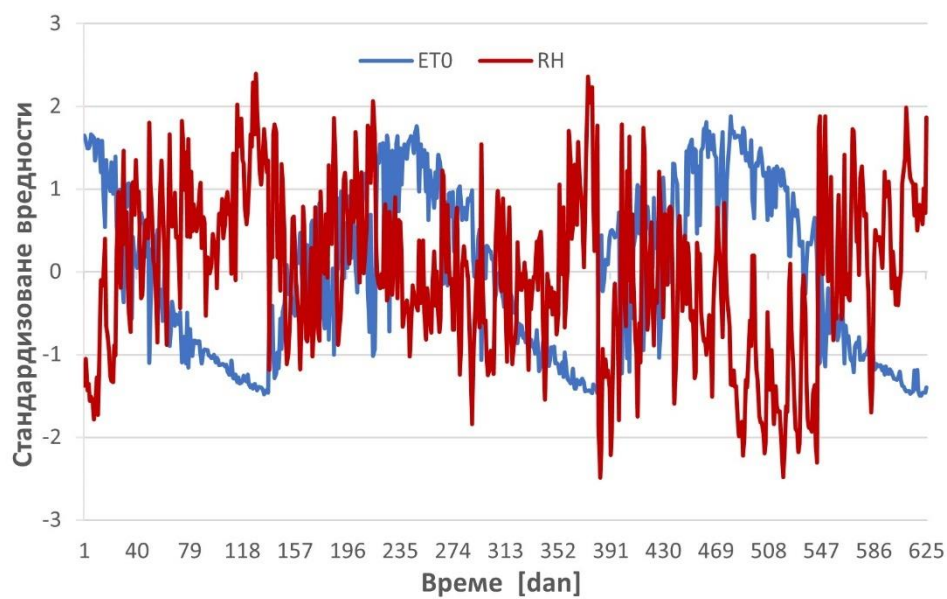
Слика 5.7.2 – Зависност ET_0 од T на десетодневној скали



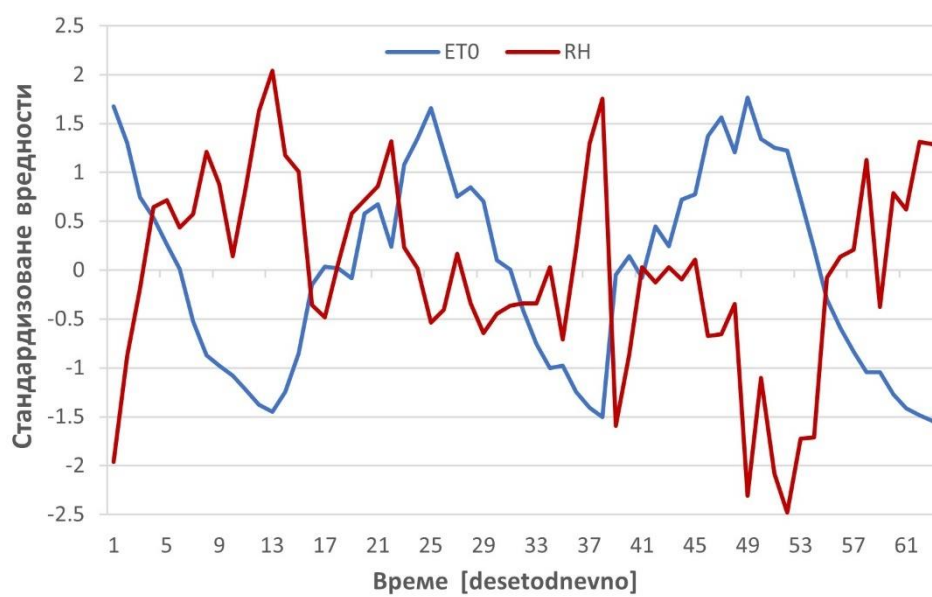
Слика 5.7.3 – Зависност ET_0 од T на месечној скали

Слика 5.7 – Зависност ET_0 од T при различитим временским скалама

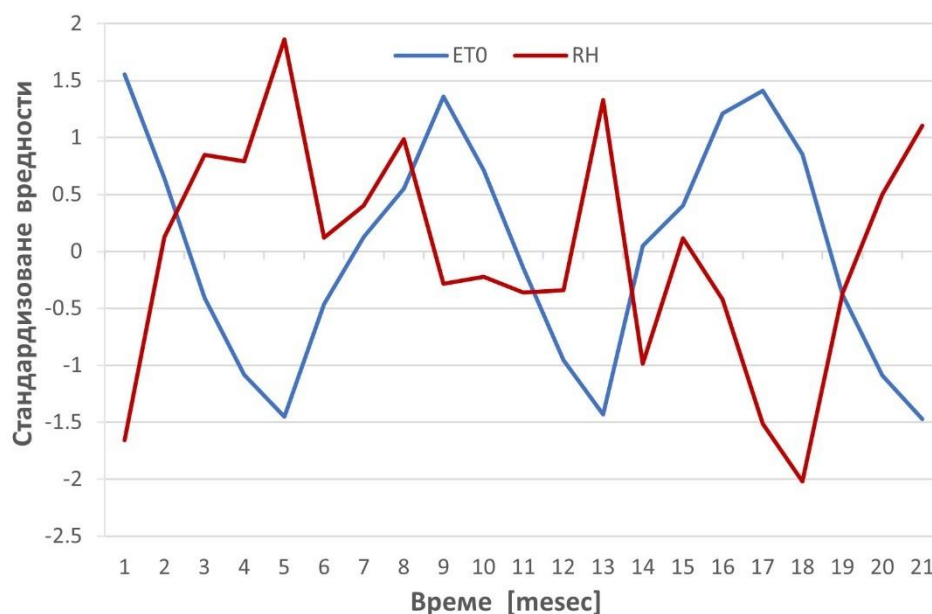
Утицај RH на ET_0 се најјасније види на крупнијим скалама, односно временске скале на десетодневном и месечном нивоу показују да нема никакве зависности између величина, слика 5.8. Током априла месеца (скала на дневном нивоу) приметна је зависност између величина. Закључује се да је RH обрнуто сразмерна са ET_0 и максимална несразмера је 3,5 јединица.



Слика 5.8.1 – Зависност ET_0 од RH на дневној скали



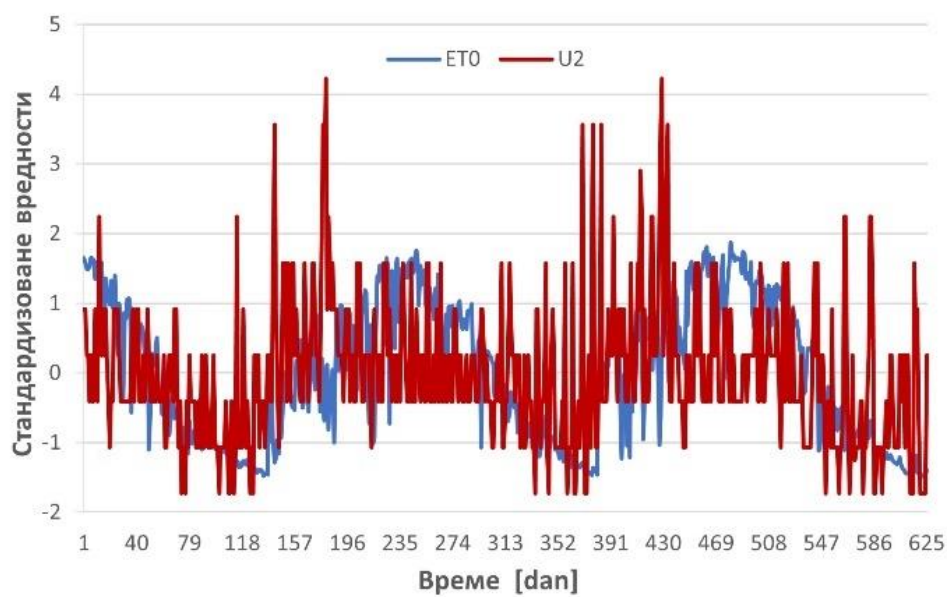
Слика 5.8.2 – Зависност ET_0 од RH на десетодневној скали



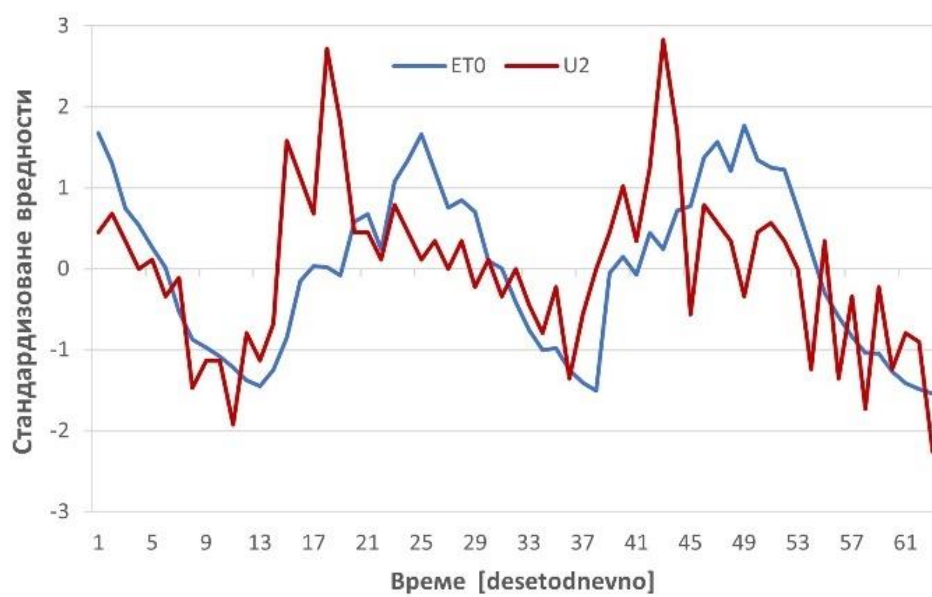
Слика 5.8.3 – Зависност ET_0 од RH на месечној скали

Слика 5.8 – Зависност ET_0 од RH при различитим временским скалама

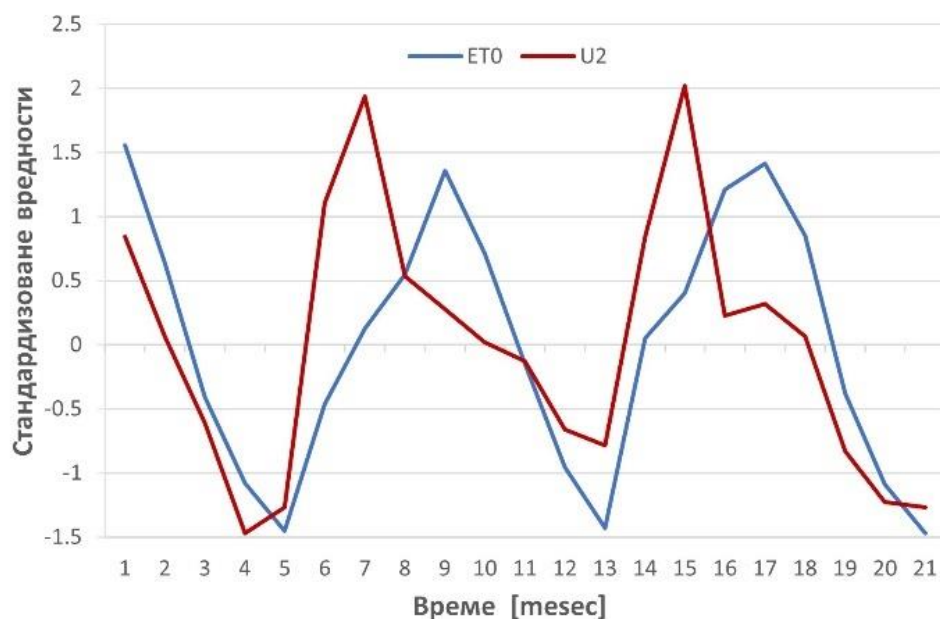
Слика 5.9 показује да U_2 није контролни фактор код урбане ET_0 , и да степен зависности од ветра опада са повећањем временске скале. Велика неслагања приметна су код дневне скале, где U_2 драстично расте или опада а код ET_0 нема промена. Код десотодневне скале приметно је поклапање величина само на почетку анализираног периода (првих 60 дана). На месечном нивоу јасно је приметно померање између величина, у новембру оно износи око месец дана а током летњег периода и до 2 месеца. Такође приметно је да долази до повећања ET_0 иако се U_2 смањује.



Слика 5.9.1 – Зависност ET_0 од U_2 на дневној скали



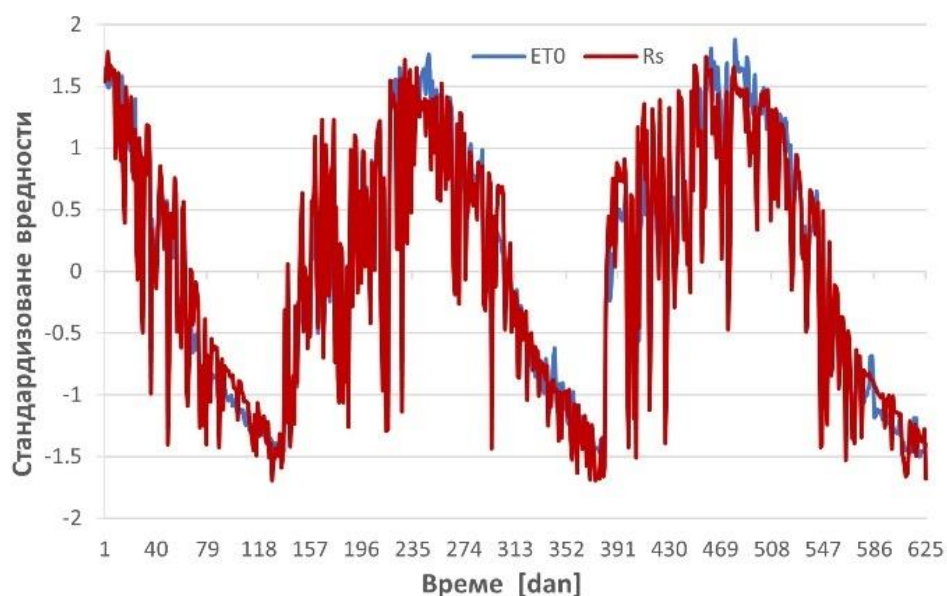
Слика 5.9.2 – Зависност ET_0 од U_2 на десетодневној скали



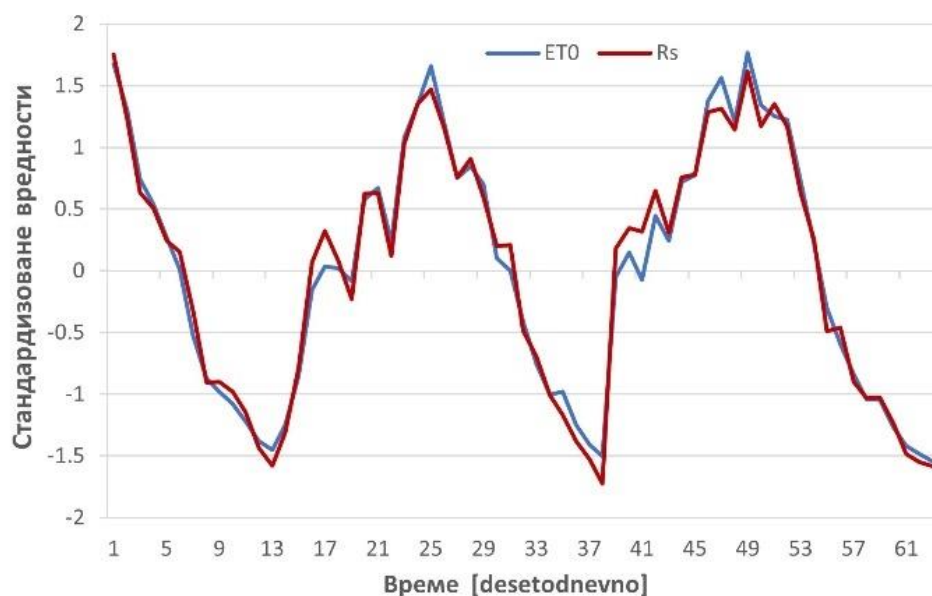
Слика 5.9.3 – Зависност ET_0 од U_2 на месечној скали

Слика 5.9 – Зависност ET_0 од U_2 при различитим временским скалама

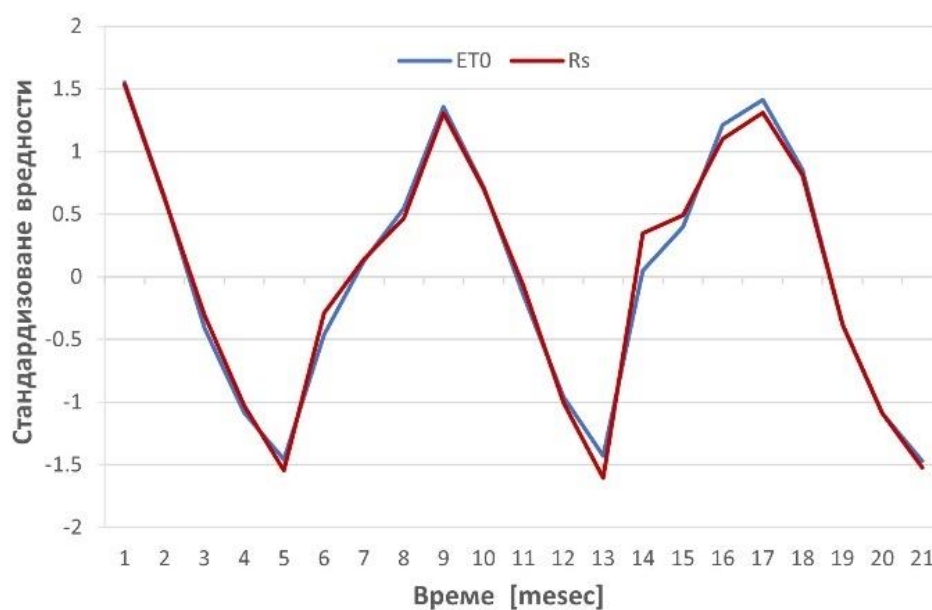
На основу слике 5.10 може се рећи да је R_s најдоминантнији фактор код ET_0 . Промена зрачења верно се одсликава на промену ET_0 , која је готово идеално уочљива на месечној скали док код дневне и десетодневне постоје занемарљиво мала одступања. Одступања код дневне скале су посебно уочљива током екстремних вредности.



Слика 5.10.1 – Зависност ET_0 од R_s на дневној скали



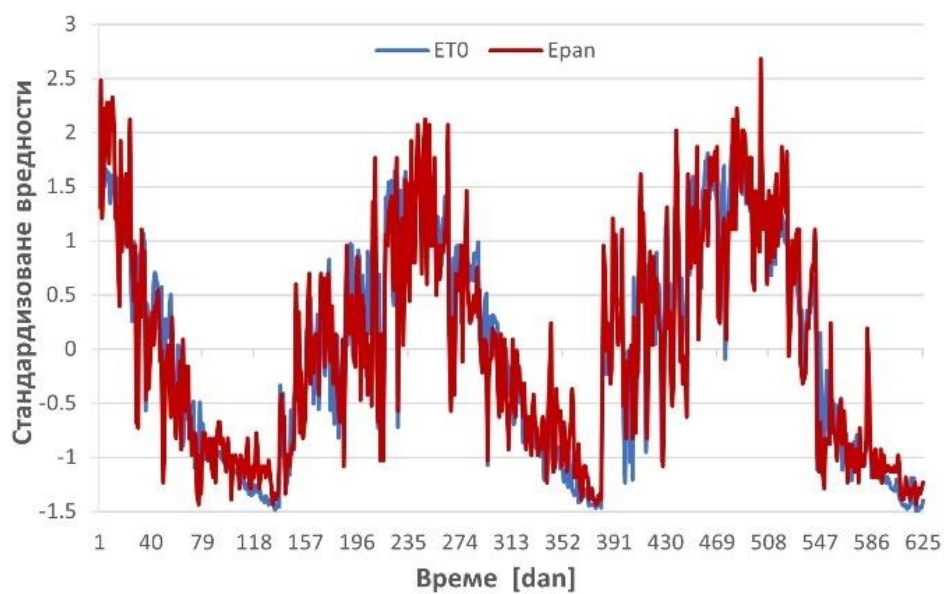
Слика 5.10.2 – Зависност ET_0 од R_s на десетодневној скали



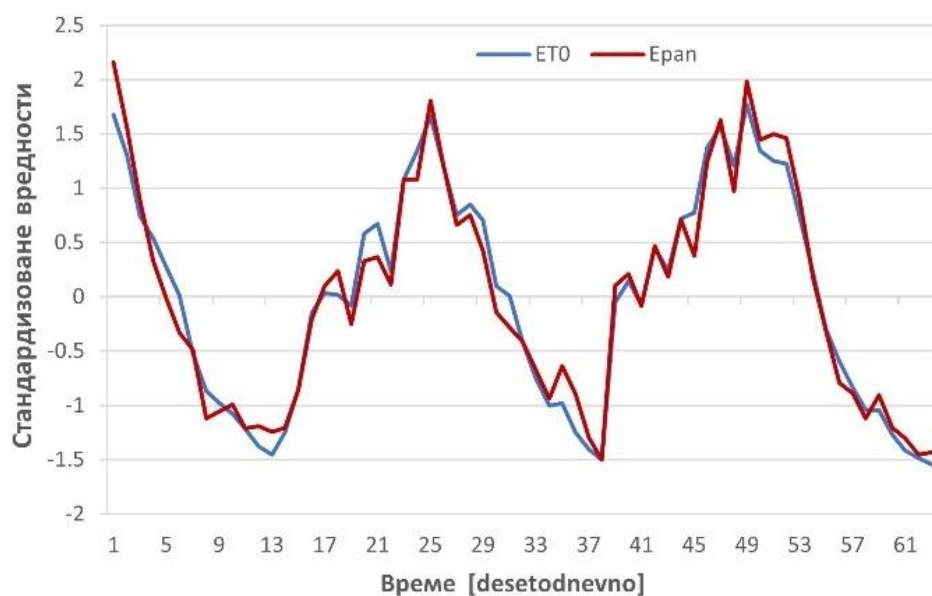
Слика 5.10.3 – Зависност ET_0 од R_s на месечној скали

Слика 5.10. – Зависност ET_0 од R_s при различитим временским скалама

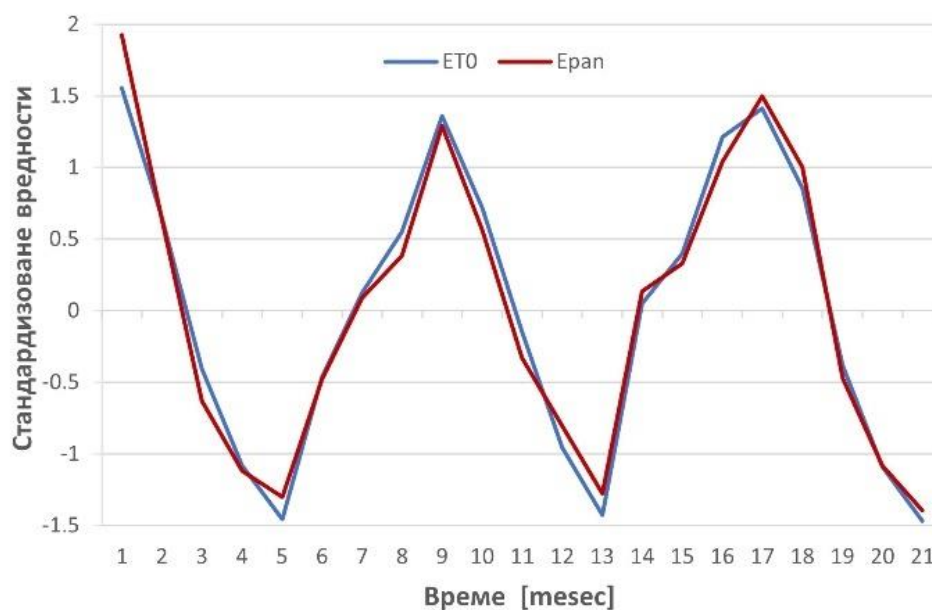
На слици 5.11 види се да скоро нема варирања између E_{pan} и ET_0 . Неке варијације постоје на дневном нивоу али са повећањем временског корака та разлика постаје не приметна. Фактори који утичу на евапорацију су истоветни са онима који дефинишу ET_0 а међусобна веза је преко коефицијента пана.



Слика 5.11.1 – Зависност ET_0 од E_{pan} на дневној скали



Слика 5.11.2 – Зависност ET_0 од E_{pan} на десетодневној скали



Слика 5.11.3 – Зависност ET_0 од E_{pan} на месечној скали

Слика 5.11 – Зависност ET_0 од E_{pan} при различитим временским скалама

Општи закључак је да улога варијабли које утичу на ЕТ варирају са временском скалом. Варијација ветра на дневној бази је најуочљивија, док најбољу корелацију на свим нивоима има сунчево зрачење и испаравање.

Анализа зависности ET_0 од метеоролошких фактора послужила је као основа за анализу осетљивости ET_0 , односно омогућила је да се издвоји и додатно анализира утицај метеоролошких фактора (T_{min} , T_{max} , U_2 , R_s , RH_{max} и RH_{min}) на референтну ET_0 (срачунату Р-М једначином). Вредности коефицијента осетљивости, на различитим скалама, приказане су на слици 5.12. Дневне вредности SC показују велике флукуације.

Вредности SC код температура показују већу осетљивост ET_0 на варијације T_{max} , него на промене T_{min} . Овакав утицај оправдава се чињеницом да су вредности T_{max} увек више од T_{min} , у било које доба дана, ноћи и године, па је и њихов утицај већи у Р-М једначини. Са слике 5.12 уочава се да SC од T_{min} на дневном и годишњем нивоу показује најмање флукуације од осталих параметара и да веома често достижу вредност 0, на дневном нивоу, односно да ET_0 често није осетљива на промене T_{min} . Овакав утицај T_{min} на ET_0 потврђује и вредност од 0,047 за јединствени SC(T_{min}). Као најосетљивији месец на T_{min} издваја се август са просечном вредношћу SC од 0,082, просечна вредност SC за све остале месеце је 0,041. SC за T_{max} има константне промене на дневном и месечном

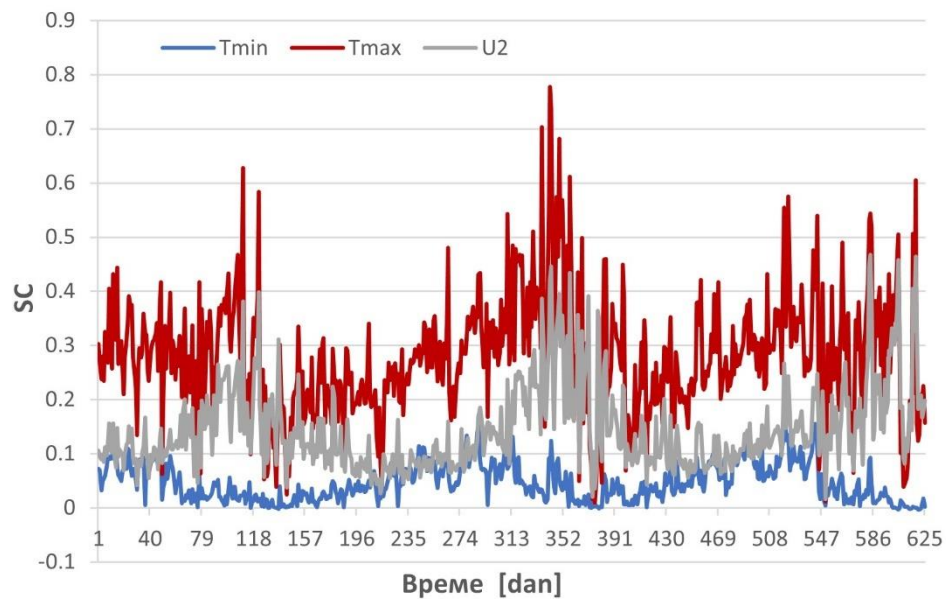
нивоу. Промене за дневно $SC(T_{\max})$ посебно долазе до изражаја током октобра и новембра за све посматране године, где достиже максималну вредност од 0,77, односно показује високу зависност. Просечне месечне вредности $SC(T_{\max})$ за октобар и новембар 0,357 и 0,312 издвајају наведене месеце као најосетљивије на промене $T_{\max}$, респективно. Са вредношћу од 0,278 за $SC(T_{\max})$ закључује се да је ET_0 високо осетљива на утицај $T_{\max}$.

Коефицијент осетљивости за U_2 показује сличан образац понашања као $T_{\max}$, на дневном нивоу, с тим да су дневне вредности $SC(U_2)$ ниже. Месечне вредности $SC(U_2)$ издвајају месец октобар, са вредношћу 0,218, као најосетљивији месец на U_2 и месец јун (0,082) као месец са најмањом осетљивошћу ET_0 на U_2 . $SC(U_2)$ са просечном вредношћу од 0,144 издваја U_2 као параметар који има средњу осетљивост на ET_0 . Битно је нагласити да је приметан растући тренд осетљивости ET_0 на U_2 на обе анализиране временске скале, током целог посматраног периода.

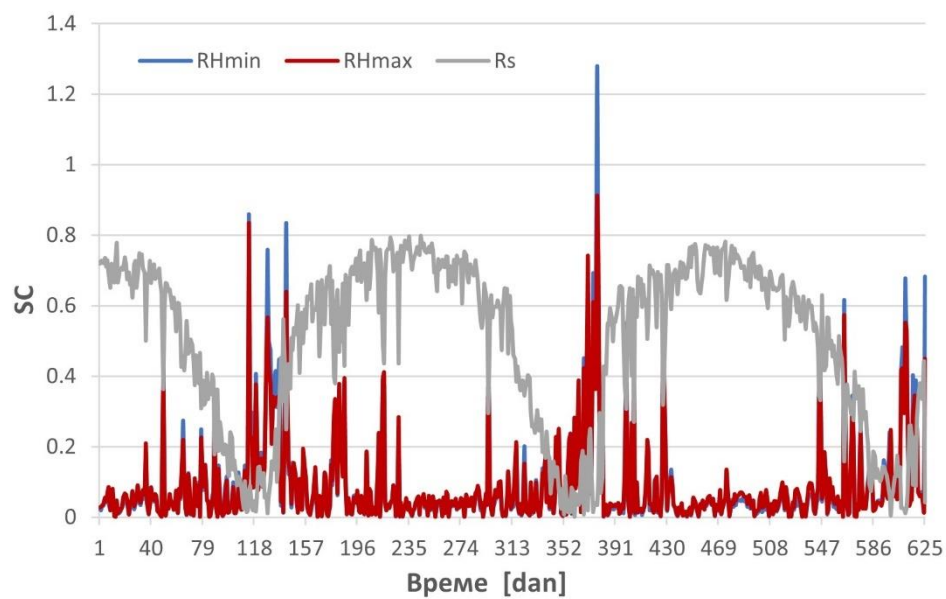
Понашање SC на месечном и дневним нивоу за параметар R_s , одступа од понашања осталих анализираних параметара и утицаја на ET_0 . Иако се тенденција понашања $SC(R_s)$ јасно уочава, постоје извесне флукуације на дневном нивоу. Утицај R_s је најизраженији током летњих месеци, $SC(R_s)$ за јул износи просечно 0,722, док је најмањи утицај R_s у новембру (0,110). Са просеном вредношћу од 0,496 $SC(R_s)$, сматра се да R_s има високу осетљивост код ET_0 . Анализа укупних-просечних вредности SC за целокупан анализиран период на првом месту ставља R_s , као параметар на који је ET_0 највише осетљива, а затим следе $T_{\max}$ и U_2 , респективно.

Анализа дневних и месечних вредности SC за релативну влажност указује на да нема значајније разлике између $RH_{\min}$ и $RH_{\max}$, односно вредности коефицијента су готово идентичне, с тим да $SC(RH_{\min})$ има израженије екстремне вредности. Током целокупног посматраног периода вредности коефицијента за релативну влажност су веома мале, у распону од 0 до 0,1. Дрastiчно повећање SC јавља се у другој половини новембра, при чему је дневна максимална вредност $SC(RH_{\min})$ износила 1,28 (26.11.2023.). Сходно оваквом понашању SC , новембар је месец са највећом осетљивости на промене релативне влажности са просечном месечном вредности SC за $RH_{\min}$ и $RH_{\max}$ од 0,253 и 0,231, респективно. Јул се издваја као месец када је најмања осетљивост ET_0 на промену релативне влажности (минималне и максималне). Анализом вредности јединственог SC за $RH_{\min}$ (0,089) и $RH_{\max}$ (0,090), закључује се да су вредности ET_0 незнатно осетљиве на промене релативне влажности, односно да се релативна влажност

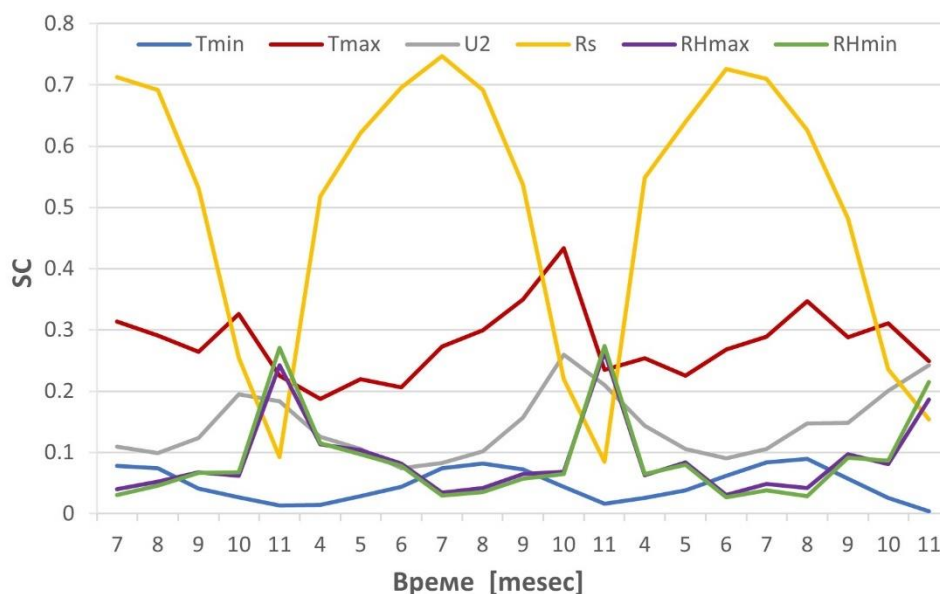
налази на претпоследњем месту анализираних параметара по њиховој осетљивости на ET_0 вредности.



Слика 5.12.1 – Вредности SC за T_{min} , T_{max} и U_2 на дневном нивоу



Слика 5.12.2 – Вредности SC за RH_{min} , RH_{max} и R_s на дневном нивоу



Слика 5.12.1 – Вредности SC за T_{min} , T_{max} , U_2 , R_s , RH_{max} и RH_{min} на месечном нивоу

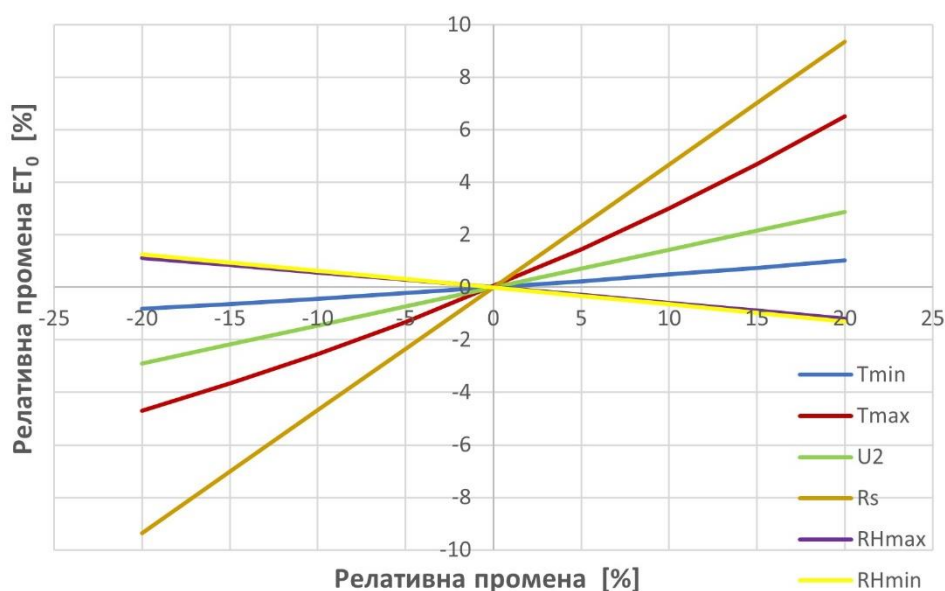
Слика 5.12 – Вредности SC на дневном и месечном нивоу

Да би се утврдио степен утицаја климатских параметара на ET_0 , анализирана је процентуална релативна промена ET_0 услед релативне промене параметара, који су коришћени за прорачун Р-М, табела 5.5. Релативна промена ET_0 и параметара визуелно је сагледана преко криве осетљивости, слика 5.13. Јасно се уочава да постоји линеарана варијација осетљивости између односа релативних промена евапотранспирације и параметара. Примећује се да постоји позитиван тренд осетљивости на промену свих анализираних параметара, сем код RH_{min} и RH_{max} , код којих се уочава негативан тренд. Такође, на основу слике 5.13 закључује се да је промена ET_0 више осетљива на смањење параметара R_s , T_{max} и U_2 , док је код T_{min} супротна ситуација.

Слика 5.13 потврђује коначне резултате SC, односно урбана ET_0 је највише осетљива на промене R_s . Максимална позитивна промена (+20 %) R_s , изазива за 2,8 % и 8,3 % већу промену ET_0 у односу на T_{max} и T_{min} при истој промени, респективно. Након R_s , T_{max} је фактор који има највише утицаја на промену ET_0 , а затим следи U_2 . Мали утицај U_2 на ET_0 је очекиван обзиром да је реч о урбаној средини, односно средини са високим препрекама за ветар – куће и дрвеће. Такође, закључује се да ET_0 , по методи Р-М, није осетљива на промене релативне влажности.

Табела 5.5 – Промена ET_0 (%) у односу на промену метеоролошких параметара

	-20 %	-15 %	-10 %	-5 %	5 %	10 %	15 %	20 %
T_{min}	-0,819	-0,632	-0,433	-0,223	0,236	0,484	0,747	1,023
T_{max}	-4,690	-3,666	-2,547	-1,327	1,441	3,002	4,691	6,515
U_2	-2,909	-2,177	-1,448	-0,723	0,720	1,436	2,150	2,861
R_s	-9,351	-7,014	-4,676	-2,338	2,338	4,676	7,014	9,351
RH_{max}	1,124	0,850	0,571	0,288	-0,292	-0,588	-0,888	-1,191
RH_{min}	1,255	0,947	0,634	0,319	-0,322	-0,647	-0,975	-1,306



Слика 5.13 – Криве осетљивости за различите метеоролошке параметре

Спроведене анализе осетљивости нису узеле у обзир истовремени ефекат промена свих параметара на ET_0 . Резултати истраживања осетљивости представљају основу при модификовању постојећих и развоју нових формула за урбану ET_0 .

5.4 Анализа оптимизованих метода референтне евапотранспирације

Анализа статистичких тестова показала је незадовољавајуће резултате између референтних вредности ET_0 (P-M метод) и вредности ET_0 метода добијених оптимизацијом, при чему је оптимизација спроведена користећи подразумеване вредности параметара оптимизације. Овакве вредности тестова довеле су до поновне

оптимизације ET₀ метода, где је прво извршена оптимизација параметара оптимизације а затим сама оптимизација једначине.

Применом обе технике оптимизације значајно су унапређене све анализиране једначине за прорачун ET₀. Вредности статистичких индикатора у фази калибрације и валидације приказани су у табелама 5.6 и 5.7. Поређењем ових вредности утврђена је стабилност метода током оптимизације и испитивања ET₀. Резултати анализе стабилности указују да су све оптимизоване методе стабилне, кроз обе методе оптимизације, и да су варијације кроз фазе калибрације и валидације минималне. Ипак као најстабилнији метод издваја се S-S метод модификован PSO оптимизацијом, а на другом месту је P-T. С обзиром да P-T метод има само један коефицијент који се оптимизује, резултати стабилности ове једначине су исти и код GA и код PSO оптимизације.

Табела 5.6 – Статистички индикатори оптимизационих метода за фазу калибрације ET₀ једначина

Метод	R ²	RMSE	MBE	MAE	NSE	KGE
Метод: GA						
H-S	0,931	0,385	0,009	0,299	0,931	0,935
P-Mt	0,927	0,407	0,042	0,320	0,923	0,893
S-S	0,923	0,418	0,095	0,324	0,918	0,941
P-T	0,993	0,153	-0,047	0,115	0,989	0,948
FAO-24 Pan O	0,850	0,626	-0,156	0,481	0,817	0,878
FAO-24 Pan A-P	0,852	0,624	-0,150	0,478	0,818	0,878
Метод: PSO						
H-S	0,938	0,373	-0,003	0,294	0,935	0,907
P-Mt	0,944	0,349	0,013	0,261	0,943	0,938
S-S	0,973	0,263	-0,052	0,211	0,968	0,943
P-T	0,993	0,153	-0,047	0,115	0,989	0,948
FAO-24 Pan O	0,850	0,626	-0,137	0,480	0,817	0,876
FAO-24 Pan A-P	0,845	0,678	-0,222	0,531	0,786	0,837

Табела 5.7 – Статистички индикатори оптимизационих метода за фазу валидације ЕТо једначина

Метод	R ²	RMSE	MBE	MAE	NSE	KGE
Метод: GA						
H-S	0,908	0,484	0,034	0,394	0,904	0,951
P-Mt	0,902	0,499	0,093	0,401	0,898	0,919
S-S	0,896	0,507	0,063	0,411	0,895	0,918
P-T	0,987	0,202	-0,092	0,144	0,983	0,962
FAO-24 Pan O	0,882	0,614	-0,260	0,488	0,846	0,887
FAO-24 Pan A-P	0,881	0,621	-0,281	0,496	0,842	0,883
Метод: PSO						
H-S	0,914	0,461	0,030	0,371	0,913	0,945
P-Mt	0,927	0,427	0,056	0,333	0,925	0,952
S-S	0,970	0,286	-0,027	0,236	0,966	0,954
P-T	0,987	0,202	-0,092	0,144	0,983	0,962
FAO-24 Pan O	0,882	0,609	-0,241	0,482	0,848	0,890
FAO-24 Pan A-P	0,870	0,687	-0,116	0,552	0,807	0,811

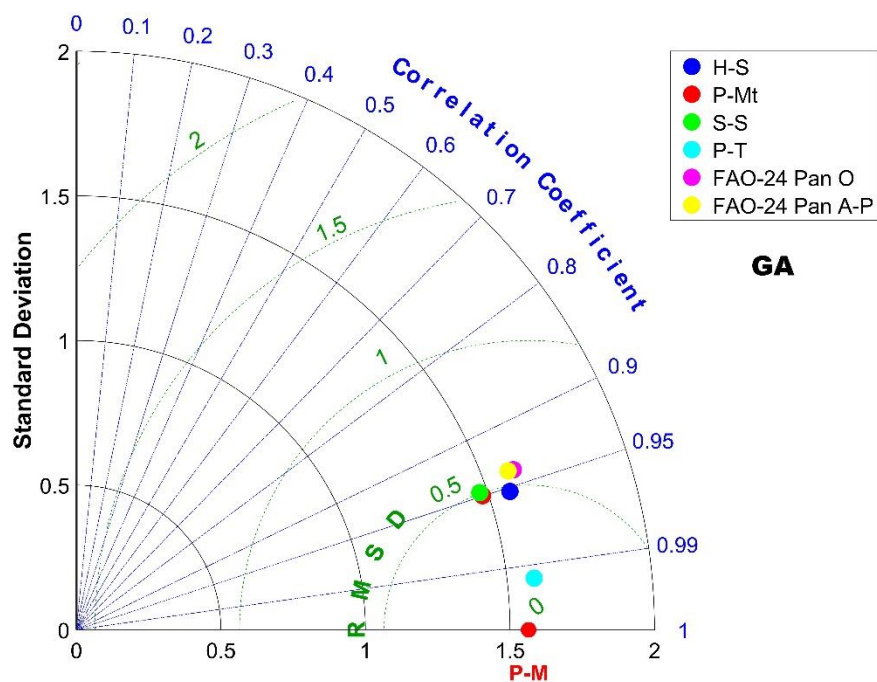
Поређењем основних и оптимизованих метода утврђено је да је S-S оптимизован методом PSO највише унапређена једначина, табела 5.7. Процентуална побољшања R², RMSE, MBE, MAE, NSE и KGE тестова износе 0,9 %, 86,6 %, 98,3 %, 85,6 %, 10,9 % и 94,8 %, респективно. Након S-S методе, H-S је значајно унапређена PSO оптимизационом техником, RMSE за 73,4 %, MBE за 98 % а MAE за 76,2 %, док је једино тест R² показао мало смањење од 0,4 % у односу на вредност оригинале једначине. Резултати промене тестова NSE и KGE издвајају једначину P-T као робустну, односно једначина има мала унапређења кроз обе оптимизације: 4,8 % и 14,1%, респективно, док R² показује да нема промене између оригиналне и модификоване једначине.

GA метод је дао боље оптимизационе резултате једино код FAO-24 Pan A-P једначине. Код P-T једначине оба метода оптимизације дају подједнаке резултате. PSO метод даје убедљиво боље резултате оптимизације код H-S, P-Mt, S-S и FAO-24 Pan O

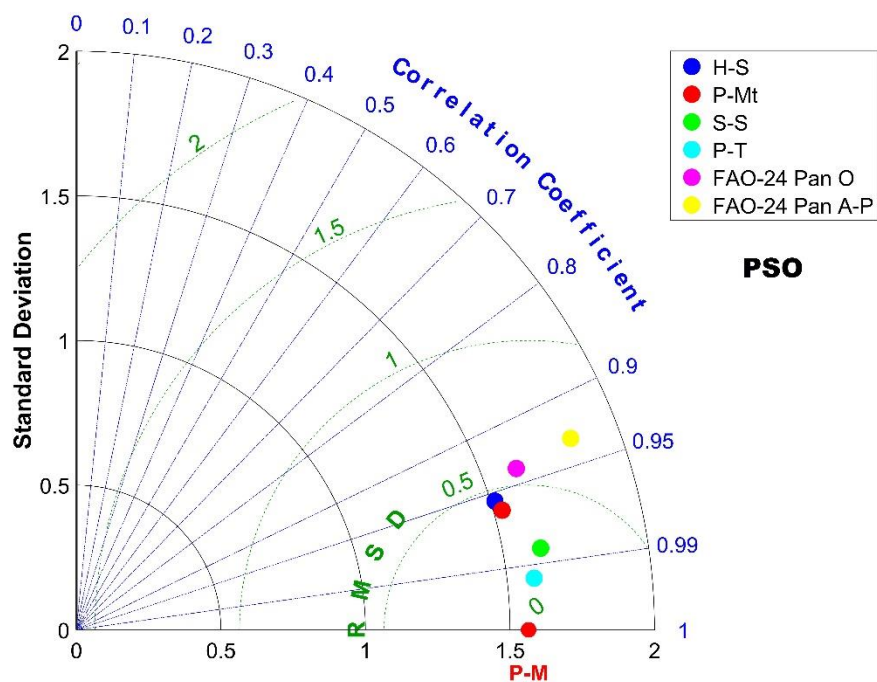
метода. Анализом резултата поређења тестова (табела 5.7) закључује се да је метод PSO знатно бољи за оптимизацију анализираних једначина неголи метод GA. Такође, поред резултата треба истакнути далеко већу брзину PSO оптимизације при проналажењу најоптималнијих вредности коефицијената једначина.

Понашање метода након оптимизације издваја евапорациону групу као групу са најгорим резултатима статистичких тестова, табела 5.7. Просечне вредности тестова за ову групу су $R^2 = 0,878$, $RMSE = 0,633 \text{ mm dan}^{-1}$, $MBE = -0,225 \text{ mm dan}^{-1}$, $MAE = 0,505 \text{ mm dan}^{-1}$, $NSE = 0,836$ и $KGE = 0,868$. Без обзира на резултате тестова, оптимизацијом евапорационе групе значајно су унапређене вредности коефицијената у једначинама. Група метода која има најбоље поклапање са референтном методом, након оптимизације, је група радијационих метода, са просечном вредношћу тестова $R^2 = 0,960$, $RMSE = 0,299 \text{ mm dan}^{-1}$, $MBE = -0,037 \text{ mm dan}^{-1}$, $MAE = 0,234 \text{ mm dan}^{-1}$, $NSE = 0,957$ и $KGE = 0,949$.

Резултате статистичких тестова потврдио је Taylor-ов дијаграм, слика 5.14. Графичка анализа карактеристика оптимизованих метода и референтне – P-M методе урађена је за фазу валидације. На Taylor-ов дијаграм за оптимизацију GA јасно се уочава концентрација свих оптимизованих метода, сем модификоване P-T једначине, која је уједно и најближа референтној једначини. Модификована P-T метода оптимизацијом GA има следеће карактеристике $RMSD = 1,900$, $CC = 0,992$ и $SD = 1,580$. Taylor-ов дијаграм за PSO оптимизацију показује значајну дисперзију оптимизованих метода са јасно издвојеним групама модификованих метода. Као и код GA, код PSO најбољи метод је P-T (има сличне карактеристике као код GA). Анализом дијаграма посебно је приметно унапређење S-S једначине PSO методом, која се налази на другом месту, док је модификовани FAO-24 Pan A-P најдаље од референтне методе.



Слика 5.14.1 – Taylor-ов дијаграм за процењено ET_0 применом оптимизованих ET_0 метода, GA оптимизацијом, за фазу валидације



Слика 5.14.2 – Taylor-ов дијаграм за процењено ET_0 применом оптимизованих ET_0 метода, PSO оптимизацијом, за фазу валидације

Слика 5.14 – Taylor-ов дијаграм за процењено ET_0 применом оптимизованих метода за фазу валидације

На основу табеле 5.7 и слике 5.14 закључује се да је Р-Т метод оптимизован било GA или PSO оптимизационом техником (подједнаки су резултати оптимизације), метод који има најбоља подударана са референтном (Р-М) вредношћу ET_0 . Вредност модификованог коефицијента a износи 1,1183. Главна предност ове методе, наспрам осталих, је та што се у великој мери ослања на сличну, мало упрошћенију, методологију прорачуна као Р-М. Додатна повољност Р-Т методе је да не узима у обзир брзину ветра, која је веома променљив фактор посебно у урбаним условима.

6 РАЗВОЈ И АНАЛИЗА НОВИХ МЕТОДА ЗА ПРОРАЧУН РЕФЕРЕНТНЕ ЕВАПОТРАНСПИРАЦИЈЕ СА ОГРАНИЧЕНИМ БРОЈЕМ ПОДАТАКА У УРБАНОЈ СРЕДИНИ

6.1 Једначине за процену референтне евапотранспирације са ограниченим бројем података

FAO група на стручним консултацијама одржаним у Риму, 28-31. мај 1990. године снажно је препоручила Penman-Monteith метод као најбољу комбиновану једначину за прорачун референтне евапотранспирације (Smith et al., 1992). Бројне студије показале су да метод Р-М даје најтачније резултате у различитим климатским условима широм света (Allen et al., 1998; Trajkovic and Kolakovic, 2009; Xystrakis and Matzarakis, 2011; Tabari et al., 2013; Kisi and Ay, 2016). За прецизну процену ET_0 по методи Р-М потребни су климатски подаци који верно одсликавају климатске услове. То су подаци о температури ваздуха, притиску паре, сунчевом зрачењу и брзини ветра. Међутим, неке од ових временских варијабли, посебно сунчево зрачење, често нису доступне и представљају главно ограничење у примени метода. Резултати више студија показали су да елиминисање било ког од наведених параметара може бити значајан извор несигурности у процени ET_0 , што указује на потребу за изналажењем једначине која ће дати задовољавајућу тачност са смањеном количином података (Trajkovic, 2005; Trajkovic and Kolakovic, 2009; Tabari et al., 2010; Dimitriadou and Nikolakopoulos, 2022).

Allen et al. (1998) показали су како се недостајући подаци о сунчевом зрачењу, притиску паре и ветру могу проценити, где се многи од предложених поступака заснивају на мерењима минималне и максималне температуре, пошто не постоји поуздан начин за процену температуре. Jensen et al. (2016) предложили су да минимални захтеви за потребним подацима, са којима је могуће добити квалитетну процену ET_0 буду дневна максимална и минимална температура ваздуха или дневна средња температура, при чему са коришћењем средње температуре треба бити опрезан јер ће вероватно доћи до извесног потцењивања ET_0 , због нелинеарности односа притиска паре засићења и температуре. Коришћење средње температуре ваздуха уместо максималне и минималне температуре даје ниже e_s вредности, а самим тим и нижу разлику притиска паре ($e_s - e_a$), што доводи до ниже вредности ET_0 (Allen et al., 1998).

Анализа ограничења доступности климатских података довела је до алтернативних приступа који ће користити лако доступне климатске податке (Smith et al., 1992). Алтернативне методе, засноване на ограниченом броју података морају да:

- избегну дисконтинуитет у односу на постојеће методологије,
- одговоре на потребе у областима где неколико метеоролошких варијабли није доступно,
- избегну процену недостајућих варијабли од стране неискусних корисника и
- омогуће корисницима да изаберу једноставније методе.

У литератури постоји више метода са минималним бројем података (Makkink, 1957; Prestley and Taylor, 1972; Hargreaves and Samani, 1985; Trajkovic, 2007) и углавном је реч о температурним и радијационим једначинама, што је и логично јер су температура и сунчево зрачење најважнији параметри у процени ET_0 . Jensen et al. (2016) сматрају да се најмање 80 % ET_0 може објаснити температуром и сунчевим зрачењем. Постојеће једначине користе податке који су лакше доступни на свим метеоролошким станицама, а могу се мерити на локалу или се могу добити из историјских података.

6.2 Метод вишеструке линеарне регресије

Циљ регресије јесте да се утврди природа везе, односно облик зависности између посматраних појава, што представља један од класичних проблема у статистичкој анализи. Регресиона анализа је једна од најчешће коришћених статистичких метода за анализу хидролошких података и користи се за описивање квантитативних односа између зависно променљиве и једне или више независно променљивих (Singh, 2017). Ова анализа се радо користи због своје утврђене методологије, дуге историје примене, доступности софтвера и прихватања како међу практичарима тако и у академској заједници.

Општи облик модела вишеструке регресије је:

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) + \varepsilon \quad (6.1)$$

Код вишеструке линеарне регресије (multiple linear regression – MLR) функција је линеарна једначина између чланова:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n + \varepsilon \quad (6.2)$$

где је Y зависна променљива, $X_1, \dots, X_n$ су независне променљиве (регресори), β_0 је одсечак или слободан члан, $\beta_1, \dots, \beta_n$ су коефицијенти парцијалне регресионе функције (регресиони коефицијенти), ε је резидуал, случајна грешка.

Параметар β_0 дефинише се као просечан почетни ниво зависно променљиве и показује просечну вредност зависно променљиве када су независно променљиве једнаке нули. Стандардни регресиони модел претпоставља да су резидуали независни, са нормалном расподелом, са средњом вредношћу 0 и константном варијансом.

MLR модел описује хиперраван у n -димензионалном простору регресионих променљивих $\{x_j\}$. Уз регресионе моделе везују се следеће претпоставке (Sriram and Rashmi, 2014):

- опсервације су независне,
- грешке имају нормалну дистрибуцију,
- просечна вредност грешке је 0, а варијанса грешке је константна – не зависи од вредности независне променљиве и
- грешке су некорелисане међу собом.

На основу величине регресионих коефицијената може се закључити колики је релативни утицај или важност сваке независне променљиве. Квалитет добијеног регресионог модела дефинише се на следећи начин:

- дијаграм регресионе једначине треба да се добро прилагођава експерименталним подацима, а подаци треба насумично да буду распоређени изнад и испод дијаграма,
- регресиони модел је репрезентативнији и боље описује стварне податке, што је коефицијент детерминације R^2 ближи јединици. Овај коефицијент даје информацију о томе колико је јака функцијска веза између x и y , односно колико су варијације у објашњене променљивом x .
- најбољи модел је са највећим коефицијентом детерминације, што је еквивалентно моделу са најмањом процењеном варијансом и
- добијени резултати морају да имају научни и статистички смисао, а вредности појединих параметара не смеју бити у супротности са физичком реалношћу.

Модели вишеструке линеарне регресије често се користе као апроксимативне функције. Прави функционални однос између зависно и независних променљивих је непознат, али у одређеним опсезима независних променљивих, MLR модел је адекватна

апроксимација (Montgomery et al., 2021). Вишеструка линеарна регресија је у суштини проблем минимизације, јер се коефицијенти процењују методом најмањијх квадрата према захтеву да се минимизира сума квадрата грешака.

Практично, регресиона анализа је поступак за уклапање једначина у скуп података (McCuen, 2003). Међу веома сложеним техникама које се примењују при анализи ET_0 метода MLR се издваја јер је једноставна, разумљива, даје податке који се лако интерпретирају и захтева мали рачунарски напор.

6.2.1 Развој регресионих метода за прорачун референтне евапотранспирације у урбаној средини

Оквирни циљ овог поглавља је да се истражи могућност MLR за процену референтне евапотранспирације у урбаној средини и да се тестира број улазних варијабли потребних за задовољавајуће тачне процене ET_0 . Општи облик MLR једначине (6.2) употребљен је да би се развили линеарни методе за процену дневних вредности ET_0 из метеоролошких података, односно да се утврди да ли ограничени подаци (чак и једна улазна променљива) могу на задовољавајући начин да процене ET_0 .

Посебна вредност примене MLR је код недостајућих података за процену ET_0 односно моделовање једначина ET_0 са минималним бројем података. Наиме, за прецизну процену референтне евапотранспирације потребни су они климатски подаци који верно одсликавају животну средину и то су подаци о температури ваздуха, притиску паре, сунчавом зрачењу и брзини ветра. Елиминисање било ког од наведених параметара може бити значајан извор несигурности у процени ET_0 , што указује на потребу за изналажењем једначина које ће дати квалитетне резултате и без недостајућих података.

Сprovedена је вишеструка линеарна регресија како би се развиле линеарне једначине за процену ET_0 на основу AWS података. У развијеним MLR једначинама променљива ET_0 је дефинисана као зависно променљива (Y) а температура ваздуха (T_{min} , T_{max} , T), брзина ветра (U_2) и сунчево зрачења (R_s) су независно променљиве (X_n). Развијене су шест регресионе методе како би се прецизније одредила ET_0 . Независно променљиве у регресионим једначинама изабране су на основу усаглашавања са климатским параметрима који су коришћени у постојећим једначинама примењеним за процену евапотранспирације и на основу раније спроведене анализе осетљивости. За једначину MLR-1 улазни податак је само средња температура ваздуха. Метод MLR-2

користи од улазних података температуру $T_{\min}$ и $T_{\max}$ као и P-Mt. Улазни скуп за MLR-3 је сличан скупу радијационих метода и користи $T_{\min}$, $T_{\max}$ и радијацију R_s (утврђено је да је ET_0 најосетљивија на $T_{\max}$ и R_s). Методе MLR-4 и S-S користе T и R_s . Једначина MLR-5 истражује везу ET_0 са евапорацијом E_{pan} и T . Једначина MLR-6 обухвата све параметре као P-M, табела 6.1 и 6.2.

Табела 6.1 – Улазни параметри вишеструких линеарних регресионих једначина и оптимизованих једначина за процену ET_0

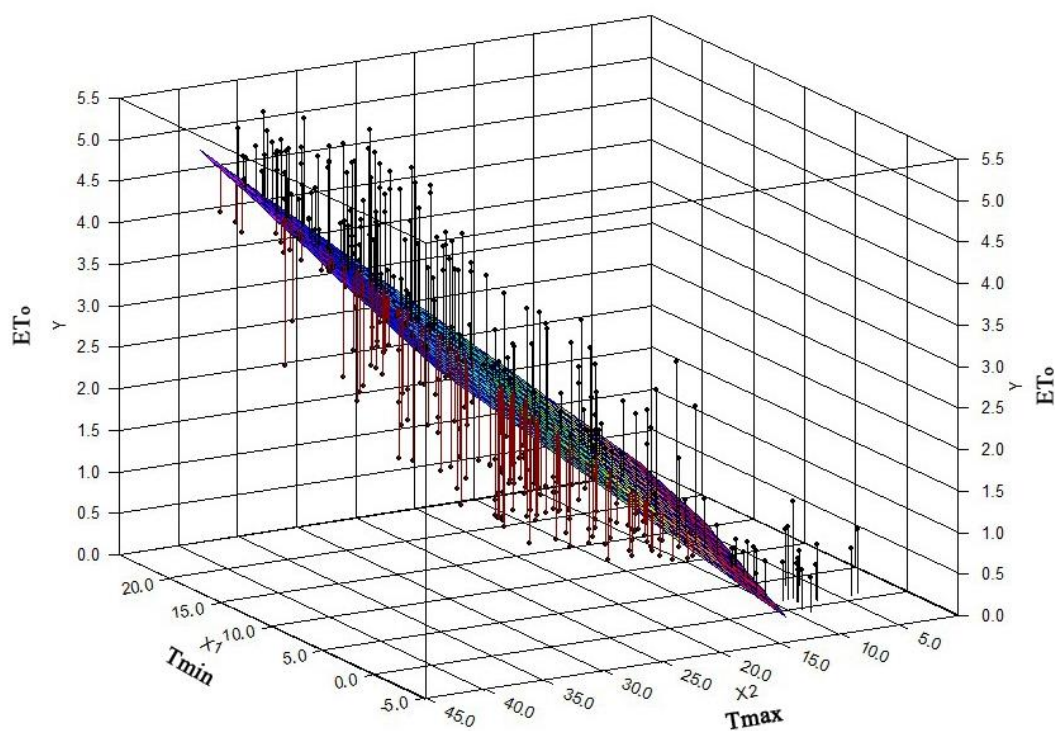
Метод	Улазни параметри	MLR једначине	Оптимизоване једначине
Температурне методе	T	MLR-1	
	$T_{\min}, T_{\max}$	MLR-2	H-S, P-Mt
Радијационе методе	$T_{\min}, T_{\max}, R_s$	MLR-3	
	T, R_s	MLR-4	S-S
Евапорационе методе	T, E_{pan}	MLR-5	
Комбиноване методе	$T_{\min}, T_{\max}, U_2, R_s$	MLR-6	

Табела 6.2 – Вишеструке линеарне регресионе једначине за процену ET_0

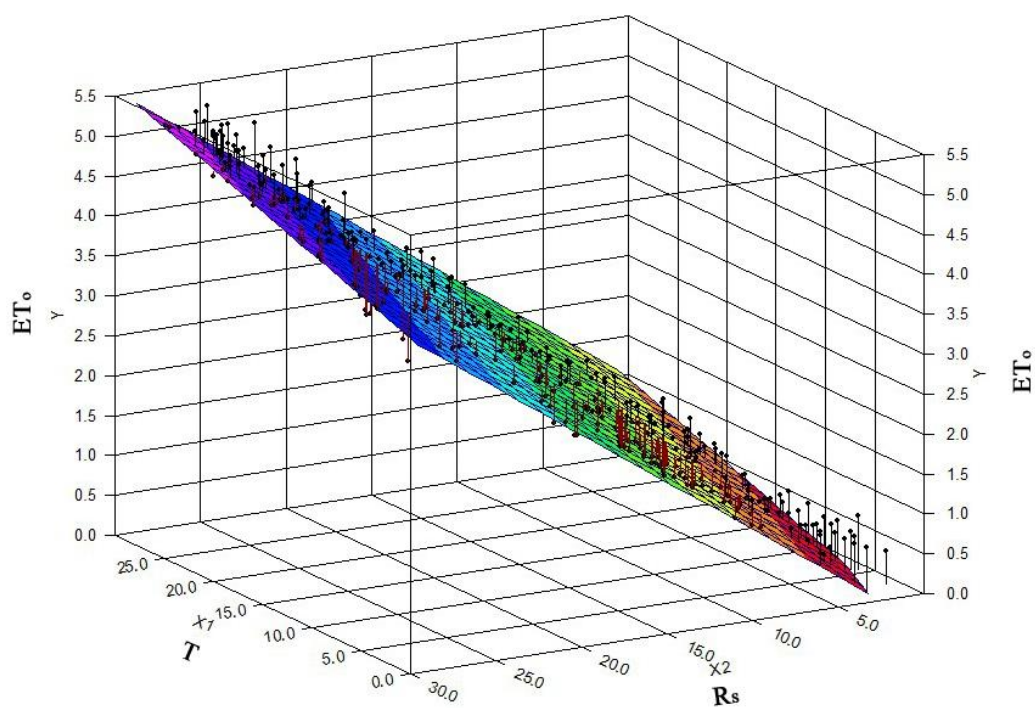
Метод	Регресионе једначине
MLR-1	$ET_0 = -1,0258 + 0,1945T$
MLR-2	$ET_0 = -1,3081 + 0,0575T_{\min} + 0,1230T_{\max}$
MLR-3	$ET_0 = -0,1152 + 0,0667T_{\min} - 0,0184T_{\max} + 0,1666R_s$
MLR-4	$ET_0 = -0,4366 + 0,0479T + 0,1520R_s$
MLR-5	$ET_0 = -0,1716 + 0,0685T + 0,5450E_{pan}$
MLR-6	$ET_0 = -0,3884 + 0,0566T_{\min} - 0,0072T_{\max} + 0,5239U_2 + 0,1608R_s$

Слика 6.1 представља 3D модел за развијене регресионе једначине MLR-2, MLR-4 и MLR-5. Може се закључити да се MLR једначине добро прилагођавају експерименталним подацима (фаза калибрације), односно подаци су подједнако

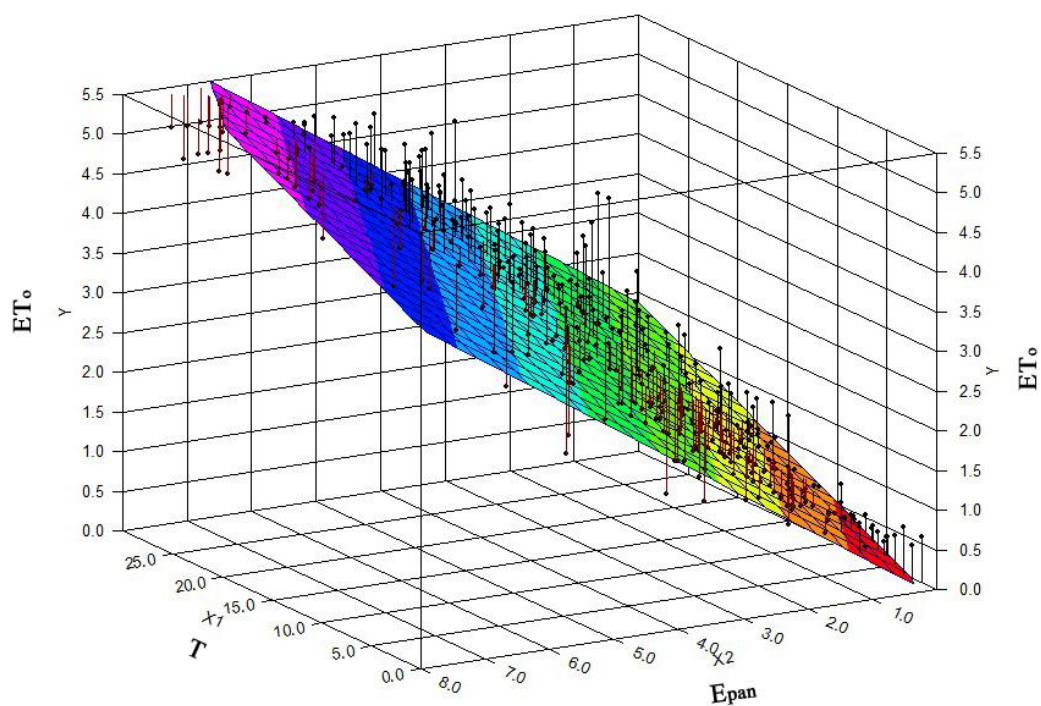
распоређени изнад и испод равни која представља једначину. Од наведене три једначине посебно се издваја једначина MLR-4, као једначина код које је изражена концентрација података око равни. По величини дисперзије података, почев од највеће, након MLR-2 следе MLR-5 и MLR-4, респективно.



Слика 6.1.1 – 3D модел вишеструке линеарне регресије за MLR-2 метод



Слика 6.1.2 – 3D модел вишеструке линеарне регресије за MLR-4 метод



Слика 6.1.3 – 3D модел вишеструке линеарне регресије за MLR-5 метод

Слика 6.1 – 3D модел вишеструке линеарне регресије за MLR-2, MLR-4 и MLR-5 методе

Анализа успостављених MLR једначина спроведена је кроз две фазе:

- анализа параметара једначина и
- анализа квалитета једначина.

Анализа параметара једначина представљена је у табели 6.3. Вредности t -stat за све анализиране једначине је висока, у односу на табличне вредности Студентове t расподеле за ниво значајности од 5 %, док је вредност $\text{Prob}(t)$ мала код свих MLR једначина. Овакви резултати t -stat и $\text{Prob}(t)$ јасно указују да је мала вероватноћа да вредност коефицијента буде нула и да коефицијент има значајан утицај у једначини, односно свих коефицијената код свих једначина, па се сматра да нема потребе за уклањањем коефицијената. На основу табеле 6.3, јасно се уочава да је најзначајнији параметар R_s код метода MLR-3, MLR-4 и MLR-6. Параметар $T_{\max}$ је значајан у једначини MLR-2, док његова улога није толико изражена код једначина MLR-3 и MLR-6. Насупрот анализи осетљивости, $T_{\min}$ показао је солидан значај, посебно код MLR-3 и MLR-6.

Табела 6.3 – Анализа параметара MLR метода

Метод	Слободан	Независне променљиве					
	члан	T _{min}	T _{max}	T	U ₂	R _s	E _{pan}
MLR-1							
t-stat	-8,018			29,126			
Prob(t)	0			0			
MLR-2							
t-stat	-8,252	4,081	12,454				
Prob(t)	0	0,00005	0				
MLR-3							
t-stat	-2,694	19,487	-5,930			75,129	
Prob(t)	0,00737	0	0			0	
MLR-4							
t-stat	-10,482			14,616		58,479	
Prob(t)	0			0		0	
MLR-5							
t-stat	-1,990			10,469			24,807
Prob(t)	0,04728			0			0
MLR-6							
t-stat	-6,266	15,286	-2,018		5,8744	68,718	
Prob(t)	0	0	0,04432		0	0	

Анализа квалитета једначина показала је да су све MLR методе квалитетне. У табели 6.4 приказани су резултати испитивања квалитета једначина. Вредности F Ratio, за ниво значајности од 5 % су више од табличних вредности Фишерове F расподеле и вредности Prob(F) су једнаке 0, код свих метода. Овакве вредности F Ratio и Prob(F) говоре да анализа варијансе, код свих MLR метода, показује висок квалитет усвојеног регресионог модела и на нивоу значајности од 5 %, постоји 100 % шансе да бар један

коэффициент није 0 и да има утицај на зависну променљиву ET_0 . Као најквалитетније једначине издвајају се MLR-3 и MLR-4, док је најмање квалитетан метод MLR-2.

Табела 6.4 – Анализа квалитета MLR једначина

	MLR-1	MLR-2	MLR-3	MLR-4	MLR-5	MLR-6
F Ratio	848,34	363,69	5743,82	5960,34	1419,45	4699,39
Prob(F)	0	0	0	0	0	0

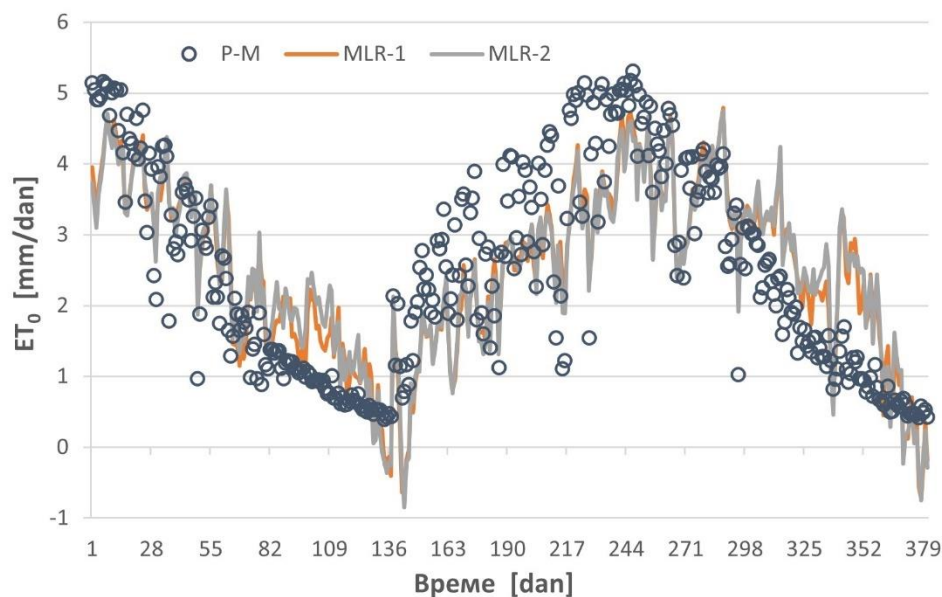
6.3 Прорачун регресионих метода референтне евапотранспирације

Упоредна анализа MLR метода са референтном вредношћу ET_0 , добијена применом Р-М једначине, кроз фазу калибрације, приказана је на слици 6.2. Једначине које чине температурну групу (MLR-1 и MLR-2) међусобно показују минимална одступања. Ова група потцењује референтне вредности ET_0 , посебно током октобра и прве половине новембра 2022. и септембра, октобра и новембра 2023. године. Током пролећног периода температурне MLR једначине прецењују вредности Р-М, док извесно слагање постоји током летњег периода. На основу слике 6.2, јасно се уочава да готово нема разлике између радијационих метода (MLR-3 и MLR-4). Ова група једначина показује скоро идеално поклапање са ET_0 референтно. Поклапање је толико изражено да радијациона група успева да покрије и врхове и изузетке добијене применом Р-М једначине. Евапорациону групу метода представља MLR-5 метод који у јесењем периоду показује тенденцију прецењивања референтних вредности, док је у пролећном склон потцењивању истих. MLR-6 једначина је једини представник комбиноване групе метода и она се слично понаша као и радијациона група, односно показује идеална поклапања са дневним Р-М вредностима, у фази калибрације.

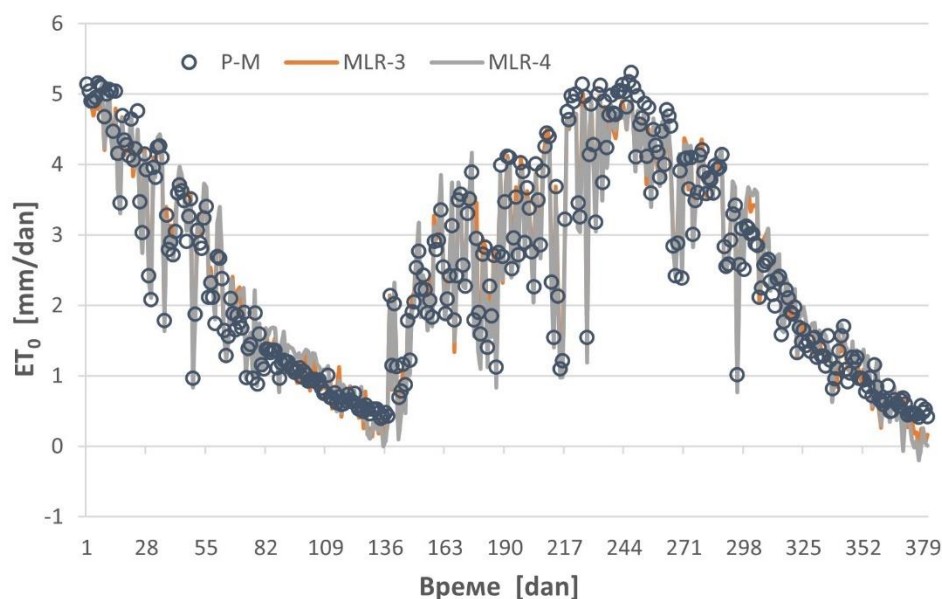
Резултати статистичких тестова у фази калибрације издвајају метод MLR-6 као најтачнији метод, односно као метод који има највећу усклађеност са референтном ET_0 ($R^2 = 0,980$, $RMSE = 0,205 \text{ mm dan}^{-1}$, $MBE = -0,002 \text{ mm dan}^{-1}$, $MAE = 0,162 \text{ mm dan}^{-1}$, $NSE = 0,980$ и $KGE = 0,986$). Овакав резултат није изненађујући с обзиром да је реч о комбинованој методи која укључује све мерене метеоролошке параметре. Битно је нагласити да иако MLR-6 има доста улазних параметара његова процедура прорачуна је драстино лакша од Р-М методе. MLR-3 се налази на другом месту, за нијансу је гори од MLR-6, по сличности са референтном ET_0 , док MLR-2 метод има најмању сличност, са

вредностима статистичких индикатора $R^2 = 0,978$, $RMSE = 0,214 \text{ mm dan}^{-1}$, $MBE = 0,002 \text{ mm dan}^{-1}$, $MAE = 0,170 \text{ mm dan}^{-1}$, $NSE = 0,978$ и $KGE = 0,985$ и $R^2 = 0,658$, $RMSE = 0,856 \text{ mm dan}^{-1}$, $MBE = 0,020 \text{ mm dan}^{-1}$, $MAE = 0,720 \text{ mm dan}^{-1}$, $NSE = 0,658$ и $KGE = 0,737$, респективно.

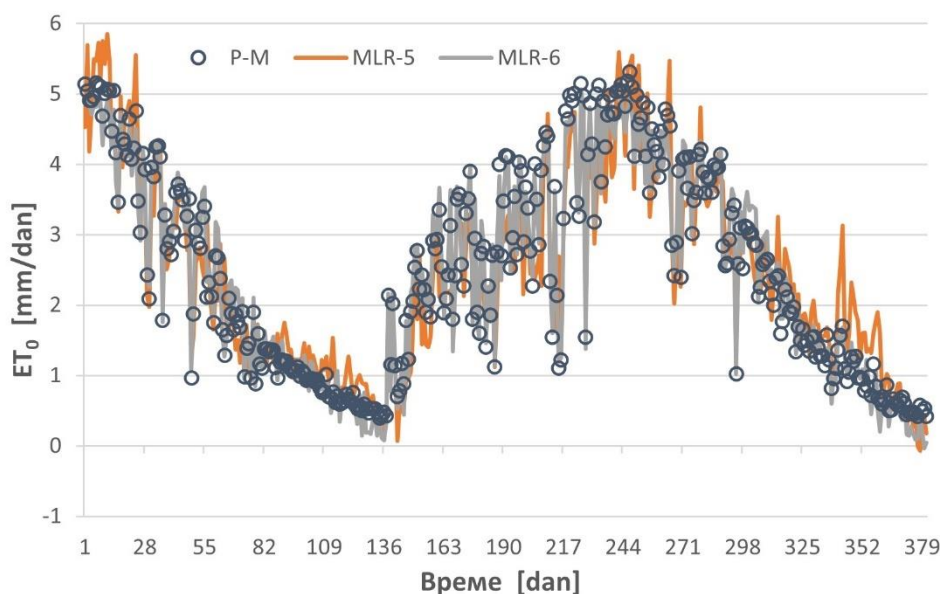
Може се закључити да у условима који владају у урбаној средини, у овој студији, R_s има највећи утицај на ET_0 . Такође, закључује се да повећање броја улазних климатских променљивих у MLR методама повећава њихову тачност.



Слика 6.2.1 – Карактеристике температурних MLR једначина у фази калибрације



Слика 6.2.2 – Карактеристике радијационих MLR једначина у фази калибрације



Слика 6.2.3 – Карактеристике евапорационе и комбиноване MLR једначине у фази калибрације

Слика 6.2 – Карактеристике MLR једначина у фази калибрације

6.4 Анализа регресионих метода референтне евапотранспирације

Резултати испитивања нових регресионих метода наспрам вредности ET_0 добијене применом P-M методе (референтне) за фазу калибрације и валидације, приказани су у табелама 6.5 и 6.6. Развој једначине, стабилност кроз калибрациону и валидациону фазу посебно је анализирана применом разлика статистичких индикатора. Утврђено је да су све развијене MLR једначине стабилне, при чему се посебно издваја MLR-4 као најстабилинија а на другом месту је MLR-5. Метод MLR-6 показао је високу стабилност код свих индикатора, иако је метод који обједињује утицај највише метеоролошких параметара. MLR-1, и ако се састоји од слободног члана и једног параметра, показао је задовољавајућу стабилност током калибрационе и валидационе фазе.

Табела 6.5 – Резултати статистичких тестова MLR метода у фази калибрације

	R ²	RMSE	MBE	MAE	NSE	KGE
MLR-1	0,691	0,813	-0,001	0,682	0,691	0,761
MLR-2	0,658	0,856	0,020	0,720	0,658	0,737
MLR-3	0,978	0,214	0,001	0,171	0,978	0,985
MLR-4	0,969	0,256	0,001	0,209	0,969	0,978
MLR-5	0,882	0,502	-0,001	0,398	0,882	0,914
MLR-6	0,980	0,205	-0,002	0,162	0,980	0,985

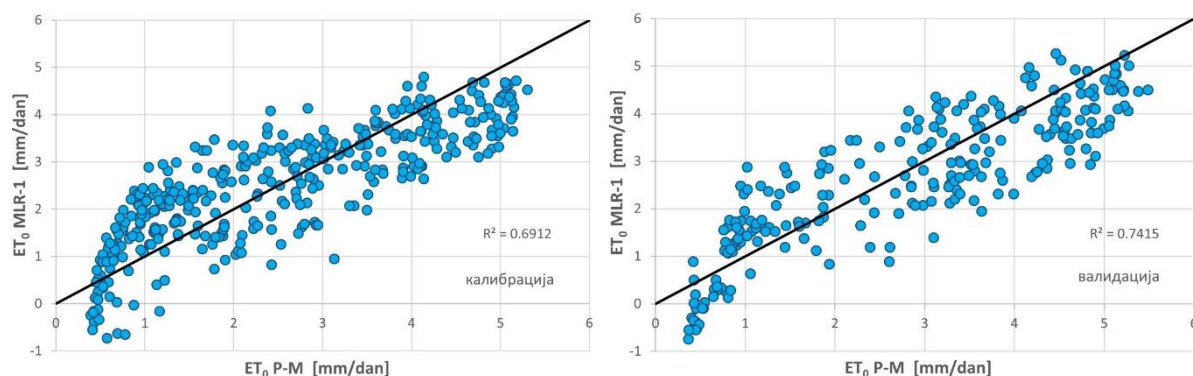
Табела 6.6 – Резултати статистичких тестова MLR метода у фази валидације

	R ²	RMSE	MBE	MAE	NSE	KGE
MLR-1	0,742	0,823	-0,197	0,701	0,723	0,821
MLR-2	0,708	0,859	-0,150	0,732	0,698	0,779
MLR-3	0,976	0,252	-0,066	0,201	0,974	0,970
MLR-4	0,968	0,282	-0,031	0,232	0,967	0,973
MLR-5	0,898	0,507	-0,028	0,398	0,895	0,947
MLR-6	0,979	0,236	-0,061	0,189	0,977	0,974

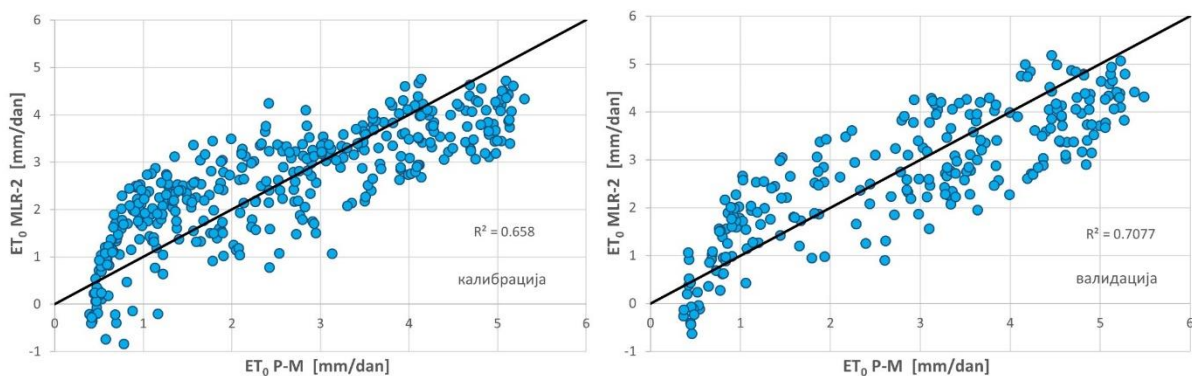
На основу табеле 6.6 јасно је да методе MLR-1 и MLR-2, са минималним бројем метеоролошких параметара, имају најниже перформансе. MLR-2 користи податке о $T_{\min}$ и $T_{\max}$ и по карактеристикама статистичких индикатора лошије процењује вредности ET_0 од методе MLR-1, која се ослања само на вредност T . Међусобна процентуална промена наведених метода у фази валидације износи: $R^2 = -4,5 \%$, $RMSE = 4,4 \%$, $MBE = -23,6 \%$, $MAE = 4,4 \%$, $NSE = -3,5 \%$ и $KGE = -5,1 \%$. Ова разлика углавном потиче од начина обрачуна T на AWS. У овој студији средња температура није резултат половине разлике максималне и минималне температуре, већ datalogger вредност T генерише на основу мерења која спроводи на свака 5 минута, а затим их прерачунава на сатне и дневне вредности. Једначина MLR-3 поред података о $T_{\min}$ и $T_{\max}$ користи податке и о R_s . Упоредном анализом апсолутних промена индикатора MLR-2 и MLR-3, закључује се да метод MLR-3 има до 50,2 % боље карактеристике при процени ET_0 . Евапорациони метод

MLR-5 (укључује $E_{\text{ран}}$ и T) показује боље карактеристике од MLR-1 једначине, са апсолутном променом од 37,9 %, односно промена по тестовима износи: $R^2 = 21,2 \%$, $\text{RMSE} = -38,4 \%$, $\text{MBE} = -85,9 \%$, $\text{MAE} = -43,2 \%$, $\text{NSE} = 23,7 \%$ и $\text{KGE} = 15,3 \%$. Поређењем једначина MLR-1 и MLR-4 у фази валидације, уочава се апсолутна промена од 49,9 %. Две најбоље једначине MLR-3 и MLR-6 имају најмању промену по статистичким тестовима у валидацији и то: $R^2 = 0,3 \%$, $\text{RMSE} = -6,7 \%$, $\text{MBE} = -7,3 \%$, $\text{MAE} = -6,1 \%$, $\text{NSE} = 0,3 \%$ и $\text{KGE} = 0,4 \%$.

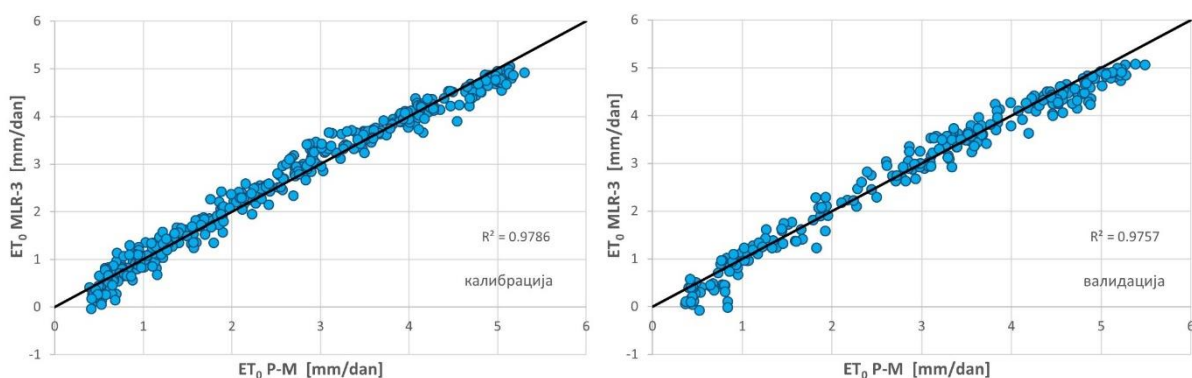
Графичка анализа развијених MLR метода представљена је у виду дијаграма расејања за калибрациону и валидациону фазу, где је на x оси вредност ET_0 срачуната применом P-M једначине а на y оси је анализирана MLR једначина, слика 6.3. Методе MLR-1 и MLR-2 показују исти образац понашања у фази калибрације и у фази валидације. Код ових метода изражена је дисперзија око 1:1 линије, посебно у фази валидације. MLR-3 и MLR-4 имају велику концентрацију података у односу на линију 1:1, при чему је у малој мери приметно потцењивање референтне ET_0 , при малим вредностима. Поређењем ове две методе, посебно се издваја MLR-3 као метод који има изузетно малу дисперзију података и у валидацији ($R^2 = 0,976$) и у калибрацији ($R^2 = 0,979$), па се сматра за тачнији метод, код MLR радијационих метода. Током валидације MLR-5 има већу дисперзију података како се повећава вредност ET_0 , док је у калибрацији његова дисперзија константна ($R^2 = 0,883$). Једначина MLR-6 има високу концентрацију података у односу на линију 1:1, такође, нема значајније разлике понашања једначине у калибрацији и валидацији, са R^2 једнако 0,980 и 0,979, респективно. Анализа слике 6.3 показује да дијаграми расејања, за фазе калибрације и валидације, одговарају нумеричким резултатима статистичких индикатора представљеним у табелама 6.5 и 6.6.



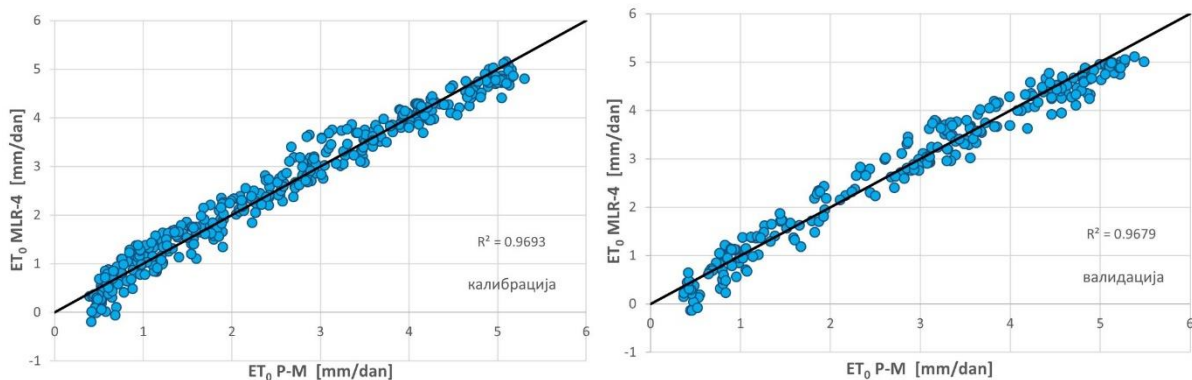
Слика 6.3.1 – Дијаграми расејања између MLR-1 и P-M



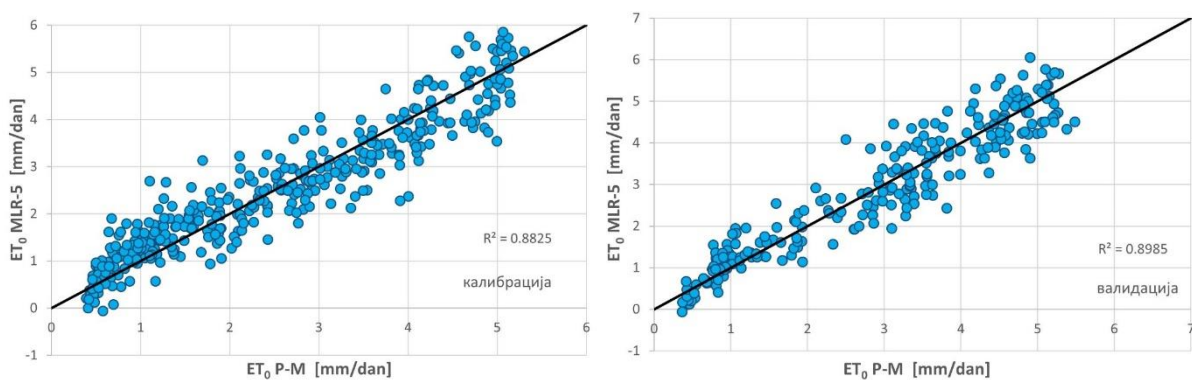
Слика 6.3.2 – Дијаграми расејања између MLR-2 и P-M



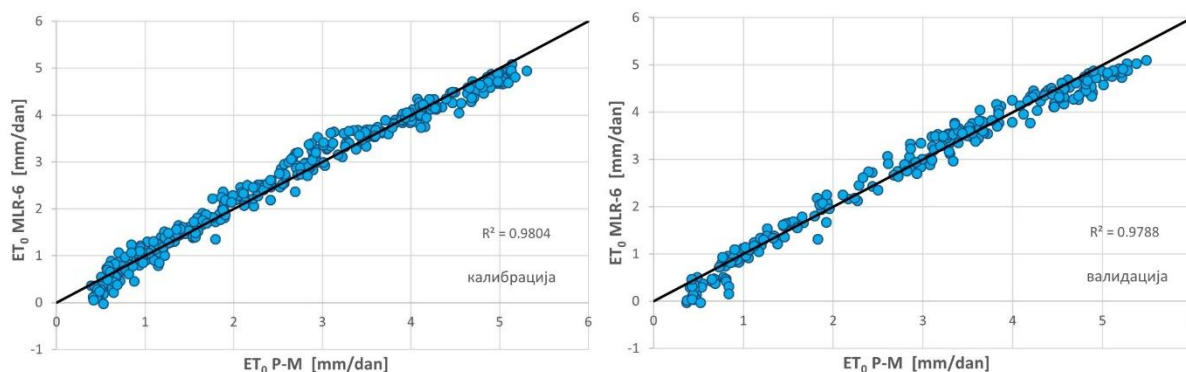
Слика 6.3.3 – Дијаграми расејања између MLR-3 и P-M



Слика 6.3.4 – Дијаграми расејања између MLR-4 и P-M



Слика 6.3.5 – Дијаграми расејања између MLR-5 и P-M



Слика 6.3.6 – Дијаграми расејања између MLR-6 и P-M

Слика 6.3 – Дијаграми расејања између нових MLR једначина и P-M једначине, за калибрациону и валидациону фазу

Група радијационих метода у фази валидације показала је добро поклапање са вредношћу P-M, односно просечне вредности R^2 , RMSE, MBE, MAE, NSE и KGE износе 0,972, 0,267 mm dan⁻¹, -0,048 mm dan⁻¹, 0,216 mm dan⁻¹, 0,971 и 0,972, респективно. Температурна група MLR једначина показала је знатно лошије уклапање са референтним ET₀. Просечна апсолутна разлика температурних и радијационих MLR једначина износи 50,8 %, односно радијационе показују боље поклапање са P-M вредностима од температурних MLR једначина у валидацији, и према R^2 , RMSE, MBE, MAE, NSE и KGE та разлика износи 74,6 %, 31,8 %, 27,9 %, 30,2 %, 73,2 % и 82,3 %, респективно.

На основу табеле 6.6 и слике 6.3, закључује се да је метод MLR-6 ($R^2 = 0,978$, RMSE = 0,236 mm dan⁻¹, MBE = -0,061 mm dan⁻¹, MAE = 0,189 mm dan⁻¹, NSE = 0,978 и KGE = 0,974) најтачнији метод за процену ET₀ у урбаним условима. С обзиром на висок ниво концентрације података у односу на линију 1:1 (слика 6.3) и резултате статистичких индикатора, MLR-3 се налази на другом месту по тачности. Уједно, ова једначина је и најпрепоручљивији, с обзиром на високу тачност при процени урбане ET₀ а да су за њен прорачун потребни само подаци о температури и соларној радијацији. Као најлошија MLR једначина издваја се MLR-2 са вредностима тестова $R^2 = 0,708$, RMSE = 0,859 mm dan⁻¹, MBE = -0,150 mm dan⁻¹, MAE = 0,732 mm dan⁻¹, NSE = 0,698 и KGE = 0,779, у фази валидације.

Генерално, перформансе развијених MLR метода сугеришу да концепт вишеструке линеарне регресије може бити прихватљив приступ за предвиђање дневних вредности ET_0 у урбаној средини.

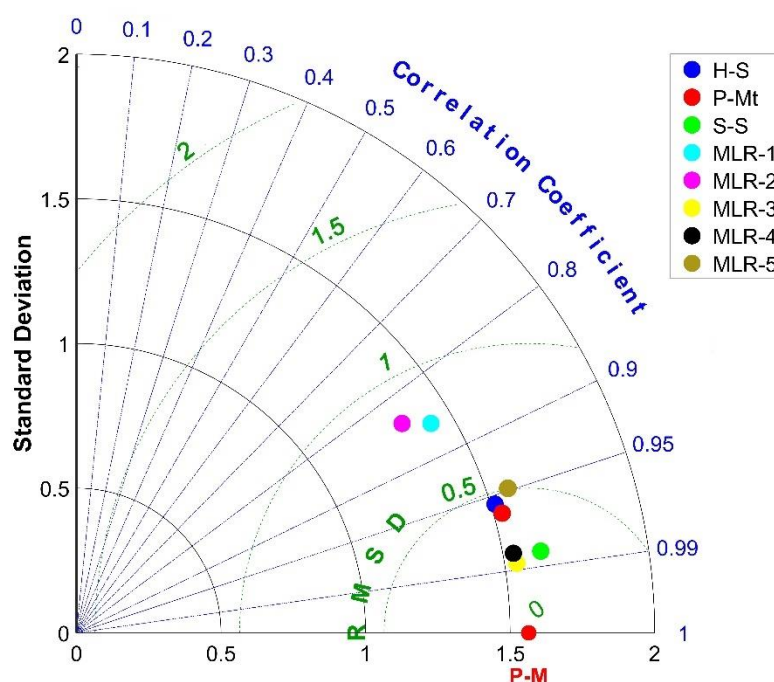
6.5 Компаративна анализа нових – регресионих и оптимизованих метода референтне евапотранспирације са ограниченим бројем података

Анализа метода за прорачун ET_0 јасно је издвојила најбоље методе за дефинисање урбане ET_0 . Међутим, како је већ наглашено, урбана средина може да представља ограничавајући фактор при мерењу разних метеоролошких података. С обзиром на ову чињеницу, посебна пажња посвећена је анализи метода за прорачун ET_0 са ограниченим бројем података.

Основни елемент при дефинисању минималног броја података неопходаних за прорачун ET_0 је раније спроведена анализа осетљивости према којој је ET_0 најосетљивија на R_s и T_{max} . Анализа литературе (Allen et al., 1998; Jensen et al., 2016) додатно је потврдила значај ова два параметра. Могућност мерења података и цена мерне опреме су такође узети у обзир при избору метода прорачуна. Узимајући у обзир све чињенице, закључено је да ET_0 метод са ограниченим бројем података треба да буде базиран на максимално два податка. Издвојене и анализиране су најбоље оптимизоване и развијене MLR ET_0 методе, са минималним бројем улазних података, наспрам референтне Р-М методе у урбаној средини. Групу најефикаснијих оптимизованих метода чине H-S, P-Mt и S-S, оптимизоване PSO оптимизационом техником, док групу MLR метода чине MLR-1, MLR-2, MLR-3, MLR-4 и MLR-5 методе.

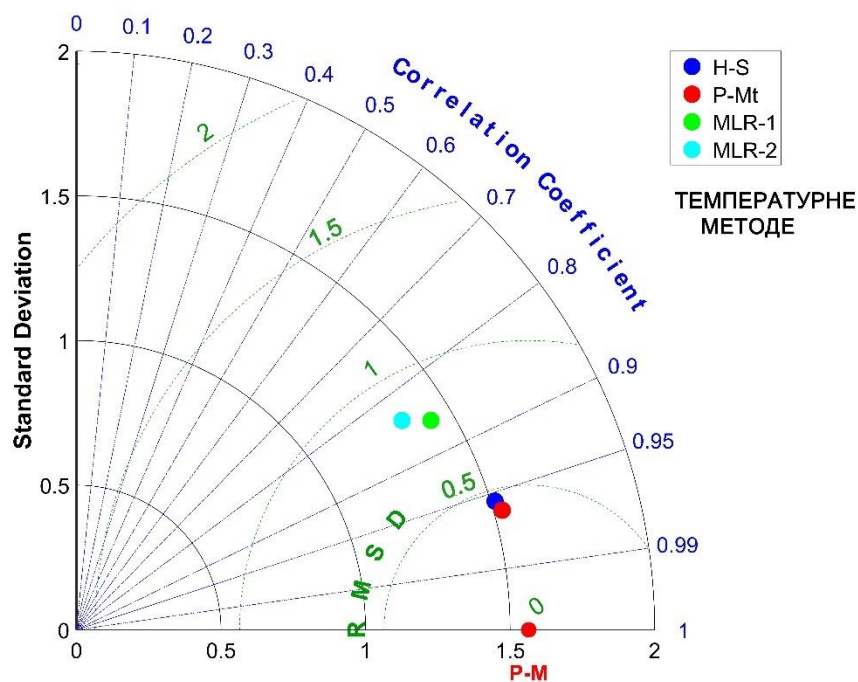
Анализом Taylor-овог дијаграма у фази валидације са методама које користе ограничени број података, закључује се да група MLR једначина има половичан успех, односно MLR-3, MLR-4 и MLR-5 одлично процењују ET_0 , док остале методе MLR групе дају најгоре резултате од свих анализираних метода, слика 6.4. Најмању ефикасност има MLR-2 метод, заснован на T_{min} и T_{max} , са вредностима CC, SD и RMSD од 0,83, 1,34 и 0,81, респективно. Приметна је висока вредност CC, SD и RMSD код свих оптимизованих једначина, с тим да једначине имају изражену концентрацију. Концентрација (сличност резултата) је посебно уочљива код две температурне методе: H-S и P-Mt, засноване на T_{min} , T_{max} и T односно T_{min} и T_{max} , и ако методе имају различите технике прорачуна. На основу слике 6.4 јасно се закључује да радијационе методе имају

преимућство над температурним методама у процени ET_0 . Ефикасност радијационих над температурним методама може и нумерички да се анализира, на основу табела 5.7 и 6.6, посматрајући просечне вредности R^2 , RMSE, MBE, MAE, NSE и KGE, радијационе и температурне групе, које износе 0,971, 0,274 mm dan⁻¹, -0,041 mm dan⁻¹, 0,223 mm dan⁻¹, 0,969, 0,966 и 0,823, 0,642 mm dan⁻¹, -0,065 mm dan⁻¹, 0,534 mm dan⁻¹, 0,815, 0,874, респективно.

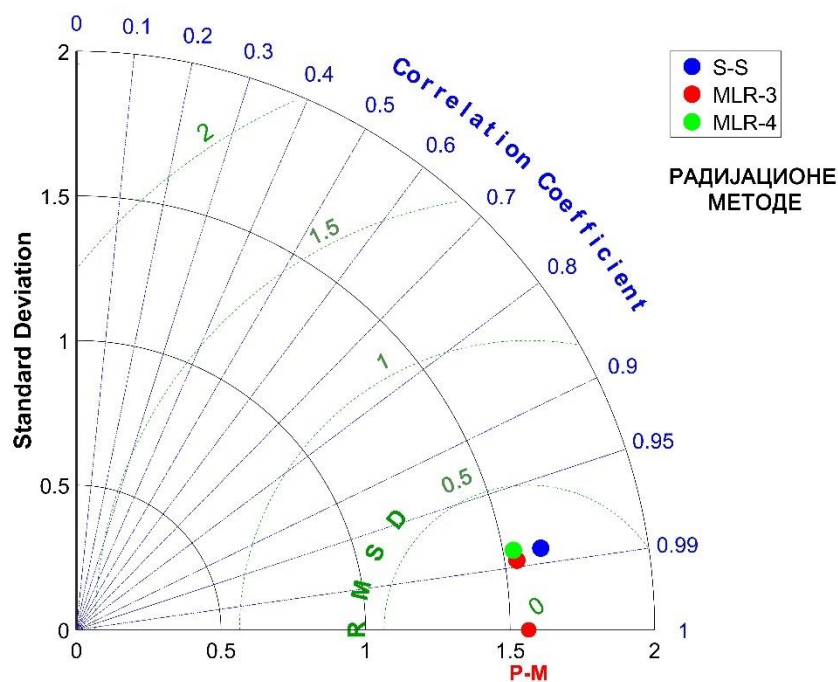


Слика 6.4 – Taylor-ов дијаграм процењене ET_0 применом метода са ограниченим бројем података, за фазу валидације

Слика 6.5 приказује Taylor-ове дијаграме за групу температурних и радијационих метода са минималним бројем потребних података за прорачун урбане ET_0 . Приметно је да код температурне групе све методе имају готово сличне вредности SD (око 1,5). MLR методе, за разлику од оптимизованих, код температурних једначина показују знатно удаљење од P-M методе. На основу слике 6.5 најбоља је температурна метода P-Mt, док је на другом месту H-S, с тим да је она за мали проценат лошија у односу на P-Mt методу. Код радијационих метода уочљива је значајна концентрација свих метода, при чему MLR једначине имају исте вредности SD (око 1,5), а MLR-4 и S-S исте вредности CC (око 0,88). С обзиром на високу концентрацију (незнатне разлике) метода код радијационе групе, може се закључити да методе MLR-3 и S-S, оптимизоване PSO оптимизацијом, дају добре и сличне резултате при процени ET_0 у урбаној средини.



Слика 6.5.1 – Taylor-ов дијаграм процењене ET_0 применом температурне групе метода са ограниченим бројем података



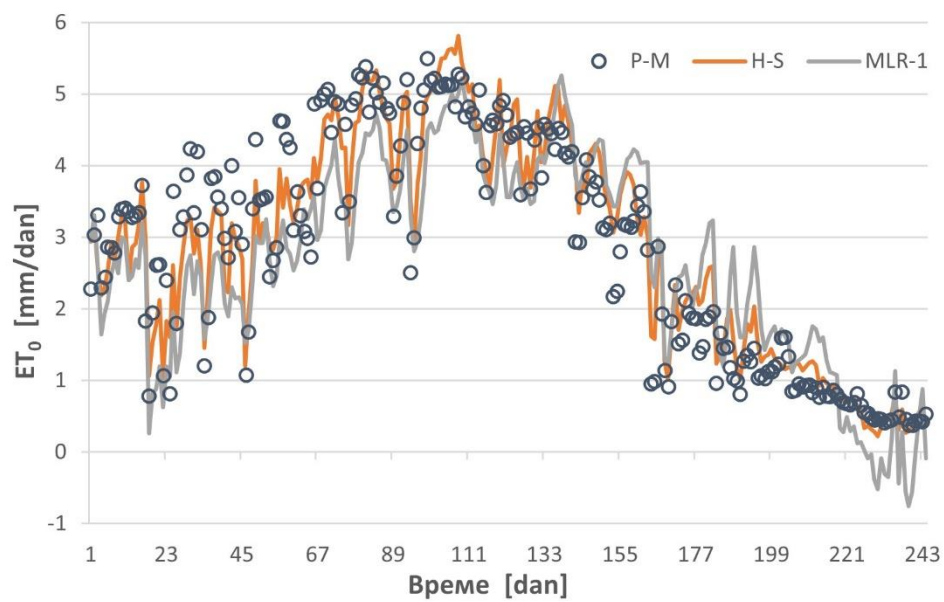
Слика 6.5.2 – Taylor-ов дијаграм процењене ET_0 применом радијационе групе метода са ограниченим бројем података

Слика 6.5 – Taylor-ов дијаграм процењене ET_0 применом температурне и радијационе групе метода са ограниченим бројем података, за фазу валидације

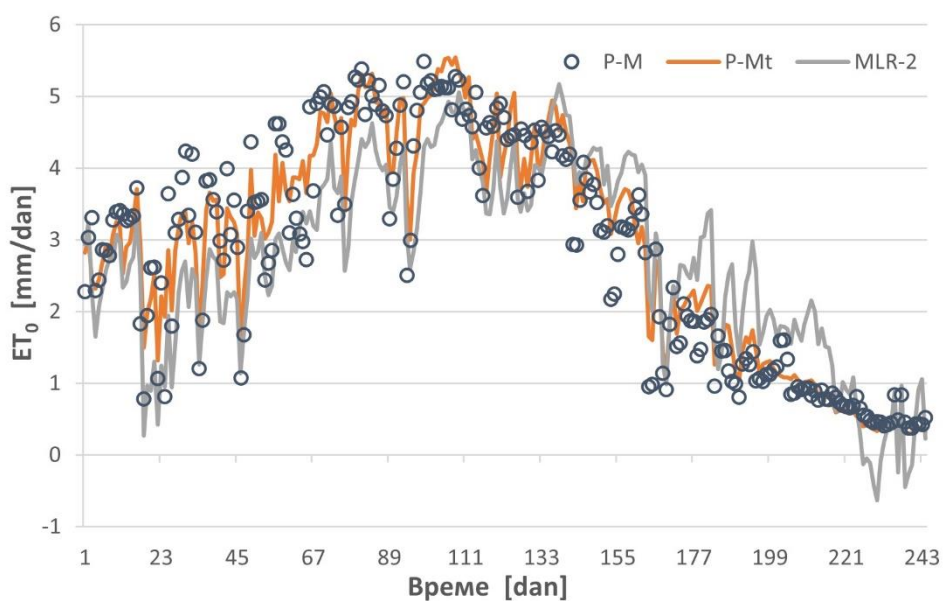
Извршено је међусобно поређење метода, оптимизованих PSO оптимизацијом и MLR, заснованих на истој структури улазних података са референтном ET_0 методом, у урбаним условима за фазу валидације, слика 6.6. Упоређивањем метода заснованих на температурним подацима, уочава се процентуална промена MLR-1 у односу на H-S која на основу R^2 , NSE и KGE тестова износи -20,0 %, -21,8 % и -13,8 %, респективно. Одступање између метода приметно је током целе 2024. године. Такође, уочава се да анализиране методе у првој половини периода валидације потцењују P-M вредности. Поређењем метода P-Mt и MLR-2, које за улазне податке користе T_{min} и T_{max} , са P-M уочава се да P-Mt знатно боље одговара референтним вредностима ET_0 него ли MLR-2. Ова разлика је посебно изражена током јесењег периода када MLR-2 једначина знатно прецењује P-M вредности. Разлика између две посматране методе највише је изражена током пролећног периода, односно у мају и јуну и просечно износи 20,7 %. Највећа промена код свих посматраних температурних метода уочљива је између H-S и MLR-2 и просечно, по статистичким индикаторима, она износи 49,5 %.

Упоредна анализа радијационих формула (засноване на T_{min} , T_{max} , T_{sr} и R_s), S-S и MLR-3 и S-S и MLR-4, показује занемарљива одступања, односно процентуална промена статистичких тестова R^2 , RMSE, MAE, NSE и KGE износи 0,6 %, -11,8 %, -14,7 %, 0,8 %, 1,7 % и -0,2 %, -1,6 %, -1,4 %, 0,1 % 2,0 %, респективно. На основу табела 5.7 и 6.6, издваја се MLR-3 као метод који даје најприближније вредности P-M, а након њега следе методе MLR-4 и S-S. Посебно се издваја склоност оптимизоване једначине S-S да потцењује референтну ET_0 током појаве минималних екстремних вредности.

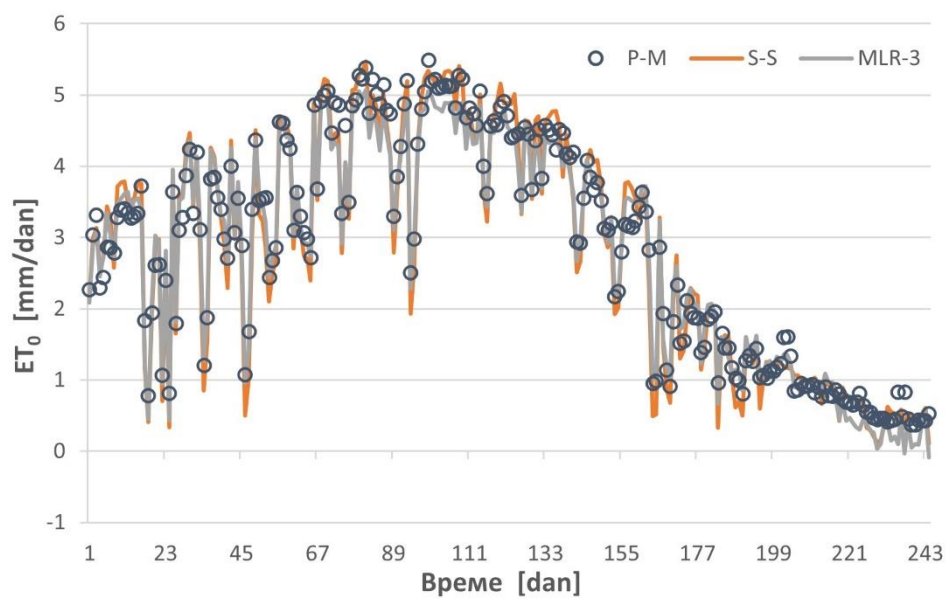
Групно поређење P-Mt, MLR-3 и MLR-5 једначина са P-M јасно издваја MLR-3 као најбољу једначину, док је евапорациона једначина MLR-5 најгора (одступања MLR-5 су посебно изражена током августа). Просечна разлика између P-Mt и MLR-3 је мала и износи 4,2 %, с тим да треба напоменути да је главни недостатак P-Mt методе што не може да прати екстремне вредности у мају и јуну, већ за наведене месеце даје просечне вредности ET_0 .



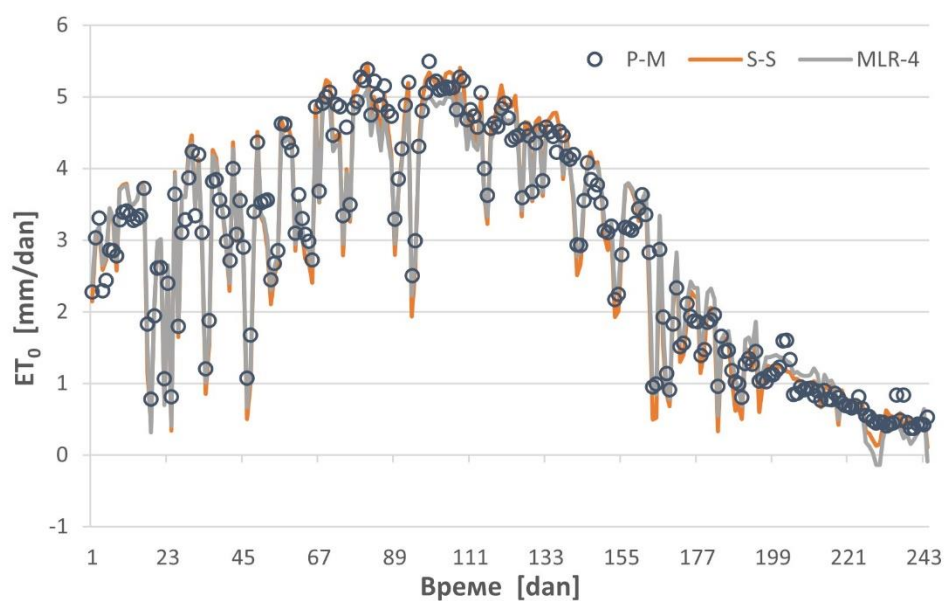
Слика 6.6.1 – Поређење температурних метода H-S и MLR-1 и P-M методе



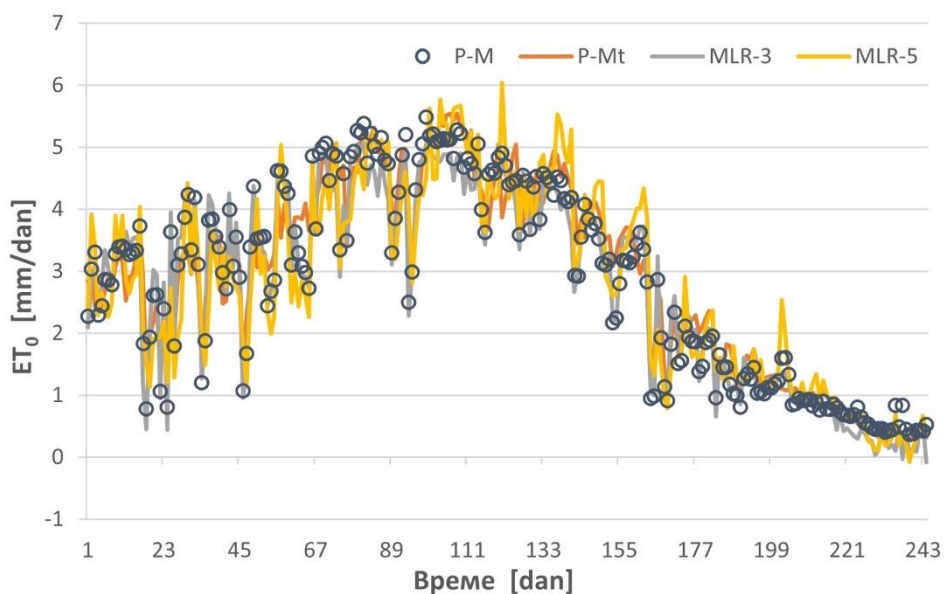
Слика 6.6.2 – Поређење температурних метода P-Mt и MLR-2 и P-M методе



Слика 6.6.3 – Поређење радијационих метода S-S и MLR-3 и P-M методе



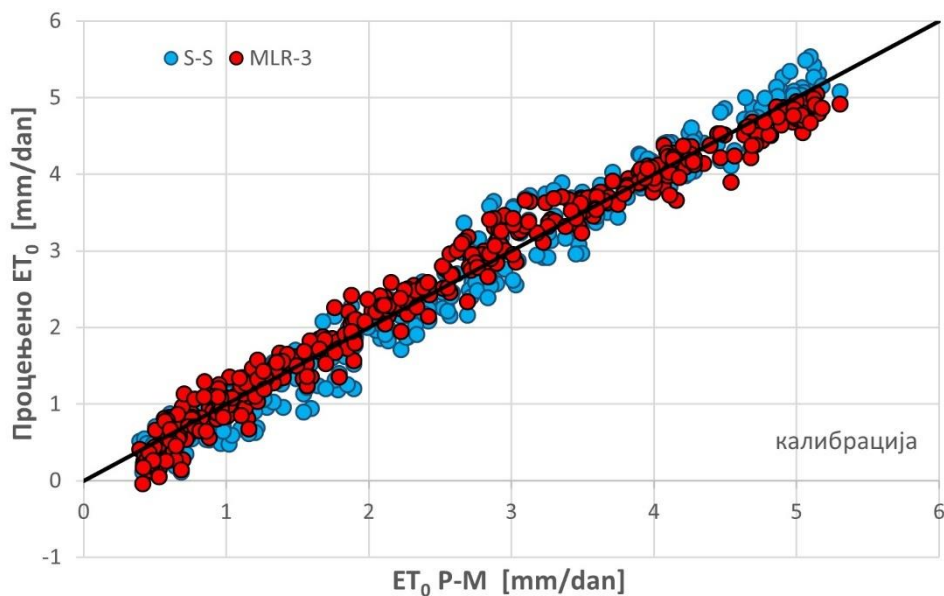
Слика 6.6.4 – Поређење радијационих метода S-S и MLR-4 и P-M методе



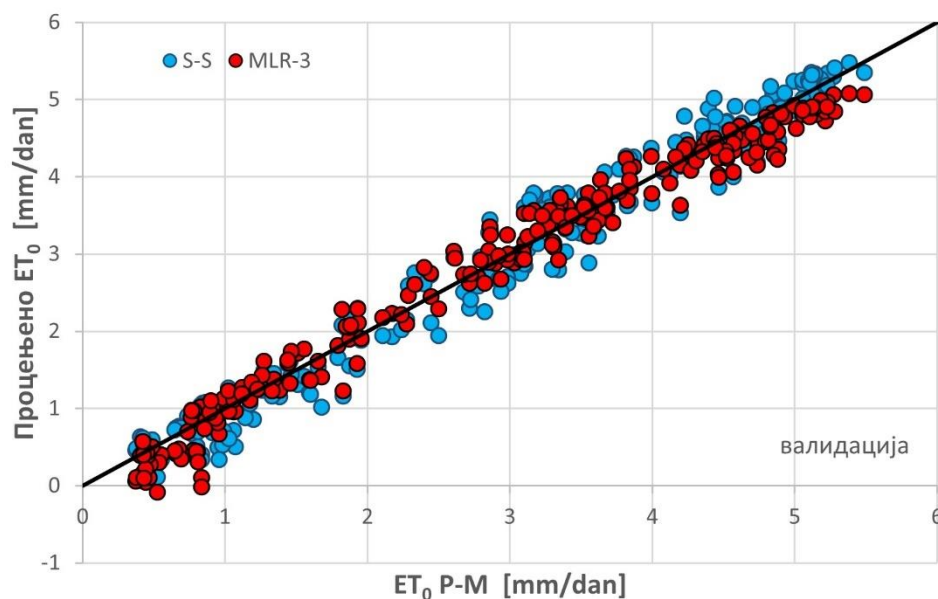
Слика 6.6.5 – Поређење метода P-Mt, MLR-3 и MLR-5 и P-M методе

Слика 6.6 – Међусобно поређење метода са ограниченим бројем улазних података за фазу валидације

Анализом табела 5.7 и 6.6, издвојене су најбоље оптимизоване и MLR методе, са ограниченим бројем података, односно S-S (оптимизована PSO оптимизацијом: $a = 0,311$ и $b = 0,006$) и MLR-3 метода. Упоредна анализа издвојених метода са референтном ET_0 вредношћу, кроз фазе калибрације и валидације, приказана је на слици 6.7.



Слика 6.7.1 – Упоредна анализа најбоље оптимизоване и MLR методе са референтном ET_0 методом током калибрације



Слика 6.7.2 – Упоредна анализа најбоље оптимизоване и MLR методе са референтном ET_0 методом током валидације

Слика 6.7 – Упоредна анализа најбоље оптимизоване и MLR методе са референтном ET_0 методом током калибрације и валидације

Дијаграми расејања за фазе калибрације и валидације показују да нема значајније промене у понашању анализираних једначина. Обе методе имају равномерну расподелу ET_0 вредности у односу на линију 1:1, с тим да је код методе MLR-3 приметно да при високим вредностима метод у малој мери потцењује вредности ET_0 , добијене референтном методом P-M. Поређењем MLR-3 са S-S једначином уочава се да MLR-3 има израженију концентарцију ET_0 вредности око линије 1:1 ($R^2 = 0,976$), него ли S-S, који има незнатну дисперзију ($R^2 = 0,970$). Метод S-S има израженију концентрацију ET_0 око линије 1:1 у фази валидације, него ли током калибрације. На основу слике 6.7 и табела 5.7 и 6.6, закључује се да је метод MLR-3, заснован на T_{min} , T_{max} и R_s , најбољи метод са ограниченим бројем података за предикцију ET_0 вредности у дефинисаним урбаним условима.

7 ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

7.1 Сумирање резултата истраживања

Циљ дисертације је развој методологије за дефинисање потреба за водом референтне културе у урбаним условима. Вода је један од најважнијих стратешких ресурса и одрживо коришћење воде, посебно у урбаним подручјима, може бити изазовно због ограничених извора воде и велике густине насељености. Одређивање потреба за водом биљака је неопходно како би се спречило непотребно исцрпљивање залиха воде, што је посебно важно у урбаним деловима где је доступност водних ресурса оскудна.

Дисертација је свеобухватно упоредила и проценила различите методе у прорачуну референтне евапотранспирације при урбаним условима. Предложени приступ развоју методологије састоји се од више фаза и пратећих корака које следе логичан ток ка циљу дисертације и одређивању најефикасније методе у процени евапотранспирације у урбаним условима.

Полазна основа за хибридни приступ у дефинисању потреба биљака за водом у урбаним условима била је обезбеђење квалитетних података, поштујући сентенцу да је прорачун добар онолико колико су добри подаци. Сходно томе, најпре се приступило решавању „техничких“ проблема односно обезбеђивању квалитетних података из више извора. Коришћене су три групе података. У градском, урбаном окружењу инсталиран је испаритељ класе А са кишомером и анемометром, и у непосредној близини инсталирана је аутоматска метеоролошка станица, која је обезбедила другу групу података. Трећу групу чинили су подаци са референтних услова из метеоролошке опсерваторије у Нишу.

У првом поглављу дисертације постављене су хипотезе на којима се темељи ова студија. Хипотеза о различитим вредностима евапотранспирације у урбаној и референтној средини испитана је компаративном анализом референтне евапотранспирације уз употребу података из урбане и референтне средине. Уочена је статистички значајна разлика која је изазвана разликама у локацији две метеоролошке станице, у локалном окружењу и у локалним метеоролошким условима. Анализа вредности референтне евапотранспирације добијена уз помоћ података са више извора (испаритељ, аутоматска и конвенционална метеоролошка станица) недвосмислено је потврдила хипотезу да се за прорачун евапотранспирације у урбаној средини морају

користити подаци из исте средине, јер подаци са метеоролошких станица дају незадовољавајуће резултате. Потврда хипотезе да је могуће побољшати тачност метода за прорачун евапотранспирације узимајући у обзир микроклиматске услове, нашла је упориште у чињеници да су методе са подацима из урбане средине супериорније у односу на исте методе али са подацима из конвенционалне станице.

Директно мерење евапотранспирације је дуготрајан поступак који захтева скупу опрему и квалификовани оперативни рад, па се као алтернатива намеће моделирање евапотранспирације из временских података. Емпиријске једначине за процену референтне евапотранспирације могу бити поуздане у областима у којим су развијене али су могуће велике грешке када се примењују на друга климатска подручја. За процену евапотранспирације разматране су четири групе метода: температурне, радијационе, евапорационе и комбиноване методе. Комбинована метода FAO – 56 Penman-Monteith због своје физичке основе и чињенице да се може користити глобално без калибрације или модификације, коришћена је као референтна једначина у анализама и поређењима. Након анализа односа између евапотранспирације и њених детерминанти сагледана је ефикасност једначина за процену референтне евапотранспирације.

Анализа осетљивости, односно стопа промене једног фактора у односу на промену другог, дала је одговор које су најутицајније варијабле код референтне евапотранспирације, што је од кључног значаја приликом калибрације метода. Анализа је показала да је утицај ветра на испаравање мали а да је најутицајнији фактор сунчево зрачење. Са овим информацијама кренуло се у фазу оптимизације анализираних формула референтне евапотранспирације. За процес оптимизације коришћене су две најпознатије савремене методе: генетски алгоритам и оптимизација ројем честица. Обе технике оптимизације значајно су унапредиле све једначине а на основу статистичких тестова и дијаграма, најбољи оптимизовани метод, односно најбољу подударност са референтном једначином имао је метод Priestly-Taylor, оптимизован оптимизацијом ројем честица. Ипак, као најстабилнији метод издваја се Stephens and Stewart, модификован оптимизацијом ројем честица.

Раније је наглашено да је комбинована Penman-Monteith метода супериорна у различитим климатским условима али и да захтева бројне податке који су често недоступни, у чему је и њено ограничење. Развијено је више метода са минималним бројем података, углавном је реч о температурним и радијационим методама, међутим и код њих је неопходна калибрација константи како би одговарале локалним условима.

Значај ових једначина долази до изражаја у регионима где недостају подаци о влажности, сунчевом зрачењу, ветру или су они упитног квалитета а располаже се са подацима о температури за чије мерење није потребна велика обученост и могу се мерити са мање грешака. Велики проблем код ових једноставних једначина је да оне дају недоследне вредности, јер у основи оне не моделирају физичке процесе, односно или потцењују или прецењују вредности референтне евапотранспирације добијене стандардизованом Penman-Monteith методом.

Посебан део дисертације (поглавље 6) обухватио је развој нових једначина за прорачун референтне евапотранспирације са ограниченим бројем података. За развој нових једначина примењена је метода вишеструке линеарне регресије са различитим комбинацијама климатских варијабли. Регресиона анализа је једна од најчешће коришћених статистичких метода која се често користи за откривање зависности између више варијабли од којих је бар једна независна, посебно у регионима у којима недостају климатски подаци. Вишеструка линеарна регресија је анализирана у изналажењу једноставне и задовољавајуће тачне технике моделирања евапотранспирације. Развијено је шест регресионих једначина за процену референтне евапотранспирације са шест доступних климатских параметара као улазних вредности. Регресиони метод заснован на подацима о температури, брзини ветра и сунчевом зрачењу, издвојио се као најпогоднији за моделовање референтне евапотранспирације у урбаним условима.

Завршне анализе обухватиле су анализу метода са ограниченим бројем података, где су ове регресионе једначине, заједно са три оптимизоване једначине, упоређене са Penman-Monteith методом. Финални резултати показали су да нова регресиона једначина, заснована на подацима о температури и сунчевом зрачењу, представља најефикаснију методу за дефинисање урбане референтне евапотранспирације.

Основна идеја ове студије била је да се са релативно скромном опремом феномен евапотранспирације сагледа са различитих аспеката и покаже да се ова методологија може користити и у градским условима. Новије методе мерења евапотранспирације као што је Eddy коваријанса и Bowen-ов однос у којима се директно мери масени флуks из вегетације могу бити веома тачне, али оне траже изузетно осетљиве и скупе инструменте и одговарајуће знање оператера што значајно смањује њихову употребу.

У дисертацији су приказани различити видови сагледавања и приказивања добијених резултата који могу бити од користи аналитичарима при доношењу одлука на

различитим нивоима у зависности од специфичних потреба. Управо та разноликост омогућава да се на јасан и очигледан начин сагледају међусобни односи различитих метода прорачуна референтне евапотранспирације.

Студија је дефинисала међусобне односе разних метода, прилагођених конкретним условима, упоредила њихову ефикасност и предложила најефикасније и најоптималније методе за дату локацију. Резултати ове студије могу се применити на градове средње величине у сличним климатским условима, односно са умерено-континенталном климом. Хетерогеност градских средина и микроклиматска разноврсност онемогућују изналажење универзално применљиве и најтачније методе за процену потреба биљака за водом, али предложени приступ својом флексибилношћу пружа могућност прилагођавања једначина специфичним локалним условима.

Ова дисертација је пружила и методологију приступа дефинисању потреба за водом биљака која омогућава да се методе прорачуна, односно њихови параметри, прилагоде разним карактеристичним регионалним условима, чиме ова методологија добија регионални значај. Наведеном теоријском доприносу треба додати практичан значај добијених резултата. Методологије спроведене у овом раду омогућују стварање услова за унапређење мелиоративних мера (потребе и распоред наводњавања) у складу са принципима одрживог коришћења воде у градским условима. Познавање потреба за водом даје пун допринос и омогућава примену интегралног приступа при управљању урбаним водама, који је фокусиран на дугорочну одрживост и има за циљ да обезбеди оптималну потрошњу воде, а самим тим и побољша квалитет живота у урбаним срединама.

Познавање евапотранспирације урбане вегетације пружа полазне вредности за основне принципе интегралног приступа управљања урбаним водама, као што су социјална правичност, економска ефикасност и еколошка одрживост.

7.2 Смернице за будућа истраживања

Резултати и закључци ове студије указују на неколико будућих праваца истраживања.

Приступ директно мереним финалним подацима може да представља изазов у будућим студијама. Овакве податке код евапотранспирације је могуће прибавити набавком класичне (лизиметри) и савремене (eddy коваријанса и сцинтилометар) мерне

опреме. Наведена опрема представља тачкасти извор података, што је у урбаним срединама ограничавајући фактор, тако да би пажњу требало посветити и набавци мобилне опреме за мерење евапотрнпације и њених параметара. Поред мерне опреме, методологија даљинске детекције података представља поуздан и све популарнији начин у прибављању података, посебно у градским срединама која су склона великим варијацијама климатских параметара на малом растојању.

Посебну пажњу требало би посветити анализи неизвесности основних података. Оваква анализа у комбинацији са анализом осетљивости довела би до дефинисања потенцијалне примене и значаја података у новим формулама. Будућа истраживања, поред класичних, морају да узму у обзир и савремене приступе при моделовању референтне евапотранспирације. Примена техника машинског учења је посебно изражена у савременим студијама, чиме се драстично унапређује аналитички приступ при моделовању евапотранспирације.

Истраживање ка коме треба усмерити пажњу је анализа утицаја урбанизације на евапотранспирацију. Узимајући у обзир изражене климатске промене, ефекат урбаних топлотних острва, разноврсност урбане вегетације и густину насељености, урбана подручја су све више погођена несташицом воде, што евапотранспирацију ставља као кључну компоненту будућег урбаног озелењавања градова и издваја њен значај у будућности. Како би се финализовала истраживања урбанизације и евапотранспирације, неопходно је сагледати понашање климатских параметара и евапотранспирације у будућности. Овакво истраживање довело би до бољег разумевања екохидролошких одговора и помогло би заштити животне средине од потенцијалне штете брзе урбанизације.

Један од праваца будућих истраживања је примена предложене методологије на нивоу целе регије, што би за резултат имало закључке који би били од велике користи при регионалном планирању потреба за водом.

ЛИТЕРАТУРА

- Abdel-Basset M., Abdel-Fatah L., Sangaiah A.K. 2018. Metaheuristic algorithms: a comprehensive review. In *Computational Intelligence for Multimedia Big Data on the Cloud with Engineering Applications*, edited by Sangaiah A.K., Sheng M., Zhang Z., 185-231. Cambridge, USA: Academic Press.
- Abtew W. and Melesse A. 2013. *Evaporation and evapotranspiration – measurements and estimations*. Dordrecht, NL: Springer.
- Agam N., Evett S.R., Tolk J.A., Kustas W.P., Colaizzi P.D., Alfieri J.G., McKee L.G., Copeland K.S., Howell T.A., Chávez J.L. 2012. Evaporative loss from irrigated interrows in a highly advective semi-arid agricultural area. *Advances in Water Resources*, 50, 20-30. DOI:10.1016/j.advwatres.2012.07.010.
- Alexandersson H. 1986. A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6 (6), 661-675. DOI:10.1002/joc.3370060607.
- Alexandris S., Stricevic R., Petkovic S. 2008. Comparative analysis of reference evapotranspiration from the surface of rainfed grass in central Serbia, calculated by six empirical methods against the Penman-Monteith formula. *European Water*, 21/22, 17-28.
- Allen R. 2008. Quality assessment of weather data and micrometeorological flux – impacts on evapotranspiration calculation. *Journal of Agricultural Meteorology*, 64 (4), 191-204. DOI:10.2480/agrmet.64.4.5.
- Allen R.G., Pereira L.S., Howell T.A., Jensen M.E. 2011a. Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural water management*, 98, 899-920. DOI:10.1016/j.agwat.2010.12.015.
- Allen R.G., Pereira L.S., Howell T.A., Jensen M.E. 2011b. Evapotranspiration information reporting: II. Recommended documentation. *Agricultural Water Management*, 98, 921-929. DOI:10.1016/j.agwat.2010.12.016.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith. M. 1998. *Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements*. Rome, IT: Food and Agriculture Organization, Irrigation and Drainage 56.

- Allen R.G. and Pruitt W.O. 1991. FAO-24 reference evapotranspiration factors. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 117 (5), 758-773. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9437(1991)117:5(758).
- Allen R.G., Pruitt W.O., Businger J.A., Fritschen L.J., Jensen M.E., Quinn F.H. 1996. Evaporation and transpiration. In *Hydrology handbook*, second edition, edited by Heggen R.J., 125-252. New York, USA: American Society of Civil Engineers, Manuals and Reports on Engineering Practice No. 28.
- Anderson M., Allen R.G., Morse A., Kustas W.P. 2012. Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. *Remote Sensing of Environment*, 122, 50-65. DOI:10.1016/j.rse.2011.08.025.
- Berggren K., Moghadas S., Gustafsson A.M., Ashley R., Viklander M. 2013. Sensitivity of urban stormwater systems to runoff from green/pervious areas in a changing climate. *Proceedings of International Conference on Planning and Technologies for Sustainable Urban Water Management*, 1-10.
- Beven K. 1979. A sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration estimates. *Journal of Hydrology*, 44 (3-4), 169-190. DOI:10.1016/0022-1694(79)90130-6.
- Bickici Arikan B. and Kahya E. 2019. Homogeneity revisited: analysis of updated precipitation series in Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 135, 211-220. DOI:10.1007/s00704-018-2368-x.
- Biondi D., Freni G., Iacobellis V., Mascaro G., Montanari A. 2012. Validation of hydrological models: conceptual basis, methodological approaches and a proposal for a code of practice. *Physics and Chemistry of the Earth*, 42-44, 70-76. DOI:10.1016/j.pce.2011.07.037.
- Bonacci O. 1991. The influence of errors in precipitation measurements on the accuracy of the evaporation measurements performed by a Class A evaporation pan. *Theoretical and Applied Climatology*, 43, 181-183. DOI:10.1007/BF00867453.
- Bowen I.S. 1926. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physical Review*, 27, 779-787. DOI:10.1103/PhysRev.27.779.

- Бошњак Ђ. 1982. Евапорација са слободне водене површине као основа заливног режима и њен однос према ЕТР кукуруза и соје. Докторска дисертација, Пољопривредни факултет, Универзитет у Новом Саду.
- Бошњак Ђ. 2003. Наводавање у башти. Нови Сад, СРЈ: Научни институт за ратарство и повртарство, Пољопривредни факултет, Универзитет у Новом Саду.
- Box G.E.P. 1957. Evolutionary operation: a method for increasing industrial productivity. *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics*, 6 (2), 81-101. DOI:10.2307/2985505.
- Brutsaert W. 1982. *Evaporation into the atmosphere, theory, history and applications*. Dordrecht, NL: Springer Science + Business Media.
- Brutsaert W. 2005. *Hydrology – an introduction*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Buishand T.A. 1982. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, 58 (1-2), 11-27. DOI:10.1016/0022-1694(82)90066-X.
- Carlson T.N., Arthur S.T. 2000. The impact of land use – land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: a satellite perspective. *Global and Planetary Change*, 25 (1-2), 49-65. DOI:10.1016/S0921-8181(00)00021-7.
- Chartzoulakis K., Bertaki, M. 2015. Sustainable water management in agriculture under climate change. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, 88-98. DOI: 10.1016/j.aaspro.2015.03.011.
- Chen J., Bu J., Su Y., Yuan M., Cao K., Gao Y. 2022. Urban evapotranspiration estimation based on anthropogenic activities and modified Penman-Monteith model. *Journal of Hydrology*, 610, 1-15. DOI:10.1016/j.jhydrol.2022.127879.
- Cleugh H.A., Bui E., Simon D., Xu J., Mitchell V.G. 2005. The impact of suburban design on water use and microclimate. *Proceedings of International Congress on Modelling and Simulation*. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, 2019-2025.
- Christiansen J.E. 1966. *Estimating evaporation and evapotranspiration from climatic data*. Logan, USA: Utah Water Research Laboratory.
- Collette Y., Siarry P. 2003. *Multiobjective optimization: principles and case studies*. Berlin, DE: Springer-Verlag.

- Cong Z.T., Shen Q.N., Zhou L., Sun T., Liu J.H. 2017. Evapotranspiration estimation considering anthropogenic heat based on remote sensing in urban area. *Science China Earth Sciences*, 60, 659-671. DOI:10.1007/s11430-016-0216-3.
- Damm A., Paul-Limoges E., Haghighi E., Simmer C., Morsdorf F., Schneider F.D., van der Tol C., Migliavacca M., Rascher U. 2018. Remote sensing of plant-water relations: An overview and future perspectives. *Journal of Plant Physiology*, 227, 3-19. DOI:10.1016/j.jplph.2018.04.012.
- Debnath S., Adamala S., Raghuwanshi N.S. 2015. Sensitivity analysis of FAO-56 Penman-Monteith method for different agro-ecological regions of India. *Environmental Processes*, 2, 689-704. DOI:10.1007/s40710-015-0107-1.
- DESA (Department of economic and social affairs) 2010. World urbanization prospects: the 2009 revision – highlights. New York, USA: United Nations.
- DESA (Department of economic and social affairs) 2015. World urbanization prospects: the 2014 revision. New York, USA: United Nations.
- Dimitriadou S. and Nikolakopoulos K.G. 2022. Multiple linear regression models with limited data for the prediction of reference evapotranspiration of the Pelopennese, Greece. *Hydrology*, 9 (7), 1-15. DOI:10.3390/hydrology9070124.
- Dingman S.L. 2015. Physical hydrology, third edition. Long Grove, USA: Waveland Press, Inc.
- Dolman A.J. 2005. Actual Evaporation. In *Encyclopedia of Hydrological Sciences*, edited by Anderson M.G., 647-656. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd.
- Doorenbos J., Pruitt W.O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. Rome, IT: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Irrigation and Drainage Paper 24.
- Ebrahimian A., Wadzuk B., Traver R. 2019. Evapotranspiration in green stormwater infrastructure systems. *Science of the Total Environment*, 688, 797-810. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.06.256.
- EC (European Commission) 2013. Green infrastructure (GI): enhancing Europe's natural capital. Brussels, EU: Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.

- Eiben A.E., Smith J.E. 2015. Introduction to evolutionary computing, second edition. Berlin, DE: Springer-Verlag.
- Endreny T.A. 2006. Land use and land cover effects on runoff processes: urban and suburban development. In Encyclopedia of Hydrological Sciences, edited by Anderson M.G., McDonnell J.J., 1754-1782. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Ltd.
- Feng S., Hu. Q., Qian W. 2004. Quality control of daily meteorological data in China 1951-2000: a new dataset. International journal of climatology, 24, 853-870. DOI:10.1002/joc.1047.
- Feng Y. 2018. Evapotranspiration from green infrastructure: benefit, measurement and simulation. In Advanced Evapotranspiration Methods and Applications, edited by Bucur D., 1-19. London, UK: IntechOpen.
- Fetter C.W. 2000. Applied hydrology, fourth edition. New Jersey, USA: Prentice Hall.
- Fletcher T.D., Andrieu H., Hamel P. 2013. Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art. Advances in Water Resources, 51, 261-279. DOI:10.1016/j.advwatres.2012.09.001.
- Forster M.A. 2017. How reliable are heat pulse velocity methods for estimating tree transpiration. Forests, 8 (9), 1-11. DOI:10.3390/f8090350.
- Glover F. 1986. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. Computers & Operations Research, 13 (5), 533-549. DOI:10.1016/0305-0548(86)90048-1.
- Gong L., Xu C.-Y., Chen D., Halldin S., Chen Y.D. 2006. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. Journal of Hydrology, 329, 620-629. DOI:10.1016/j.jhydrol.2006.03.027.
- Grimmond C.S.B. 2006. Progress in measuring and observing the urban atmosphere. Theoretical and Applied Climatology, 84, 3-22. DOI:10.1007/s00704-005-0140-5.
- Grimmond C.S.B., Oke T.R. 1995. Comparison of heat fluxes from summertime observations in the suburbs of four North American cities. Journal of Applied Meteorology, 34, 873-889. DOI:10.1175/1520-0450(1995)034<0873:COHFFS>2.0.CO;2.

- Grimmond C.S.B., Oke T.R. 1999. Evapotranspiration rates in urban areas. Proceedings of Impacts of Urban Growth on Surface Water and Groundwater Quality Symposium, 259, 235-243.
- Grimmond C.S.B., Roth M., Oke T.R., Au Y.C., Best M., Betts R., Carmichael G., Cleugh H., Dabberdt W., Emmanuel R., Freitas E., Fortuniak K., Hanna S., Klein P., Kalkstein L.S., Liu C.H., Nickson A., Pearlmutter D., Sailor D., Voogt J. 2010. Climate and more sustainable cities: Climate information for improved planning and management of cities (producers/capabilities perspective). *Procedia Environmental Sciences*, 1, 247-274. DOI:10.1016/j.proenv.2010.09.016.
- Grismer M.E., Orang M., Snyder R., Matyac R. 2002. Pan evaporation to reference evapotranspiration conversion methods. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 128 (3), 180-184. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9437(2002)128:3(180).
- Gupta H.V., Kling H., Yilmaz K.K., Martinez G.F. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377, 80-91. DOI:10.1016/j.jhydrol.2009.08.003.
- Gupta H.V., Sorooshian S., Yapo P.O. 1998. Toward improved calibration of hydrologic models: multiple and noncommensurable measures of information. *Water Resource Research*, 34 (4), 751-763. DOI:10.1029/97WR03495.
- Haley M.B., Dukes M.D., Miller G.L. 2007. Residential irrigation water use in Central Florida. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133 (5), 427-434. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:5(427).
- Hargreaves G.H., Allen R.G. 2003. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 129 (1), 53-63. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9437(2003)129:1(53).
- Hargreaves G.H., Samani Z.A. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1 (2), 96-99. DOI:10.13031/2013.26773.
- Harmel R.D., Smith P.K., Migliaccio K.W. 2010. Modifying goodness-of-fit indicators to incorporate both measurement and model uncertainty in model calibration and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 53 (1), 55-63. DOI:10.13031/2013.29502.

- Holland J.H. 1992. Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence. Cambridge, USA: The MIT Press.
- Irmak S., Haman D.Z. 2003. Evaluation of five methods for estimating Class A pan evaporation in a humid climate. *HortTechnology*, 13 (3), 500-508. DOI:10.21273/HORTTECH.13.3.0500.
- Irmak S., Payero J.O., Martin D.L., Irmak A., Howell T.A. 2006. Sensitivity analysis and sensitivity coefficients of standardized daily ASCE-Penman-Monteith equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 132 (6), 564-578. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9437(2006)132:6(564).
- Jensen M.E. 1966. Empirical methods of estimating or predicting evapotranspiration using radiation. *Proceedings of the Evapotranspiration and Its Role in Water Resources Management*, 49-53.
- Jensen M.E., Allen R.G., Howell T.A., Martin D.L., Snyder R., Walter I.A. 2016. Evaporation, evapotranspiration and irrigation water requirements, second edition. Reston, USA: American Society of Civil Engineers, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70.
- Kawamura A., Tarek M. 2017. Evolutionary computing: genetic algorithms. In *Handbook of Applied Hydrology*, second edition, edited by Singh V.P., 13-1-13-4. New York, USA: McGraw-Hill Education.
- Kennedy J., Eberhart R. 1995. Particle swarm optimization. *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks* 4, 1942-1948.
- Kisi O., Ay M. 2016. Reply to the comments on “Comparison of Mann-Kendall and innovative trend method for water quality parameters of the Kizilirmak River, Turkey” by Kisi, O. and Ay M. [*J. Hydrol.* 513 (2014) 362-375] and “An innovative method for trend analysis of monthly pan evaporations” by Kisi, O. [*J. Hydrol.* 527 (2015) 1123-1129]. *Journal of Hydrology*, 528, 883-884. DOI:10.1016/j.jhydrol.2016.04.065.
- Kohler M.A., Nordenson T.J., Fox W.E. 1955. Evaporation from pans and leaks. Washington, USA: U. S. Department of Commerce, Weather Bureau.

- Konak A., Coit D.W., Smith A.E. 2006. Multi-objective optimization using genetic algorithms: a tutorial. *Reliability Engineering & System Safety*, 91 (9), 992-1007. DOI:10.1016/j.ress.2005.11.018.
- Kool D., Agam N., Lazarovitch N., Heitman J.L., Sauer T.J., Ben-Gal A. 2014. A review of approaches for evapotranspiration partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 184, 56-70. DOI:10.1016/j.agrformet.2013.09.003.
- Legates D.R., McCabe G.J. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35 (1), 233-241. DOI:10.1029/1998WR900018.
- Lenhart T., Eckhardt K., Fohrer N., Frede H.-G. 2002. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Physics and Chemistry of the Earth*, 27 (9-10), 645-654. DOI:10.1016/S1474-7065(02)00049-9.
- Lin Y., Wang G.X., Guo J.Y., Sun X.Y. 2012. Quantifying evapotranspiration and its components in a coniferous subalpine forest in Southwest China. *Hydrological Processes*, 26 (20), 3032-3040. DOI:10.1002/hyp.8321.
- Liu Y., Ni Z., Zhao Y., Zhou G., Luo Y., Li S., Wang D., Zhang S. 2022. Spatial-temporal evolution and driving forces of drying trends on the Qinghai-Tibet plateau based on geomorphological division. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19 (13), 1-31. DOI: 10.3390/ijerph19137909.
- Lloyd D. 1938. Evaporation over catchment areas. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 64 (276), 423-444. DOI:10.1002/qj.49706427607.
- Lu X., Ju Y., Wu L., Fan J., Zhang F., Li Z. 2018. Daily pan evaporation modeling from local and cross-station data using three tree-based machine learning models. *Journal of Hydrology*, 566, 668-684. DOI:10.1016/j.jhydrol.2018.09.055.
- Maier H.R., Kapelan Z., Kasprzyk J., Kollat J., Matott L.S., Cunha M.C., Dandy G.C., Gibbs M.S., Keedwell E., Marchi A., Ostfeld A., Savic D., Solomatine D.P., Vrugt J.A., Zecchin A.C., Minsker B.S., Barbour E.J., Kuczera G., Pasha F., Castelletti A., Giuliani M., Reed P.M. 2014. Evolutionary algorithms and other metaheuristics in water resources: current status, research challenges and future directions. *Environmental Modelling & Software*, 62, 271-299. DOI:10.1016/j.envsoft.2014.09.013.

- Makkink G.F. 1957. Testing the Penman formula by means of lysimeters. *Journal of the Institution of Water Engineers*, 11 (3), 277–288.
- McCuen R.H. 1974. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation. *Journal of the American Water Resources Association – JAWRA*, 10 (3), 486-497. DOI:10.1111/j.1752-1688.1974.tb00590.x.
- McCuen R.H. 1998. *Hydrologic analysis and design*, second edition. New Jersey, USA: Prentice Hall.
- McCuen R.H. 2003. *Modeling hydrologic change – statistical methods*. Boca Raton, USA: Lewis Publishers.
- McCuen R.H., Knight Z., Cutter A.G. 2006. Evaluation of the Nash-Sutcliffe efficiency index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 11, 597-602. DOI:10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(597).
- McKenney M.S., Rosenberg N.J. 1993. Sensitivity of some potential evapotranspiration estimation methods to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 64, 81-110. DOI:10.1016/0168-1923(93)90095-Y.
- McMahon T.A., Peel M.C., Lowe L., Srikanthan R., McVicar T.R. 2013. Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17 (4), 1331-1363. DOI:10.5194/hess-17-1331-2013.
- Meerow S., Newell J.P. 2017. Spatial planning for multifunctional green infrastructure: Growing resilience in Detroit. *Landscape and Urban Planning*, 159, 62-75. DOI:10.1016/j.landurbplan.2016.10.005.
- Milanovic M., Milicevic D., Trajkovic S. 2025. Assessment and calibration of empirical pan evaporation methods in an urban area. *Urban Water Journal*, 22 (5), 550-565. DOI:10.1080/1573062X.2025.2495209.
- Milanovic M., Trajkovic S., Gocic M. 2017. Comparative analysis of methods for the calculation of the pan coefficient. *Proceedings of the 5th International Conference Contemporary Achievements in Civil Engineering*, 645-650.
- Милосављевић М. 1982. Метеорологија, десето издање. Београд, СФРЈ: Научна књига.

- Monteith J.L. 1965. Evaporation and environment. *Proceedings of the 19th Symposium Society for Experimental Biology*, 19, 205-234.
- Montgomery D.C., Peck E.A., Vining G.G. 2021. *Introduction to linear regression analysis*, sixth edition. Hoboken, USA: John Wiley and Sons, Inc.
- Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50 (3), 885-900. DOI:10.13031/2013.23153.
- Nash J.E., Sutcliffe J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I – a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282-290. DOI:10.1016/0022-1694(70)90255-6.
- Nedic V., Cvetanovic S., Despotovic D., Despotovic M., Babic S. 2014. Data mining with various optimization methods. *Expert Systems with Applications*, 41, 3993-3999. DOI:10.1016/j.eswa.2013.12.025.
- Ndiaye P.M., Bodian A., Diop L., Djaman K. 2017. Sensitivity analysis of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to climatic variables: case of Burkina Faso. *Journal of Water Resource and Protection*, 9, 1364-1376. DOI:10.4236/jwarp.2017.912087.
- Nguyen T.T., Ngo H.H., Guo W., Wang X.C., Ren N., Li G., Ding J., Liang H. 2019. Implementation of a specific urban water management – Sponge City. *Science of the Total Environment*, 652, 147-162. DOI:10.1016/j.scitotenv.2018.10.168.
- Niaghi A.R., Jia X., Steele D.D., Scherer T.F. 2019. Drainage water management effects on energy flux partitioning, evapotranspiration, and crop coefficients of corn. *Agricultural Water Management*, 225, 1-11. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.105760.
- Nouri H., Beecham S., Kazemi F., Hassanli A.M. 2013. A review of ET measurement techniques for estimating the water requirements of urban landscape vegetation. *Urban Water Journal*, 10 (4), 247-259. DOI:10.1080/1573062X.2012.726360.
- Oki T., Kanae S. 2006. Global hydrological cycles and world water resources. *Science*, 313, 1068-1072. DOI:10.1126/science.1128845.

- Orang M. 1998. Potential accuracy of the popular non-linear regression equations for estimating pan coefficient values in the original and FAO-24 table. Sacramento, USA: California Department of Water Resources.
- Ouedraogo A.A., Berthier E., Durand B., Gromaire M.-C. 2022. Determinants of evapotranspiration in urban rain gardens: A case study with lysimeters under temperate climate. *Hydrology*, 9 (42), 1-26. DOI:10.3390/hydrology9030042.
- Peng F., You Q., Xue X., Guo J., Wang T. 2015. Evapotranspiration and its source components change under experimental warming in alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibet plateau. *Ecological Engineering*, 84, 653-659. DOI:10.1016/j.ecoleng.2015.09.069.
- Penman H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 193 (1032), 120-145.
- Pereira L.S. 2011. Challenges on water resources management when searching for sustainable adaptation to climate change focusing agriculture. *European Water*, 34, 41-54.
- Pereira L.S., Cai L.G., Hann M.J. 2003. Farm water and soil management for improved water use in the North China plain. *Irrigation and Drainage*, 52, 299-317. DOI:10.1002/ird.098.
- Peterson T.C. and Easterling D.R. 1994. Creation of homogeneous composite climatological reference series. *International Journal of Climatology*, 14, 671-679. DOI:10.1002/joc.3370140606.
- Peterson T.C., Easterling D.R., Karl T.R., Groisman P., Nicholls N., Plummer N., Torok S., Auer I., Boehm R., Gullett D., Vincent L., Heino R., Tuomenvirta H., Mestre O., Szentimrey T., Salinger J., Forland E.J., Hanssen-Bauer I., Alexandersson H., Jones P., Parker D. 1998. Homogeneity adjustments of in situ atmospheric climate data: a review. *International Journal of Climatology*, 18 (13), 1493-1517. DOI:10.1002/(SICI)1097-0088(19981115)18:13<1493::AID-JOC329>3.0.CO;2-T.
- Pettitt A.N. 1979. A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics* 28 (2), 126-135. DOI:10.2307/2346729.
- Priestley C.H.B., Taylor R.J. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation under large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100 (2), 81-92. DOI:10.1175/1520-0493(1972)100<0081:OTAOSH>2.3.CO;2.

- Pruitt W.O. 1966. Empirical methods of estimating evapotranspiration using primarily evaporation pans. *Proceedings of the Conference on Evapotranspiration and Its Role in Water Resources Management*, 57-61.
- Qiu G.Y., Yan C., Liu Y. 2023. Urban evapotranspiration and its effects on water budget and energy balance: Review and perspectives. *Earth-Science Reviews*, 246, 1-12. DOI:10.1016/j.earscirev.2023.104577.
- Qiu G.Y., Zou Z., Li X., Li H., Guo Q., Yan C., Tan S. 2017. Experimental studies on the effects of green space and evapotranspiration on urban heat island in a subtropical megacity in China. *Habitat International*, 68, 30-42. DOI:10.1016/j.habitatint.2017.07.009.
- Rahman M.A., Moser A., Rötzer T., Pauleit S. 2017. Microclimatic differences and their influence on transpirational cooling of *Tilia cordata* in two contrasting street canyons in Munich, Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, 232, 443-456. DOI:10.1016/j.agrformet.2016.10.006.
- Rana G., Katerji N. 1998. A measurement based sensitivity analysis of the Penman-Monteith actual evapotranspiration model for crops of different height and in contrasting water status. *Theoretical and Applied Climatology*, 60, 141-149. DOI:10.1007/s007040050039.
- Rana G., Katerji N. 2000. Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review. *European Journal of Agronomy*, 13, 125-153. DOI:10.1016/S1161-0301(00)00070-8.
- Rao S.S. 2020. *Engineering optimization: theory and practice*, fifth edition. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Razali A., Ismail S.N.S., Awang S., Praveena S.M., Abidin E.Z. 2018. Land use change in highland area and its impact on river water quality: a review of case studies in Malaysia. *Ecological Processes*, 7(1), 1-17. DOI:10.1186/s13717-018-0126-8.
- Raziei T., Pereira L.S. 2013. Estimation of ET₀ with Hargreaves-Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. *Agricultural Water Management*, 121, 1-18. DOI:10.1016/j.agwat.2012.12.019.
- Ren G. 2015. Urbanization as a major driver of urban climate change. *Advances in Climate Change Research*, 6, 1-6. DOI:10.1016/j.accre.2015.08.003.

- Ren C., Ren G., Zhang P., Tysa S.K., Qin Y. 2021. Urbanization significantly affects pan-evaporation trends in large river basin of China mainland. *The Land*, 10 (4), 1-11. DOI:10.3390/land10040407.
- Rhoades D.A. and Salinger M.J. 1993. Adjustment of temperature and rainfall records for site changes. *International Journal of Climatology*, 13 (8), 899-913. DOI:10.1002/joc.3370130807.
- Ritter A., Muñoz-Carpena R. 2013. Performance evaluation of hydrological models: statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, 480, 33-45. DOI:10.1016/j.jhydrol.2012.12.004.
- Roderick M.L., Rotstayn L.D., Farquhar G.D., Hobbins M.T. 2007. On the attribution of changing pan evaporation. *Geophysical Research Letters*, 34, 1-6. DOI:10.1029/2007GL031166.
- Saadi M., Oudin L., Ribstein P. 2020. Crossing the rural-urban boundary in hydrological modelling: How do conceptual rainfall-runoff models handle the specificities of urbanized catchments. *Hydrological Processes*, 34(15), 3331-3346. DOI:10.1002/hyp.13808.
- Sachs R.M., Kretchun T., Mock T. 1975. Minimum Irrigation requirements for landscape plants. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 100 (5), 499-502. DOI:10.21273/JASHS.100.5.499.
- Saltelli A., Ratto M., Andres T., Campolongo F., Cariboni J., Gatelli D., Saisana M., Tarantola S. 2008. *Global sensitivity analysis. The primer*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.
- Scheerlinck K., Pauwels V.R.N., Vernieuwe H., De Baets B. 2009. Calibration of a water and energy balance model: Recursive parameter estimation versus particle swarm optimization. *Water Resources Research*, 45, 1-22. DOI:10.1029/2009WR008051.
- Sentelhas P.C., Gillespie T.J., Santos E.A. 2010. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canada. *Agricultural Water Management*, 97, 635-644. DOI:10.1016/j.agwat.2009.12.001.
- Shaw E.M., Beven K.J., Chappell N.A., Lamb R. 2011. *Hydrology in practice*, fourth edition. London, UK: Spon Press.

- Shuttleworth W.J. 1993. Evaporation. In Handbook of Hydrology, edited by Maidment D.R., 98-144. New York, USA: McGraw-Hill, Inc.
- Shuttleworth W.J. 2007. Putting the ‘vap’ into evaporation. *Hydrology & Earth System Sciences*, 11 (1), 210-244. DOI:10.5194/hess-11-210-2007.
- Singh V.P. 2017. The hydrologic cycle. In Handbook of applied hydrology, second edition, edited by Vijay P. Singh, 3-9. New York, USA: McGraw-Hill Education.
- Singh V.P., Xu C.-Y. 1997. Evaluation and generalization of 13 mass-transfer equations for determining free water evaporation. *Hydrological Processes*, 11, 311-323. DOI:10.1002/(SICI)1099-1085(19970315)11:3<311::AID-HYP446>3.0.CO;2-Y.
- Smith M., Allen R., Monteith J.L., Perrier A., Pereira L.S., Segeren A. 1992. Report on the expert consultation for the revision of FAO methodologies for crop water requirements. Rome, IT: Food and Agriculture Organization.
- Snyder R.L. 1992. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 118 (6), 977-980. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9437(1992)118:6(977).
- Snyder R.L., Brown P.W., Hubbard K.G., Meyer S.J. 1996. A guide to automated weather station networks in North America. In *Advances in Bioclimatology*, 4, edited by Stanhill G., 1-61. Berlin, DE: Springer.
- Sriram A.V., Rashmi C.N. 2014. Estimation of potential evapotranspiration by multiple linear regression method. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 11 (2), 65-70. DOI: 10.9790/1684-11246570.
- Stephens J.C., Stewart E.H. 1963. A comparison of procedures for computing evaporation and evapotranspiration. In *International Union of Geodynamics and Geophysics, Publication*, 62, edited by Harbeck G.E., 123-133. Berkeley, USA: International Association of Scientific Hydrology.
- Stöckle C.O., Kjelgaard J., Bellocchi G. 2004. Evaluation of estimate weather data for calculating Penman-Monteith reference crop evapotranspiration. *Irrigation Science*, 23, 39-46. DOI:10.1007/s00271-004-0091-0.
- Stone B.J. and Rodgers M.O. 2001. Urban form and thermal efficiency: How to design of cities influences the urban heat island effects. *Journal of the American Planning Association*, 67 (2), 186-198. DOI:10.1080/01944360108976228.

- Sun G., Lockaby G. 2012. Water quantity and quality at the urban-rural interface. In Urban - rural interfaces: linking people and nature, edited by David N. Laband, Graeme Lockaby, Wayne C. Zipperer, 29-48. Madison, USA: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Crop Science Society of America.
- Tabari H., Grismer M.E., Trajkovic S. 2013. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. *Irrigation Science*, 31, 107-117. DOI:10.1007/s00271-011-0295-z.
- Tabari H., Marofi S., Sabziparvar A.-A. 2010. Estimation of daily pan evaporation using artificial neural network and multivariate non-linear regression. *Irrigation Science*, 28, 399-406. DOI:10.1007/s00271-009-0201-0.
- Taha H. 1997. Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25, 99-103. DOI:10.1016/S0378-7788(96)00999-1.
- Talbi E.-G. 2009. *Metaheuristics: from design to implementation*. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Taylor K.E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 106 (D7), 7183-7192. DOI:10.1029/2000JD900719.
- Thornthwaite C.W. 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38 (1), 55-94. DOI:10.2307/210739.
- Thornthwaite C.W., Holzman B. 1940. A year of evaporation from a natural land-surface, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 21 (2), 510-511. DOI:10.1029/TR021i002p00510.
- Todorovic M., Karic B., Pereira L.S. 2013. Reference evapotranspiration estimate with limited weather data across a range of Mediterranean climates. *Journal of Hydrology*, 481, 166-176. DOI:10.1016/j.jhydrol.2012.12.034.
- Trajkovic S. 2005. Temperature-based approaches for estimating reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131 (4), 316-323. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:4(316).
- Trajkovic S. 2007. Hargreaves versus Penman-Monteith under humid conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133 (1), 38-42. DOI:10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:1(38).

- Трајковић С. 2009. Методе прорачуна потреба за водом у наводњавању. Ниш, СРЈ: Грађевинско-архитектонски факултет Универзитета у Нишу.
- Trajkovic S., Kolakovic S. 2009. Estimating reference evapotranspiration using limited weather data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135 (4), 443-449. DOI:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000094.
- Tu M.-C., Wadzuk B., Traver R. 2020. Methodology to simulate unsaturated zone hydrology in Storm water management model (SWMM) for green infrastructure design and evaluation. *Plos One*, 15 (7), 1-19. DOI:10.1371/journal.pone.0235528.
- von Neumann J. 1941. Distribution of the ratio of the mean square successive difference to the variance. *The Annals of Mathematical Statistics*, 12 (4), 367-395. DOI:10.1214/aoms/1177731677.
- Wadzuk B.M., Schneider D., Feller M., Traver R.G. 2013. Evapotranspiration from a green-roof storm-water control measure. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139 (12), 995-1003. DOI:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000643.
- Walter I.A., Allen R.G., Elliott R., Itenfisu D., Brown P., Jensen M.E., Mecham B., Howell T.A., Snyder R., Eching S., Spofford T., Hattendorf M., Martin D., Cuenca R.H., Wright J.L. 2005. Weather data integrity assessment and station siting – Appendix D. In *The ASCE standardized reference evapotranspiration equation*, edited by Allen R.G., Walter I.A., Elliott R., Howell T., Itenfisu D., Jensen M., 67-102. Reston, USA: ASCE-EWRI.
- Walter I.A., Allen R.G., Elliot R., Jensen M.E., Itenfisu D., Mecham B., Howell T.A., Snyder R., Brown P., Echings S., Spofford T., Hattendorf M., Cuenca R.H., Wright J.L., Martin D. 2000. ASCE's standardized reference evapotranspiration equation. *Proceedings of the 4th National Irrigation Symposium*, 209-215.
- Wang K., Dickinson R.E. 2012. A review of global terrestrial evapotranspiration: observation, modeling, climatology, and climatic variability. *Reviews of Geophysics*, 50, 1-54. DOI:10.1029/2011RG000373.
- Wang D., Tan D., Liu L. 2018. Particle swarm optimization algorithm: an overview. *Soft Computing*, 22, 387-408. DOI:10.1007/s00500-016-2474-6.
- Ward H.C. 2017. Scintillometry in urban and complex environments: a review. *Measurement Science and Technology*, 28, 1-27. DOI:10.1088/1361-6501/aa5e85.

- White R., Havalak R., Nations J., Pannkuk T., Thomas J., Chalmers D., Dewey D. 2004. How much water is enough? Using PET to develop water budget for residential landscapes. Texas, USA: Texas Water Resources Institute, Texas A&M University.
- Whitford V., Ennos A.R., Handley J.F. 2001. City form and natural process – indicators for the ecological performance of urban areas and their application to Merseyside, UK. *Landscape and Urban Planning*, 57, 91-103. DOI:10.1016/S0169-2046(01)00192-X.
- Wijngaard J.B., Klein Tank A.M.G., Konnen G.P. 2003. Homogeneity of 20th century European daily temperature and precipitation series. *International Journal of Climatology*, 23 (6), 679-692. DOI:10.1002/joc.906.
- Willmott C.J., Matsuura K. 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30, 79-82. DOI:10.3354/cr030079.
- WMO-No.8 (World meteorological organization) 2006. Guide to meteorological instruments and methods of observation, seventh edition. Geneva, CH: Secretariat of the World Meteorological Organization.
- WMO-No.182 (World meteorological organization) 1992. International meteorological vocabulary, second edition. Geneva, CH: Secretariat of the World Meteorological Organization.
- WMO-No.1245 (World meteorological organization) 2020. Guidelines on homogenization. Geneva, CH: Secretariat of the World Meteorological Organization.
- WMO-TD No.1186 (World meteorological organization) 2003. Guidelines on climate metadata and homogenization. Geneva, CH: Secretariat of the World Meteorological Organization.
- Wootton T.P., Cecilio C.B., Flower L.C., Hui S.L. 1996. Hydrology handbook, second edition, New York, USA: American Society of Civil Engineers, Manuals and Reports on Engineering Practice No. 28.
- ХС (Хидрометеоролошка служба) 1973. Упутство за обраду података испаравања (испаритељ класе А). Београд, СФРЈ: Савезни хидрометеоролошки завод.
- ХС (Хидрометеоролошка служба) 1974. Упутство за осматрања и мерења на главним метеоролошким станицама. Београд, СФРЈ: Издање савезног хидрометеоролошког завода.

- Xu C.-Y. and Singh V.P. 1998. Dependence of evaporation on meteorological variables at different time-scales and intercomparison of estimation methods. *Hydrological Processes*, 12 (3), 429-442. DOI:10.1002/(SICI)1099-1085(19980315)12:3<429::AID-HYP581>3.0.CO;2-A.
- Xu C.-Y. and Singh V.P. 2002. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. *Water Resources Management*, 16, 197-219. DOI:10.1023/A:1020282515975.
- Xystrakis F., Matzarakis A. 2011. Evaluation of 13 empirical reference potential evapotranspiration equations on the island of Crete in Southern Greece. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137 (4), 211-221. DOI:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000283.
- Yang X.-S. 2023. Nature-inspired algorithms in optimization: introduction, hybridization, and insights. In *Benchmarks and Hybrid Algorithms in Optimization and Applications*, edited by Yang X.-S., 1-18. Singapore, SG: Springer Nature.
- Yin Y., Wu S., Chen G., Dai E. 2010. Attribution analyses of potential evapotranspiration changes in China since the 1960s. *Theoretical and Applied Climatology*, 101, 19-28. DOI:10.1007/s00704-009-0197-7.
- You J. and Hubbard K.G. 2005. Quality control of weather data during extreme events. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 23, 184-197. DOI:10.1175/JTECH1851.1.
- Zhang G., Azorin-Molina C., Wang X., Chen D., McVicar T.R., Guijarro J.A., Chappell A., Deng K., Minola L., Kong F., Wang S., Shi P. 2022. Rapid urbanization induced daily maximum wind speed decline in metropolitan areas: A case study in the Yangtze River Delta (China). *Urban Climate*, 43 (5), 1-15. DOI:10.1016/j.uclim.2022.101147.
- Zhang X., Kang S., Zhang L., Liu J. 2010. Spatial variation of climatology monthly crop reference evapotranspiration and sensitivity coefficients in Shiyang river basin of northwest China. *Agricultural Water Management*, 97, 1506-1516. DOI:10.1016/j.agwat.2010.05.004.
- Zhao T.F., Fong K.F. 2017. Characterization of different heat mitigation strategies in landscape to fight against heat island and improve thermal comfort in hot-humid climate (Part I): Measurement and modelling. *Sustainable Cities and Society*, 32, 523-531. DOI:10.1016/j.scs.2017.03.025.

Кратка биографија

Младен Милановић, мастер инж. грађевинарства, рођен је 1987. године у Нишу где је завршио основну школу, гимназију и Грађевинско-архитектонски факултет. Мастер академске студије другог степена на студијском програму Грађевинарство-Хидротехника завршио је 2011. године.

Након дипломирања, радио је као демонстратор и сарадник у настави на Грађевинско-архитектонском факултету у Нишу, а од 2012. године ради у звању истраживач приправник. Од 2016. године ради у звању асистент за ужу научну област Хидротехника.

Од октобра 2011. године на Грађевинско-архитектонском факултету ангажован је у настави на више предмета на катедри за водопривреду.

Као сарадник укључен је у реализацији више од 10 домаћих и међународних научно истраживачких пројеката.

Аутор је и коаутор више од 70 радова објављених у страним и домаћим часописима и на домаћим и међународним конференцијама.

Служи се енглеским језиком.

ИЗЈАВА О АУТОРСТВУ

Изјављујем да је докторска дисертација, под насловом:

Развој методологије за дефинисање потреба за водом референтне културе у урбаним
условима

која је одбрањена на Грађевинско-архитектонском факултету Универзитета у Нишу:

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да ову дисертацију, ни у целини, нити у деловима, нисам пријављивао на другим факултетима, нити универзитетима;
- да нисам повредио ауторска права, нити злоупотребио интелектуалну својину других лица.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци, који су у вези са ауторством и добијањем академског звања доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада и то у каталогу Библиотеке, Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Нишу, као и у публикацијама Универзитета у Нишу.

У Нишу, 30. 6. 2025.

Потпис аутора дисертације:

Младен М. Милошевић

(Име, средње слово и презиме)

ИЗЈАВА О ИСТОВЕТНОСТИ ЕЛЕКТРОНСКОГ И ШТАМПАНОГ ОБЛИКА ДОКТОРСKE ДИСЕРТАЦИЈЕ

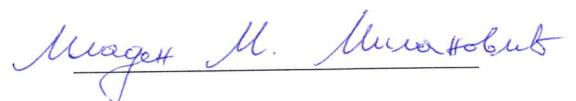
Наслов дисертације:

Развој методологије за дефинисање потреба за водом референтне културе у урбаним
условима

Изјављујем да је електронски облик моје докторске дисертације, коју сам предао за
уношење у **Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу**, истоветан штампаном
облику.

У Нишу, 30. 6. 2025.

Потпис аутора дисертације:



(Име, средње слово и презиме)

ИЗЈАВА О КОРИШЋЕЊУ

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Никола Тесла“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу унесе моју докторску дисертацију, под насловом:

Развој методологије за дефинисање потреба за водом референтне културе у урбаним условима

Дисертацију са свим прилозима предао сам у електронском облику, погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију, унету у Дигитални репозиторијум Универзитета у Нишу, могу користити сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons), за коју сам се одлучио.

1. Ауторство (CC BY)

2. Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прераде (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прераде (CC BY-ND)

6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

У Нишу, 30. 6. 2025.

Потпис аутора дисертације:



(Име, средње слово и презиме)