

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



26105686

Kandidatka:

Polona Cesar

Primerjava različnih metod izračuna evapotranspiracije

Diplomska naloga št.: 162

Mentor:
doc. dr. Mojca Šraj

Ljubljana, 2010

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

IZJAVA O AVTORSTVU

Skladno s 27. členom Pravilnika o diplomskem delu UL Fakultete za gradbeništvo in geodezijo, podpisana **POLONA CESAR** izjavljam, da sem avtorica diplomske naloge z naslovom:

PRIMERJAVA RAZLIČNIH METOD IZRAČUNA EVAPOTRANSPIRACIJE.

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL, Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Noben del tega zaključnega dela ni bil uporabljen za pridobitev strokovnega naziva ali druge strokovne kvalifikacije na tej ali na drugi univerzi ali izobraževalni inštituciji.

Ljubljana, marec 2011

POLONA CESAR

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 556.13(043.2)
Avtor: Polona Cesar
Mentor: doc. dr. Mojca Šraj
Naslov: Primerjava različnih metod izračuna evapotranspiracije
Obseg in oprema: 133 str., 8 pregl., 105 sl., 54 en.
Ključne besede: evapotranspiracija, izhlapevanje, merjenje izhlapevanja, Penman-Monteith, Thorntwaith, Hargreaves, Priestley-Taylor, Makkink, Turc

Izveček:

Evapotranspiracija predstavlja enega izmed pomembnejših dejavnikov v hidrološkem krogu. Kot pojem predstavlja dva ločena procesa, in sicer izhlapevanje in transpiracijo, kot proces pa sta oba pojma med seboj združena, saj potekata istočasno in ju je med seboj težko ločiti. Evapotranspiracija ima tri glavne faktorje vpliva, in sicer meteorološke faktorje (sončno sevanje, temperatura zraka, vlaga v zraku in hitrost vetra), faktor rastline in okoljske pogoje, ki so podrobneje opisani v prvem delu naloge. V nadaljevanju je narejen pregled najbolj pogostih metod izračuna (temperaturne, radiacijske in kombinirane) referenčne evapotranspiracije in opis instrumentov za merjenje dejanske evapotranspiracije.

V praktičnem delu naloge so prikazani rezultati izračuna s pomočjo šestih metod (Thorntwaithova, Makkinkova, Turcova, FAO Penman-Monteithova, Priestley-Taylorjeva in Hargreavesova) za štiri meteorološke postaje (Ljubljana, Murska Sobota, Portorož, Kredarica) ter primerjava med njimi. Primerjava posameznih enačb s standardno FAO Penman-Monteithovo enačbo je pokazala, da se z omenjeno enačbo najbolj ujemata Turcova metoda s približno 13 % nižjimi vrednostmi in Priestley-Taylorjeva metoda s približno 18 % višjimi vrednostmi. Z analizo vpliva posameznih spremenljivk je bilo ugotovljeno, da je na vseh lokacijah evapotranspiracija v največji meri odvisna od energije sončnega sevanja, temperature in vlažnosti. Ugotovljeno je bilo, da veter v enačbi FAO Penman-Monteitha predstavlja najmanjši vpliv. Kljub vsemu, pa je tudi ta v večini primerov statistično značilen.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 556.13(043.2)
Author: Polona Cesar
Supervisor: Assist. Prof. Mojca Šraj, Ph.D
Title: Comparison of different methods for calculating evapotranspiration
Notes: 133 p., 8 tab., 105 fig., 54 eq.
Key words: evapotranspiration, evaporation, influence factors, measuring of evaporation, Penman-Monteith, Thorntwaith, Hargreaves, Priestley-Taylor, Makkink, Turc

Abstract:

Evapotranspiration is one of the most important factors in the hydrological cycle. As a term it represents two separate processes, evaporation and transpiration. As a process both occur at the same time and it is not easy to distinguish them. Evapotranspiration consists of three main factors, the impact of meteorological factors (solar radiation, air temperature, air humidity and wind speed), plant factor and environmental conditions, which are described in the first part of the thesis, which also includes an overview of the most common methods of calculation (temperature, radiation and combined) reference evapotranspiration and a description of the instruments for the measurement of actual evapotranspiration.

In the practical part the results calculated using the six methods (Thorntwaith, Makkink, Turc, FAO Penman-Monteith, Priestley-Taylor and Hargreaves) for four meteorological stations (Ljubljana, Murska Sobota, Portorož, Kredarica) are shown. The comparison between them is also included. Comparison between different equations with the standard FAO Penman-Monteith equation pointed out that the Turcs equation is the best match with approximately 13 % lower values and the Priestley-Taylor method with approximately 18 % higher values. The analyses of individual variables indicated that evapotranspiration at all locations depended mostly upon the energy of solar radiation, temperature and humidity. It was found that the wind in FAO Penman-Monteith equation has the minimum impact. Even though, the wind was statistically significant in most cases.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem doc. dr. Mojci Šraj. Zahvalila bi se tudi svoji družini in fantu, ki so me v času študija podpirali in mi stali ob strani.

KAZALO VSEBINE

KAZALO VSEBINE	VI
KAZALO SLIK	X
KAZALO PREGLEDNIC	XV
OKRAJŠAVE IN SIMBOLI	XVI
1 UVOD	1
2 EVAPOTRANSPIRACIJA	3
2.1 Izhlapevanje	4
2.1.1 Izhlapevanje s proste vodne površine	8
2.1.2 Izhlapevanje iz zemljine	8
2.1.3 Izhlapevanje s površine rastlin	9
2.2 Transpiracija	9
2.3 Različno poimenovanje in razlage evapotranspiracije	11
2.3.1 Potencialna evapotranspiracija	11
2.3.2 Dejanska (efektivna, realna) evapotranspiracija	12
2.3.3 Referenčna evapotranspiracija (ET_0)	12
2.3.4 Evapotranspiracija rastline pod standardnimi pogoji (ET_C)	16
2.3.5 Evapotranspiracija rastline pod nestandardnimi pogoji ($ET_{C_{adj}}$)	18
2.4 Faktorji vpliva na evapotranspiracijo	19
2.4.1 Meteorološki faktorji	19
2.4.1.1 Sončno sevanje	20
2.4.1.2 Temperatura zraka	20
2.4.1.3 Vlaga v zraku	20
2.4.1.4 Hitrost vetra	20
2.4.2 Faktor rastline (k_c)	21
2.4.2.1 Podnebni dejavniki	21
2.4.2.2 Izhlapevanje iz zemljine	21
2.4.2.3 Tip rastline	21
2.4.3 Okoljski pogoji	22

2.4.4	Delitev faktorjev vpliva glede na površino s katere se vrši izhlapevanje	22
2.4.4.1	Prosta vodna površina.....	22
2.4.4.2	Izhlapevanje iz zemljine	24
2.4.4.3	Izhlapevanje s površine rastlin (transpiracija)	24
3	NAČINI MERJENJA EVAPOTRANSPIRACIJE	26
3.1	Wildov evaporimeter	26
3.2	Pichejev evaporimeter	27
3.3	Evaporacijske posode (posode za merjenje izhlapevanja)	28
3.4	Lizimeter	30
4	METODE IZRAČUNA REFERENČNE EVAPOTRANSPIRACIJE.....	33
4.1	Radiacijske metode	34
4.1.1	Makkinkova enačba.....	34
4.1.2	Priestley-Taylorjeva enačba	35
4.1.3	Jensen-Haiseva enačba	36
4.1.4	Enačba, ki temelji na sončni energiji	37
4.1.5	Enačba, ki temelji na neto radiacijski energiji	38
4.2	Temperaturne metode	38
4.2.1	Hargreavesova enačba.....	39
4.2.2	Blanney-Criddleva enačba	39
4.2.3	Thorntwaitova enačba	40
4.3	Kombinirane metode	41
4.3.1	Turcova enačba.....	41
4.3.2	Penmanova enačba	41
4.3.3	FAO Penman-Monteithova enačba.....	43
4.3.3.1	Atmosferski parametri	44
4.3.3.2	Postopki izračuna	48
5	IZRAČUN REFERENČNE EVAPOTRANSPIRACIJE PO RAZLIČNIH METODAH IN NA RAZLIČNIH OBMOČJIH.....	57
5.1	Slovenska meteorološka mreža in opis izbranih postaj.....	57

5.1.1	Meteorološka postaja Ljubljana Bežigrad.....	58
5.1.2	Meteorološka postaja Kredarica	59
5.1.3	Meteorološka postaja Portorož	60
5.1.4	Meteorološka postaja Murska Sobota.....	61
5.2	Meritve meteoroloških spremenljivk.....	62
5.2.1	Temperatura	62
5.2.1.1	Temperatura po Sloveniji leta 2008.....	63
5.2.2	Veter	63
5.2.2.1	Veter po Sloveniji leta 2008.....	65
5.2.3	Relativna vlažnost	65
5.2.4	Energija sončnega sevanja.....	66
5.2.4.1	Sončno sevanje v Sloveniji leta 2008.....	67
5.2.5	Tlak.....	67
5.3	Priprava vhodnih podatkov in metodologija	68
5.4	Izračun referenčne evapotranspiracije po različnih metodah.....	69
5.4.1	Thorntwaithova enačba	69
5.4.2	Hargreavesova enačba	72
5.4.3	Priestley-Taylorjeva enačba	75
5.4.4	Makkinkova enačba.....	78
5.4.5	FAO Penman-Monteith enačba.....	81
5.4.6	Turcova enačba.....	84
6	PRIMERJAVA REZULTATOV IN ANALIZA	88
6.1	Primerjava rezultatov po meteoroloških postajah.....	88
6.1.1	Thorntwaithova enačba	88
6.1.2	Hargreavesova enačba	89
6.1.3	Priestley-Taylorjeva enačba	90
6.1.4	Makkinkova enačba.....	91
6.1.5	FAO Penman-Monteithova enačba	92
6.1.6	Turcova enačba.....	93
6.2	Primerjava rezultatov po metodah.....	94
6.2.1	Ljubljana Bežigrad	95

6.2.2	Murska Sobota.....	97
6.2.3	Letališče Portorož	98
6.2.4	Kredarica	99
6.3	Statistična analiza in primerjava rezultatov med metodami	100
6.4	Analiza vplivov posameznih spremenljivk na evapotranspiracijo.....	104
6.4.1	Časovno spreminjanje posameznih spremenljivk	104
6.4.2	Vpliv posameznih spremenljivk na evapotranspiracijo	107
6.4.2.1	Ljubljana	108
6.4.2.2	Murska Sobota	112
6.4.2.3	Portorož.....	115
6.4.2.4	Kredarica.....	119
7	ZAKLJUČKI.....	124
	VIRI.....	127

KAZALO SLIK

Slika 1: Delitev evapotranspiracije	4
Slika 2: Povprečna letna evapotranspiracija po svetu, izražena v milimetrih	5
Slika 3: Padavine, izhlapevanje in odtok po svetu za leto 1990	6
Slika 4: Povprečno dejansko izhlapevanje za obdobje 1971-2000 v Sloveniji	7
Slika 5: Prikaz primera izhlapevanja za mesto Logan, Utah	8
Slika 6: Prikaz stomate (listne reže)	10
Slika 7: Evapotranspiracija v odvisnosti od življenjskega obdobja rastline	11
Slika 8: Shematski prikaz referenčne evapotranspiracije	13
Slika 9: Karakteristike referenčne rastline	13
Slika 10: Primer A in primer B postavitve evaporacijske posode	15
Slika 11: Vrednost koeficienta k_p , za evaporimeter »A«, v primeru, da ga obkrožajo nizke zelene rastline	15
Slika 12: Vrednost koeficienta k_p , za evaporimeter »A«, v primeru, da ga obkroža suha, gola površina	16
Slika 13: Shematski prikaz evapotranspiracije rastline pod standardnimi pogoji	17
Slika 14: Prikaz koeficienta rastline v odvisnosti od faze rasti rastline	18
Slika 15: Shematski prikaz referenčne evapotranspiracije pod nestandardnimi pogoji	19
Slika 16: Glavni faktorji, ki vplivajo na evapotranspiracijo	19
Slika 17: Wildov evaporimeter	26
Slika 18: Pichejev evaporimeter	27
Slika 19: Evaporimeter »A«	29
Slika 20: Evaporimeter na dvorišču Agencije Republike Slovenije za okolje	29
Slika 21: Lizimeter	31
Slika 22: Lizimeter v Klečah	32
Slika 23: Nameščanje novega lizimetra	32
Slika 24: Atmosferski pritisk v odvisnosti od nadmorske višine	45
Slika 25: Psihrometrična konstanta v odvisnosti od nadmorske višine	46
Slika 26: Odvisnost zasičenega parnega pritiska od temperature	49
Slika 27: Pretvarjanje merskih enot	51
Slika 28: Spreminjanje faktorja u_z v odvisnosti od višine meritev vetra	56

Slika 29: Lega meteoroloških postaj.....	58
Slika 30: Meteorološka postaja Ljubljana Bežigrad	59
Slika 31: Meteorološka postaja Kredarica	60
Slika 32: Meteorološka postaja Portorož	61
Slika 33: Meteorološka postaja Murska Sobota	61
Slika 34: Avtomatska postaja Vaisala, na katero so lahko priključeni različni senzorji	62
Slika 35: Anemometer WAA151.....	64
Slika 36: Anemometer WS425	64
Slika 37: Senzor HMP155.....	65
Slika 38: Piranometer CMP6.....	66
Slika 39: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Ljubljano po Thorntwaithovi enačbi	70
Slika 40: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Mursko Soboto po Thorntwaithovi enačbi	71
Slika 41: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Mursko Soboto po Thorntwaithovi enačbi	71
Slika 42: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Ljubljano po Hargreavesovi enačbi.....	73
Slika 43: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Mursko Soboto po Hargreavesovi enačbi	73
Slika 44: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Portorož po Hargreavesovi enačbi	74
Slika 45: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Kredarico po Hargreavesovi enačbi	74
Slika 46: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Ljubljano po Priestley-Taylor enačbi ...	76
Slika 47: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Mursko Soboto po Priestley-Taylor enačbi	77
Slika 48: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Portorož po Priestley-Taylor enačbi.....	77
Slika 49: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Kredarico po Priestley-Taylor enačbi...	78
Slika 50: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Ljubljano po Makkinkovi enačbi	79
Slika 51: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Mursko Soboto po Makkinkovi enačbi	80
Slika 52: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Portorož po Makkinkovi enačbi	80
Slika 53: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Kredarico po Makkinkovi enačbi	81
Slika 54: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Ljubljano po FAO Penman-Monteith enačbi	82

Slika 55: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Mursko Soboto po FAO Penman-Monteith enačbi	83
Slika 56: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Portorož po FAO Penman-Monteith enačbi	83
Slika 57: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Kredarico po FAO Penman-Monteith enačbi	84
Slika 58: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Ljubljano po Turcovi enačbi	85
Slika 59: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Mursko Soboto po Turcovi enačbi	86
Slika 60: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Portorož po Turcovi enačbi	86
Slika 61: Primerjava količine referenčne evapotranspiracije po Thorntwaithovi enačbi za izbrane lokacije	89
Slika 62: Primerjava količine referenčne evapotranspiracije po Hargreavesovi enačbi za izbrane lokacije	90
Slika 63: Primerjava količine referenčne evapotranspiracije po Priestley-Taylorjevi enačbi za izbrane lokacije	91
Slika 64: Primerjava količine referenčne evapotranspiracije po Makkinkovi enačbi za izbrane lokacije	92
Slika 65: Primerjava količine referenčne evapotranspiracije po FAO Penman-Monteith enačbi za izbrane lokacije	93
Slika 66: Primerjava količine referenčne evapotranspiracije po Turcovi enačbi za izbrane lokacije	94
Slika 67: Primerjava rezultatov referenčne evapotranspiracije po različnih metodah za Ljubljano Bežigrad	97
Slika 68: Primerjava rezultatov referenčne evapotranspiracije po različnih metodah za Mursko Soboto	98
Slika 69: Primerjava rezultatov referenčne evapotranspiracije po različnih metodah za letališče Portorož	99
Slika 70: Primerjava rezultatov referenčne evapotranspiracije po različnih metodah za Kredarico	100
Slika 71: Linearna korelacija rezultatov Thorntwaithove enačbe v odvisnosti od rezultatov FAO Penman-Monteithove enačbe	101

Slika 72: Linearna korelacija rezultatov Hargreavesove enačbe v odvisnosti od rezultatov FAO Penman-Monteithove enačbe	102
Slika 73: Linearna korelacija rezultatov Priestley-Taylorjeve enačbe v odvisnosti od rezultatov FAO Penman-Monteithove enačbe	102
Slika 74: Linearna korelacija rezultatov Thorntwaithove enačbe v odvisnosti od rezultatov FAO Penman-Monteithove enačbe	103
Slika 75: Linearna korelacija rezultatov Turcove enačbe v odvisnosti od rezultatov FAO Penman-Monteithove enačb	104
Slika 76: Prikaz evapotranspiracije tekom dneva (22. junij 2008) v Ljubljani	105
Slika 77: Prikaz spreminjanja energije neto sevanja tekom dneva (22. junij 2008) v Ljubljani	105
Slika 78: Prikaz spreminjanja različnih energij sončnega sevanja v Ljubljani tekom leta 2008	106
Slika 79: Prikaz temperature tekom dneva (22. Junij 2008) v Ljubljani	106
Slika 80: Prikaz spreminjanja relativne vlage tekom dneva (22. junij 2008) v Ljubljani	107
Slika 81: Prikaz spreminjanja hitrosti vetra tekom dneva (22. junij 2008) v Ljubljani	107
Slika 82: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od povprečne dnevne temperature v Ljubljani	108
Slika 83: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od neto energije sončnega sevanja v Ljubljani	109
Slika 84: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od hitrosti vetra v Ljubljani	110
Slika 85: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od hitrosti vetra v Ljubljani za obdobje pomladi	110
Slika 86: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od zasičenega parnega tlaka v Ljubljani	111
Slika 87: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od dejanskega parnega tlaka v Ljubljani	111
Slika 88: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od povprečne dnevne temperature v Murski Soboti	112
Slika 89: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od neto energije sončnega sevanja v Murski Soboti	113
Slika 90: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od hitrosti vetra v Murski Soboti	113

Slika 91: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od hitrosti vetra v Murski Soboti	114
Slika 92: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od zasičenega parnega tlaka v Murski Soboti	114
Slika 93: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od dejanskega parnega tlaka v Murski Soboti	115
Slika 94: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od povprečne dnevne temperature v Portorožu	116
Slika 95: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od neto energije sončnega sevanja v Portorožu	116
Slika 96: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od hitrosti vetra v Portorožu	117
Slika 97: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od hitrosti vetra v Portorožu za obdobje jeseni	117
Slika 98: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od zasičenega parnega tlaka v Portorožu	118
Slika 99: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od dejanskega parnega tlaka v Portorožu	118
Slika 100: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od povprečne dnevne temperature na Kredarici	119
Slika 101: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od neto energije sončnega sevanja na Kredarici	120
Slika 102: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od hitrosti vetra na Kredarici	121
Slika 103: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od hitrosti vetra na Kredarici v jesenskem času	121
Slika 104: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od zasičenega parnega tlaka na Kredarici	122
Slika 105: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od dejanskega parnega tlaka na Kredarici	123

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Prikaz maksimalnih in minimalnih temperatur leta 2008 v Ljubljani, Murski Soboti, Kredarici in Portorožu	63
Preglednica 2: Mesečne vrednosti evapotranspiracije po Thorntwaithovi enačbi	69
Preglednica 3: Mesečne vrednosti evapotranspiracije po Hargreavesovi enačbi	72
Preglednica 4: Mesečne vrednosti evapotranspiracije po Priestley-Taylorjevi enačbi.....	75
Preglednica 5: Mesečne vrednosti evapotranspiracije po Makkinkovi enačbi.....	79
Preglednica 6: Mesečne vrednosti evapotranspiracije po FAO Penman-Monteithovi enačbi .	82
Preglednica 7: Mesečne vrednosti evapotranspiracije po Turcovi enačbi	85
Preglednica 8: Zahtevani vhodni podatki po posameznih metodah	95

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
ASCE	Ameriško društvo gradbenih inženirjev
FAO	Organizacija za prehrano in kmetijstvo
ET	evapotranspiracija
ET ₀	referenčna evapotranspiracija
ET _c	evapotranspiracija pod standardnimi pogoji
ETC _{adj}	evapotranspiracija pod nestandardnimi pogoji
ET _p	evapotranspiracija s proste vodne površine
k	koeficient, odvisen od vegetacije, lokacije, letnega časa in obdobja rasti
k _c	faktor rastline
k _p	koeficient evaporacijske posode
kPa	kilopaskal
LAI	indeks listne površine
MJ/kg	megajoulov na kilogram
RH	relativna vlažnost (minimalna ali maksimalna)
W/m ²	wat na kvadratni meter

1 UVOD

Vodne izgube predstavljajo pomembno vlogo pri obravnavanju vodne bilance. Proces, med katerim voda prehaja v obliki vodnih hlapov iz Zemlje v atmosfero, se imenuje evapotranspiracija. Ta vključuje izhlapevanje in transpiracijo. Izhlapevanje se vrši iz zemljine in iz površine rastlin, transpiracija pa predstavlja prehod vode skozi korenine rastlin v liste in skozi listne pore v ozračje. Ker se izhlapevanje in transpiracija med seboj težko ločita se skupen proces imenuje evapotranspiracija (Ward in Trimble, 2004). Ocena količine evapotranspiracije je najbolj pomembna za območja, kjer so vodne zaloge omejene in za območja z velikimi kmetijskimi površinami, kjer imajo napeljane namakalne sisteme. V danih pogojih je potrebno izkoristiti vlago v zemljini in padavine, hkrati pa oceniti kdaj in koliko vode je potrebno za optimalno namakanje. Zato je namen diplomske naloge podrobneje predstaviti metode in enačbe za izračun referenčne evapotranspiracije in jih preizkusiti v različnih klimatskih pogojih na različnih meteoroloških postajah (Ljubljana, Murska Sobota, Portorož, Kredarica). Ker na posamezne enačbe vplivajo različne meteorološke spremenljivke, je cilj naloge podrobneje raziskati vpliv le-teh na izračune evapotranspiracije. Zaradi vpliva podnebnih dejavnikov na posameznih lokacijah na vrednosti izračunov evapotranspiracije, je podana tudi primerjava teh izračunov med lokacijami in enačbami.

V prvem delu diplomske naloge je podrobneje opisan pojem in različna poimenovanja evapotranspiracije (potencialna, dejanska, referenčna evapotranspiracija, evapotranspiracija pod standardnimi in evapotranspiracija pod nestandardnimi pogoji). Podrobneje so opisani trije glavni faktorji vpliva, in sicer meteorološki faktorji (sončno sevanje, temperatura zraka, vlaga v zraku in hitrost vetra), faktor rastline in okoljski pogoji.

Drugi del naloge zajema pregled obstoječih načinov ocene in izračuna evapotranspiracije. Podrobneje so opisani načini merjenja in metode izračuna evapotranspiracije. Metode izračuna se delijo v radiacijske, temperaturne in kombinirane. Med radiacijskimi metodami so podrobneje opisane Makkinkova, Priestley-Taylorjeva, Jensen-Haiseva enačba in enačbi, ki temeljita na sončni in neto radiacijski energiji. Pri temperaturnih metodah so opisane

Hargreavesova, Blaney-Criddleva in Thorntwaithova enačba, pri kombiniranih pa Turcova, Penmanova in FAO Penman-Monteithova.

V praktičnem delu naloge je s pomočjo šestih različnih enačb (Thorntwaithova, Hargreavesova, Priestley-Taylorjeva, Makkinkova, FAO Penman-Monteithova in Turcova enačba) izračunana količina evapotranspiracije za štiri meteorološke postaje (Ljubljana, Murska Sobota, Portorož in Kredarica) za leto 2008. Ker meteorološke postaje ležijo v različnih območjih Slovenije in različnih nadmorskih višinah z različnimi podnebnimi pogoji, je podana tudi primerjava med njimi.

Zadnji del naloge vključuje primerjavo in analizo rezultatov. Rezultati izračuna referenčne evapotranspiracije so podrobno analizirani in primerjani po meteoroloških postajah in metodah. Posebej je analiziran tudi vpliv posameznih spremenljivk na končne vrednosti referenčne evapotranspiracije po Penman-Monteithovi enačbi.

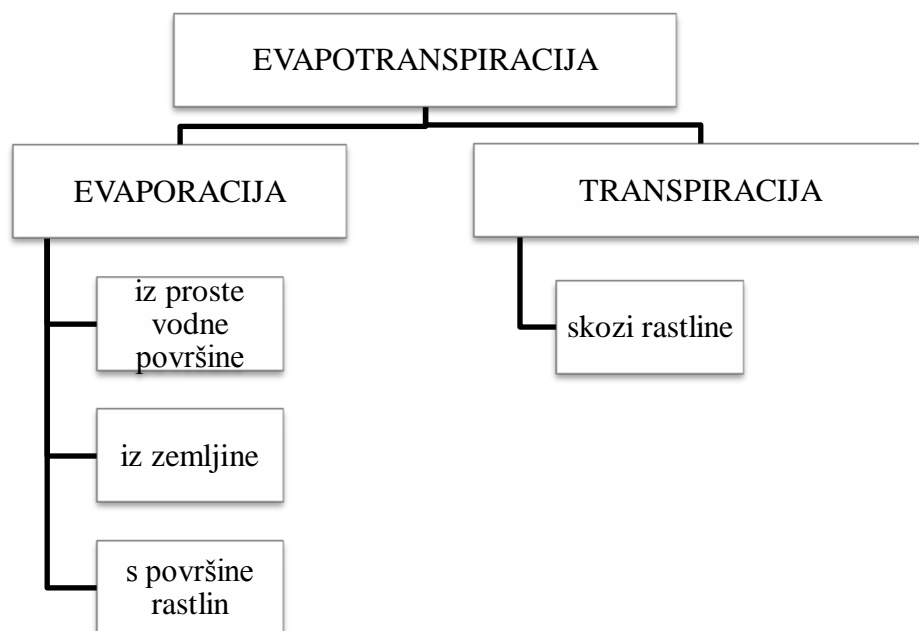
2 EVAPOTRANSPIRACIJA

Evapotranspiracija je zelo pomemben dejavnik v hidrološkem krogu in nam predstavlja pomemben element pri računu vodne bilance (ARSO, 2009). Pomen dejavnikov, ki vplivajo na vodni krog in vodno bilanco, je podrobneje opisan v nadaljevanju.

Voda na našem planetu konstantno kroži, kar opisuje hidrološki krog. Za procese, ki se dogajajo v hidrološkem krogu so zaslužne nam vidne in nevidne komponente. Vidni komponenti hidrološkega kroga so padavine in odtok. Nič manj pomembne pa niso nevidne komponente, kot so izhlapevanje, infiltracija, transpiracija, pronicanje, bogatenje podtalnice, vmesni odtok in odtok podtalnice. Voda, ki izhlapi iz zemlje v obliki pare in vodnih kapljic s pomočjo sončne energije, se začasno skladišči v atmosferi v obliki oblakov. Ko so le ti dovolj zasičeni z vodno paro, se ta spusti s padavinami (dež, sneg, toča) na zemljo. Padavine, ki padejo na tla, začno izhlapevati iz gole zemeljske površine, površine rastlin, ribnikov, jezer, potokov, oceanov in ledu. Nekaj padavin pa lahko izhlapi še preden dosežejo zemeljsko površje. Padavine, ki ne izhlapijo, se infiltrirajo v zemljo. Količina infiltracije se spreminja od kraja do kraja in je odvisna od vsebnosti vode v zemljini, teksture zemljine, vsebnosti organskih snovi in poroznosti. Voda, ki se infiltrira v zemljino, prisustvuje pri bogatenju podtalnice. Podzemna voda lahko odteče v reke, jezera in oceane in nato spet izhlapeva (Ward in Trimble, 2004). Izhlapevanje vode, pod drugim imenom evapotranspiracija, je obsežen in zelo pomemben člen v hidrološkem krogu, hkrati pa je tudi zelo kompleksen pojem, saj je funkcija časa in kraja.

Evapotranspiracijo delimo na **izhlapevanje** (ali **evaporacijo**) in **transpiracijo** (Slika 1). Omenjena procesa potekata istočasno in med seboj ju je težko ločiti, zato sta obravnavana posamično. V klimatoloških raziskavah se uporablja pojem evapotranspiracija (Oliver, 2005).

Izhlapevanje predstavlja prehod vode iz tekočega v plinasto stanje. Transpiracija pa predstavlja proces, pri katerem rastlina s pomočjo korenin črpa vodo iz zemlje, slednjo nato uporabi v metaboličnem procesu in nazadnje skozi stomate (listne reže) spusti v atmosfero (Tyree, 2000).



Slika 1: Delitev evapotranspiracije (Povzeto po: Ward in Trimble, 2004)

2.1 Izhlapevanje

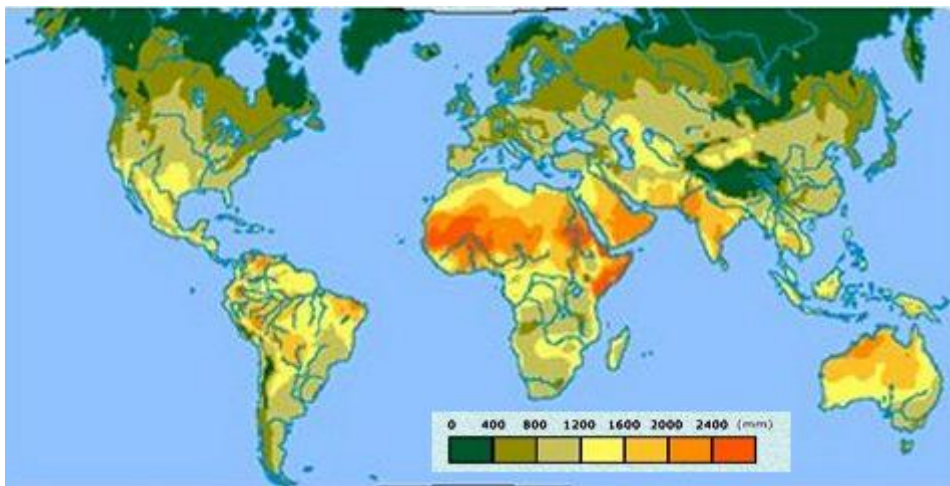
Evaporacija ali izhlapevanje je proces pri katerem se voda spreminja iz tekočega v plinasto stanje. Vodne molekule, ki so v tekočem in plinastem stanju, se nenehno gibljejo. Za prehod iz vode v atmosfero potrebujejo zadostno količino latentne (nezaznavne) energije. Nekatere molekule se po prehodu iz vode takoj spremenijo iz plinastega v tekoče stanje. Če je količina molekul, ki izhlapi iz vode, večja od količine molekul, ki se vrnejo v tekoče stanje, pojav imenujemo čisto izhlapevanje ali čista evaporacija. Za dovršen proces izhlapevanja pa je potrebna še sončna energija (Ward in Trimble, 2004).

Proces izhlapevanja, ki je v nadaljevanju podrobneje opisan, delimo na tri poglavitne dele. Ward in Trimble (2004) ga delita na izhlapevanje s prostih vodnih površin, izhlapevanje iz zemljine in izhlapevanje s površine rastlin.

Stopnja izhlapevanja po svetu se močno razlikuje, glede na pogoje, ki so dani na določenem območju (Slika 2). V puščavah je stopnja izhlapevanja in evapotranspiracije najnižja. Najvišja stopnja izhlapevanja je na območju tropskega pasu, kjer so temperature relativno visoke. Izhlapevanje iz oceanov je odvisno od prispelne sončne energije, od temperature oceana in

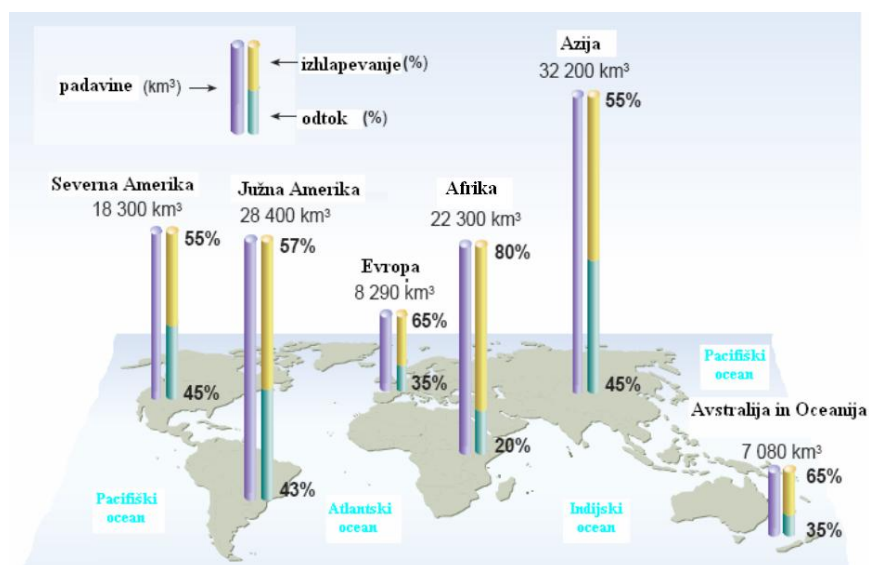
vetra. Večina izhlapevanja se vrši prav iz oceanov in iz območij, kjer so padavine pogostejše. Na izhlapevanja ima velik vpliv temperatura zraka. Če se le-ta dvigne, se poviša tudi stopnja izhlapevanja, kar lahko vodi do povečanja izhlapevanja v tropskih krajih, zvišanja slanosti oceanov in posledično zmanjšanja transporta sveže vode v atmosfero.

Izhlapevanje ima močan vpliv tudi v deževnem gozdu, saj je začetek deževne sezone odvisen od transpiracije rastlin. Z uničenjem deževnega gozda bi se podaljšalo sušno obdobje, kar bi predstavljalo sesutje ekosistema (Gautier, 2008). Odvisnost evapotranspiracije od gozdnatih površin in obratno močno vpliva na celoten hidrološki krog (Raspor, 2006).



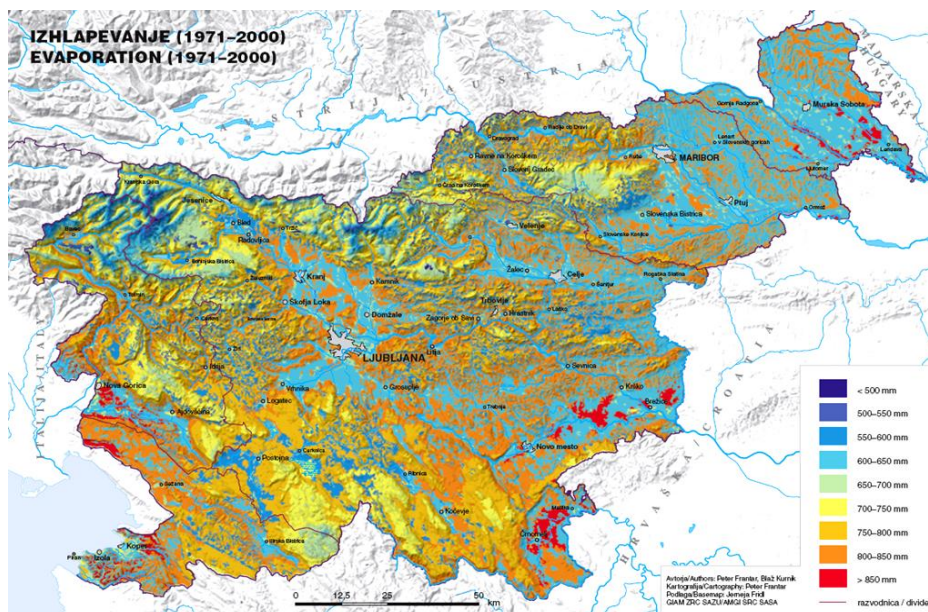
Slika 2: Povprečna letna evapotranspiracija po svetu, izražena v milimetrih (Vir: <http://www.k3jae.com/wxevapotranspiration.php>, (10.06.2010))

Slika 3 predstavlja razmerje med padavinami, izhlapevanjem in odtokom po celinah. Največ padavin ima Azija, najmanj pa Avstralija z Oceanijo. Glede na pripadajočo količino padavin, ki jo ima vsaka celina, ima najvišjo stopnjo izhlapevanja Afrika, najnižjo pa Južna Amerika. Ker je odtok vode obratnosorazmeren izhlapevanju, ima celina z najvišjo stopnjo izhlapevanja najmanj odtoka (Gleick, 1993).



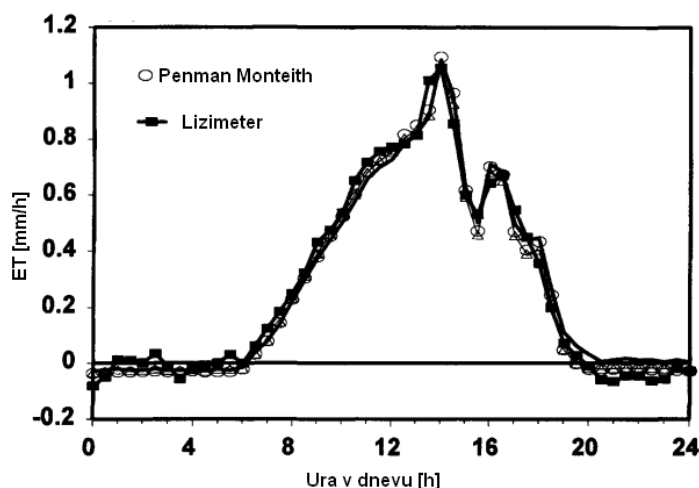
Slika 3: Padavine, izhlapevanje in odtok po svetu za leto 1990 (Povzeto po: Gleick, 1993)

V Sloveniji je bilo izračunano izhlapevanje po Hargreavesovi metodi za 37 klimatoloških postaj. Uporabljeni podatki so bili: minimalna in maksimalna temperatura zraka in natančna geografska lega postaje. Rezultati izračuna so bili uteženi s koeficienti (koeficient za mešani gozd, za kmetijske rastline in urbana območja) glede na dnevne vrednosti izhlapevanja po Penman-Monteithovi metodi. Izračunane povprečne vrednosti se gibljejo od 355 milimetrov (Kredarica) do 845 milimetrov (Nova Gorica). Na Sliki 4 je prikazano izhlapevanje za Slovenijo za obdobje 1971 do 2000. Maksimalno izhlapevanje se pojavi na območju jugovzhodne in jugozahodne Slovenije, kjer je precejšnja gozdnatost in so višje temperature zraka. To velja za naslednja območja: Pomurje, Krško Brežiško polje, Bela krajina, Primorska, dolina Soče in območje Tolmina. Območje minimalnega izhlapevanja pripada v večini najvišjim delom Julijskih Alp in ostalih slovenskih hribovij (Frantar, 2008).



Slika 4: Povprečno dejansko izhlapevanje za obdobje 1971-2000 v Sloveniji (Frantar, 2008)

Izhlapovanje se tako kot krajevno, spreminja tudi časovno. Slika 5 prikazuje spreminjanje evapotranspiracije tekom dneva. Meritve evapotranspiracije so se izvajale z lizimetrom na območju mesta Logan v zvezni državi Utah v ZDA. Poleg meritev evapotranspiracije je bila le-ta izračunana tudi s pomočjo Penman-Monteithove enačbe. Za izračun evapotranspiracije po omenjeni enačbi so bile uporabljene polurne vrednosti spremenljivk. Potek evapotranspiracije je prikazan za 2. avgust 1990. Pri izračunu je bila upoštevana referenčna višina travnate površine. Vrednosti evapotranspiracije so se ponoči gibale okrog nič, naraščanje pa se pojavi od 6.00 ure zjutraj do 14.00 ure. Po 14.00 uri začne vrednost evapotranspiracije padati. Omenjeni dan je bil jasen, nevetroven, jutro je bilo hladno in vlažno. Zaradi jasnosti, vrednost evapotranspiracije sorazmerno narašča in pada z energijo sončnega sevanja. Prav zaradi napak, ki nastanejo pri merjenju in računu sončnega sevanja, pa se pojavijo tudi negativne vrednosti evapotranspiracije v urah, kadar sončnega sevanja ni. Negativne količine evapotranspiracije skozi dan se lahko zanemarijo, saj njihova vrednost nima velikega vpliva na dnevno ali mesečno vrednost evapotranspiracije (ASCE, 1996).



Slika 5: Prikaz primera izhlapevanja za mesto Logan, Utah (ASCE, 1996, str. 226)

2.1.1 Izhlapevanje s proste vodne površine

Ward in Trimble (2004) navajata kot primer izhlapevanja s proste vodne površine jezera, ribnike, vodnjake in evaporacijske posode. Del, ki ga zajema izhlapevanje s proste vodne površine, katere poglavitni vzrok je razlika med pritiskom vodne pare na površju in ozračjem (Allen in sod., 1998), predstavlja zelo dobro raziskano področje, saj je površje teh vodnih površin vedno enako, kar omogoča enostavnejšo oceno.

2.1.2 Izhlapevanje iz zemljine

Izhlapevanje iz zemljine je podobno izhlapevanju s proste vodne površine, če je zemljina zasičena z vodo. V nasprotnem primeru je proces kompleksnejši, saj se izhlapevanje vrši tudi iz nižje ležečih plasti zemljine. Stopnja izhlapevanja iz zemlje se deli v dve fazi. Prva faza se pojavi, ko je površje zemljine skoraj popolnoma zasičeno. Takrat je stopnja izhlapevanja odvisna od vložka toplotne energije in vremenskih pogojev. Trajanje te faze je odvisno od stopnje izhlapevanja, globine in hidravličnih lastnosti zemljine. Ko se začne površje zemljine sušiti, nastopi druga faza, ki se imenuje padajoča faza. Tu se proces izhlapevanja dogaja pod zemeljskim površjem, zato klimatološki dejavniki nimajo več vpliva na stopnjo izhlapevanja, ampak je le-ta odvisna od hidravličnih lastnosti zemljine (npr. tekstura zemljine). Stopnja izhlapevanja je maksimalna takrat, ko je zemljina zasičena z vodo, kar pomeni, da so največje vrednosti izhlapevanja prav tam, kjer je zemljina pogosto namočena. Kadar je v zemljini

dovolj vlage da zadosti pogoju izhlapevanja, vplivajo nanjo samo meteorološki dejavniki, ko pa v zemljini vlage primanjkuje, se lahko proces izhlapevanja popolnoma ustavi (Allen in sod., 1998).

2.1.3 Izhlapevanje s površine rastlin

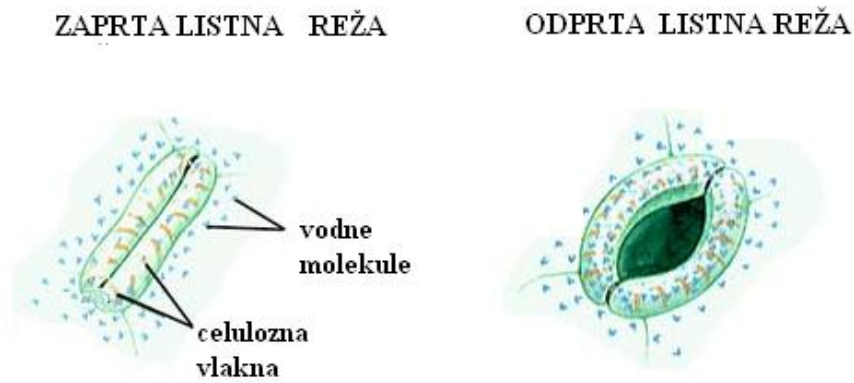
Preden padavine dosežejo tla, se morajo pogosto izogniti bujni vegetaciji. Če se vegetaciji ne izognejo in padejo na liste ali stebila in podobno, postanejo prestrežene padavine. Izhlapevanje prestreženih padavin poteka že med samim pojavom padavin in se nadaljuje tudi po ponehanju padavin, dokler vsa voda ne izhlapi. Energija, ki se porabi pri izhlapevanju vode s površine rastlin, je enaka energiji izhlapevanja s proste vodne površine (Allen in sod., 1998).

2.2 Transpiracija

Vsaka rastlina potrebuje za razvoj in rast optimalno količino vode. Voda prehaja v rastlino skozi korenine preko stebila vse do listov in nato skozi slednje izhlapeva. Opisan proces izhlapevanja se imenuje transpiracija (Tyree, 2000).

V navodilih Organizacije za prehrano in kmetijstvo (FAO) je transpiracija definirana kot proces, ki je sestavljen iz izhlapevanja vode, ki je vsebovana v rastlinah in iz odstranjevanja hlapov v ozračje (Allen in sod., 1998). Rastline vsrkavajo skozi korenine poleg vode tudi hranila. Skozi stomate (listne reže), ki so prikazane na Sliki 6, se poleg vode izločajo tudi plini (ogljikov dioksid). Ta proces imenujemo stomatalna transpiracija. Tyree (2000) pa omenja tudi kutikularno transpiracijo, ki predstavlja neposreden prehod vode iz celice skozi kutikulo (najbolj zunanja plast lista) v atmosfero.

Listne reže se najpogosteje nahajajo na spodnji strani listov, vendar jih imajo nekatere rastline tudi na zgornji strani. Kadar ima rastlina zadostno količino vode, so listne reže odprte, v nasprotnem primeru se listne reže zaprejo. Takrat se proces transpiracije prekine in listi postanejo ohlapni. Zapiranje listnih rež vpliva tudi na zmanjšanje fotosinteze in same rasti rastline (Tyree, 2000).



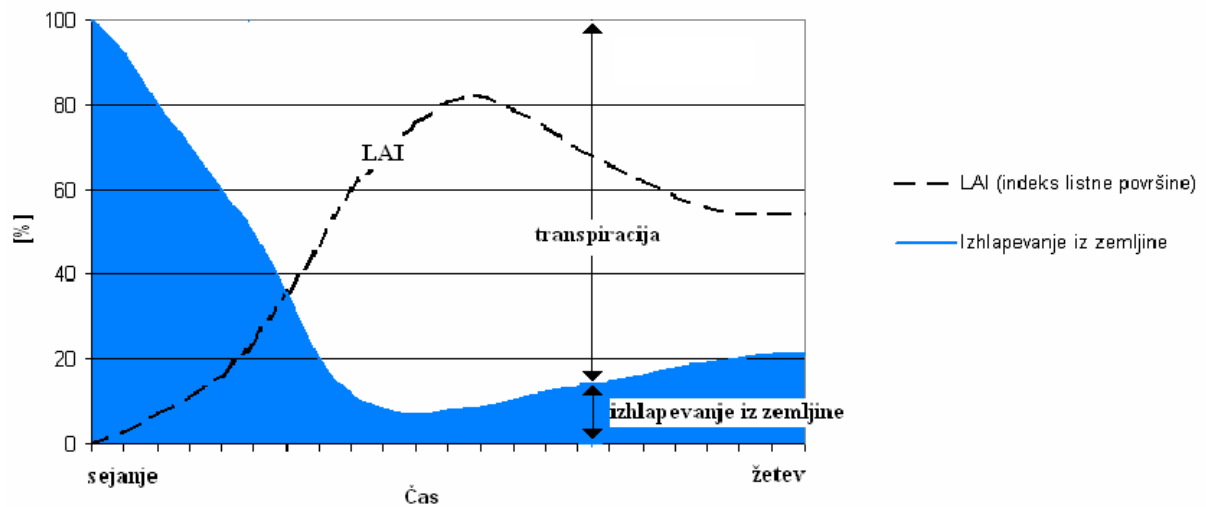
Slika 6: Prikaz stomate (listne reže)

(<http://www.cartage.org.lb/en/themes/sciences/botanicalsciences/PlantHormones/PlantHormones/PlantHormones.htm>, (10.06.2010))

Transpiracija je pri rastlini obravnavana kot pozitiven vpliv, saj z vodo, ki se vsrka skozi korenine in izhlapi skozi listne pore, prihajajo v rastlino tudi pomembni minerali in hranila. Torej gre za proces, ki omogoča rastlini vsrkati hranila in minerale, hkrati pa z izhlapevanjem hladi listne površine. Običajno velja, da so stomate normalno odprte čez dan in zaprte ponoči oziroma ob višjih temperaturah zraka. Nekatere rastline pa imajo tudi sposobnost uravnavanja transpiracije. To se zgodi, če je rastlina sposobna zmanjšati listno površino (z zvijanjem listov) ali, ko se ali bolj ali manj izpostavi sončni energiji. Prav tako lahko nekatere rastline popolnoma zaprejo svoje stomate in tako v celoti preprečijo transpiracijo (Ward in Trimble, 2004). Matičič (1977) v svoji knjigi omenja tudi, da je število stomat na enoto območja lista odvisna od okoljskih pogojev, pod katerimi je rastlina rasla.

Transpiracija je odvisna od življenjskega obdobja rastline (Slika 7). Če si ogledamo izhlapevanje iz tal, lahko opazimo, da je le ta največja ravno v začetni fazi rasti rastline in se proti koncu zmanjšuje. Ko je indeks listne površine (LAI) največji, je tudi izhlapevanje največje. Opazimo lahko tudi obratno sorazmerje izhlapevanja iz tal in transpiracije rastline.

Intenzivnost transpiracije je odvisna tudi od okoljskih dejavnikov, kot so: temperatura zraka, deficit tlaka vodne pare, doselega sončnega sevanja, temperature tal in volumenske vsebnosti vode v tleh (Raspor, 2007).



Slika 7: Evapotranspiracija v odvisnosti od življenjskega obdobja rastline (Povzeto po: Allen in sod., 1998)

2.3 Različno poimenovanje in razlage evapotranspiracije

2.3.1 Potencialna evapotranspiracija

Koncept potencialne evapotranspiracije je prvič uporabil Penman leta 1940. Pojem je bil opredeljen kot količina vode, ki je izhlapela v določenem času iz nizkih zelenih rastlin (te popolnoma zasenčijo tla) z enakomerno višino in s primerno oskrbo z vodo. Vendar je kasneje prišlo do zmede, saj obstaja veliko rastlin (kmetijskih in vrtnarskih pridelkov), ki bi se lahko uvrščale med navedene pogoje. Da bi ovrgli vse dvome, katere rastline spadajo v omenjeno kategorijo in katere ne, so inženirji in raziskovalci v poznih sedemdesetih in zgodnjih osemdesetih sprejeli pojem referenčne evapotranspiracije (ET_0) (Irmak in Haman, 2003).

Mikoš in sod. (2002) definirajo potencialno evapotranspiracijo kot največjo količino vode, ki glede na lastnosti atmosfere in količino razpoložljive energije, lahko preide v atmosfero z neprekinjenega območja. Za slednje je značilno, da je, skozi proces izhlapevanja in transpiracije, v celoti prekrito z rastlinstvom in dobro oskrbljenega z vodo. Eno izmed pojasnil potencialne evapotranspiracije je primerjava le-te z referenčno evapotranspiracijo. Irmak in Haman (2003) sta zapisala, da je razlika med referenčno in potencialno evapotranspiracijo predvsem v tem, da so pri referenčni evapotranspiraciji natančno definirani

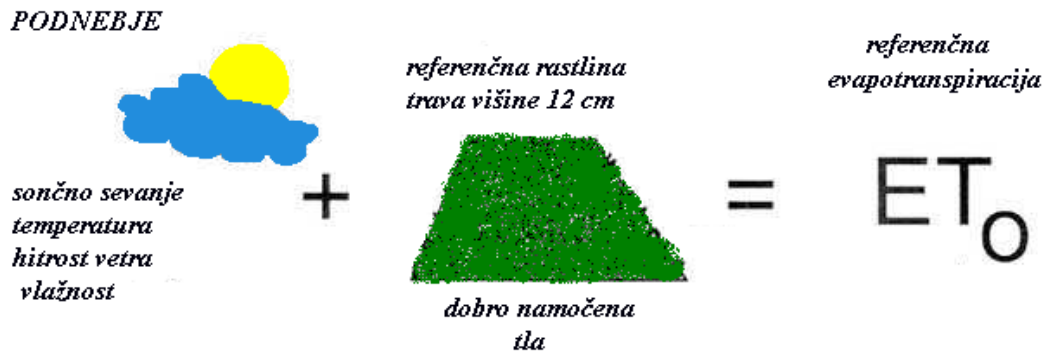
vremenski podatki. Pojasnil in razlag za potencialno evapotranspiracijo je ogromno in prav vsak posameznik si jo lahko razlaga po svoje. Prav zaradi nejasnih opredelitev in definicij FAO (Organizacija za prehrano in kmetijstvo) odsvetuje uporabo imena potencialna evapotranspiracija, predlagajo pa uporabo imena evapotranspiracija rastlin pri standardnih pogojih. Za račun evapotranspiracije predlagajo referenčno evapotranspiracijo ali pod drugim imenom evapotranspiracijo referenčne rastline.

2.3.2 Dejanska (efektivna, realna) evapotranspiracija

Predstavlja celotno količino vode, ki je izhlapela s površine tal in rastlin pri dejanski količini vlage v tleh (Mikoš in sod., 2002).

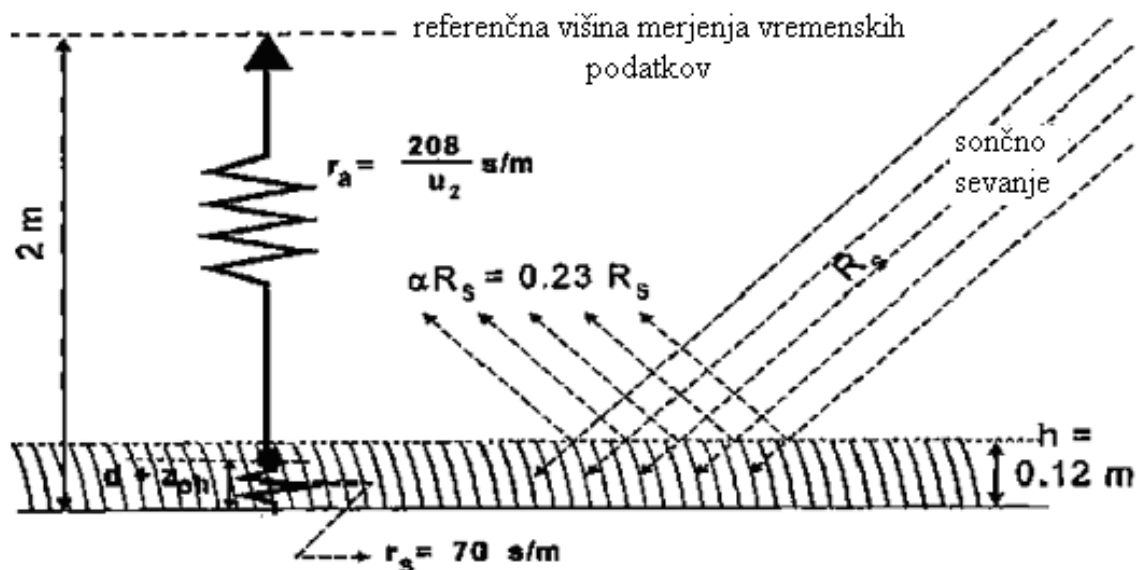
2.3.3 Referenčna evapotranspiracija (ET_0)

Kadar navežemo evapotranspiracijo na specifično okolje, jo imenujejo referenčna evapotranspiracija (ET_0). Referenčna evapotranspiracija nam omogoča račun in primerjavo evapotranspiracije v različnih letnih časih in različnem okolju, kot tudi evapotranspiracijo različnih rastlin. S tem se izognemo posamičnemu določevanju stopnje evapotranspiracije za vsako rastlino in njeno fazo rasti. Takšen način prenosa nam koristi predvsem takrat, kadar smo finančno ali časovno omejeni. Referenčna evapotranspiracija izraža tudi moč izhlapevanja v atmosfero na določeni lokaciji in v določenem letnem času in ni odvisna od značilnosti rastline in zemljine. Odvisna pa je od podnebja, sevanja, temperature, hitrosti vetra in vlažnosti, kot prikazuje Slika 8. Za določanje ET_0 je predlagana FAO Penman-Monteith enačba (Allen in sod., 1998).



Slika 8: Shematski prikaz referenčne evapotranspiracije (Povzeto po: Allen in sod., 1998)

Na samem začetku razvoja evapotranspiracije, so določili za referenčno površino prosto vodno površino (Aneks k Allen in sod., 1998), kasneje pa sta bili uporabljeni alfalfa (lucerna ali rdeča detelja) in referenčna trava (Allen in sod., 1998). Rdeča detelja ima, za razliko od trave, fizične karakteristike (indeks listne površine in hrapavost) bolj podobne ostalim poljedelskim rastlinam. Raziskovalci trdijo, da je pokošena trava boljši primer referenčne rastline zaradi dveh specifičnih razlogov. Prvi je, da ima trava bolj definirane karakteristike, drugi pa, da je trava svetovno bolj razširjena kot rdeča detelja. Danes lahko referenčno evapotranspiracijo definiramo kot evapotranspiracijo z referenčno travnato površino višine 0,12 metra, s konstantno površinsko upornostjo 70 m/s in albedom 0,23, kot prikazuje Slika 9.



Slika 9: Karakteristike referenčne rastline (Povzeto po: Allen in sod. 1998)

Pri oceni referenčne evapotranspiracije je potrebno definirati podnebne podatke za točno določeno (referenčno) okolje. Ti podnebni podatki morajo biti zbrani v dobro namočenih tleh prekritih s travo. Območje za oceno podnebnih podatkov mora biti dovolj veliko, saj le tako lahko dobimo bolj natančne in zadovoljive podatke, ki bodo v nadaljevanju vplivali na oceno referenčne evapotranspiracije. Vpliv meteoroloških podatkov je lahko zelo velik, saj lahko zaradi napak pridemo do napačnih končnih rezultatov. Na primer v vročih in suhih mesecih je lahko povprečna temperatura zraka 5 do 6 °C višja, kot na dobro namočenih območjih. Razlike v temperaturi bodo posledično vplivale na relativno vlažnost in deficit parnega pritiska, nenazadnje pa tudi na končno vrednost referenčne evapotranspiracije (Irmak in Haman, 2003).

Referenčno evapotranspiracijo določamo na dva načina (Allen in sod., 1998). Prvi način je ocena referenčne evapotranspiracije s pomočjo različnih metod. Te metode se delijo v pet skupin, glede na dostopnost podatkov (radiacijske, temperaturne, metode na osnovi energijske bilance, metode na osnovi vodne bilance in kombinirane metode) (Xu in Singh, 2002). Drugi način ocene referenčne evapotranspiracije pa lahko pridobimo s pomočjo različnih instrumentov (Wildov in Pichejev evaporimeter, evaporacijske posode in lizimeter), ki so podrobneje opisani v nadaljevanju naloge. Količino referenčne evapotranspiracije odčitamo dnevno, dobljen podatek v nadaljevanju množimo s faktorjem evaporacijske posode (k_p), kot rezultat pa dobimo referenčno evapotranspiracijo.

$$ET_0 = ET_p \cdot k_p \quad (1)$$

Pri čemer je:

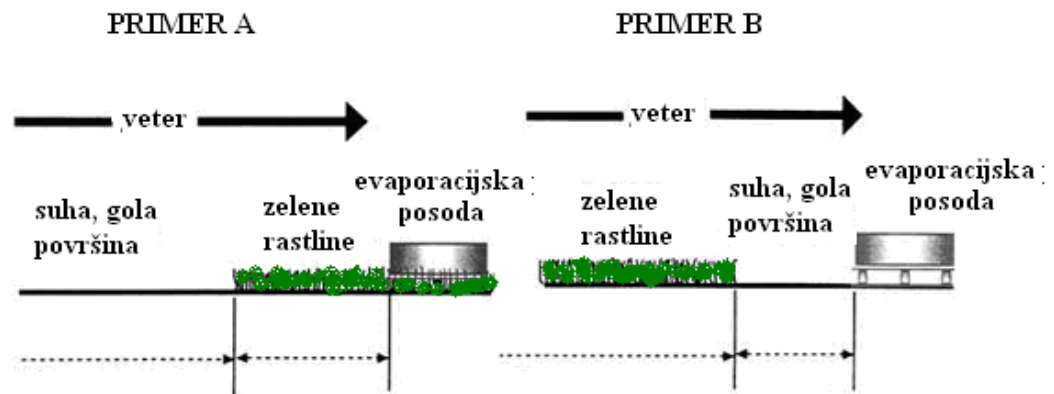
ET_0 referenčna evapotranspiracija $\left[\frac{mm}{dan}\right]$,

k_p koeficient evaporacijske posode,

ET_p evapotranspiracija s proste vodne površine $\left[\frac{mm}{dan}\right]$.

Faktor evaporacijske posode je odvisen od velikosti, oblike in barve posode, postavitve posode (nad zemljo, vkopana), pokritosti tal v okolici, vetra in vlažnosti. Na Sliki 10 sta

prikazana dva primera postavitve posode. V primeru A so v okolici posode nizke zelene rastline, v primeru B pa je v okolici suha, gola površina. Glede na ti dve možnosti postavitve evaporacijske posode se delijo tudi vrednosti faktorja za evaporimeter »A«, kot prikazujeta Slika 11 in Slika 12 (Allen in sod., 1998).



Slika 10: Primer A in primer B postavitve evaporacijske posode (Povzeto po: Allen in sod. 1998)

Primer A: Evaporimeter "A" obkrožajo nizke zelene rastline				
srednja relativna vlažnost %		< 40	40 - 70	> 70
Hitrost vetra m/s-1	Širina zelene površine na privetni strani [m]			
rahel < 2	1	.55	.65	.75
	10	.65	.75	.85
	100	.7	.8	.85
	1000	.75	.85	.85
srednji 2-5	1	.5	.6	.65
	10	.6	.7	.75
	100	.65	.75	.8
močan 5-8	1	.45	.5	.6
	10	.55	.6	.65
	100	.6	.65	.7
zelo močan > 8	1	.4	.45	.5
	10	.45	.55	.6
	100	.5	.6	.65
	1000	.55	.6	.65

Slika 11: Vrednost koeficienta k_p , za evaporimeter »A«, v primeru, da ga obkrožajo nizke zelene rastline (Povzeto po: Maidment, 1993)

Primer B: Evaporimeter "A" obkroža suha, gola površina				
srednja relativna vlažnost %		< 40	40 - 70	> 70
Hitrost vetra m/s-1	Širina neporaščene površine na privetni strani [m]			
rahel	1	.7	.8	.85
< 2	10	.6	.7	.8
	100	.55	.65	.75
	1000	.5	.6	.7
srednji	1	.65	.75	.8
2-5	10	.55	.65	.7
	100	.5	.6	.65
	1000	.45	.55	.6
močan	1	.6	.65	.7
5-8	10	.5	.55	.65
	100	.45	.5	.6
	1000	.4	.45	.55
zelo močan	1	.5	.6	.65
> 8	10	.45	.5	.55
	100	.4	.45	.5
	1000	.35	.4	.45

Slika 12: Vrednost koeficienta k_p , za evaporimeter »A«, v primeru, da ga obkroža suha, gola površina (Povzeto po: Maidment, 1993)

2.3.4 Evapotranspiracija rastline pod standardnimi pogoji (ET_C)

Pojem evapotranspiracije rastline pod standardnimi pogoji predstavlja evapotranspiracijo za izbrano rastlino (Allen in sod., 1998). Ta rastlina je zdrava, dobro gojena, ima zadostno količino vode glede na dane klimatološke pogoje in uspeva na večjih površinah. Količino vode, ki se izgubi z izhlapevanjem, z drugimi besedami imenujemo potreba rastline po vodi in predstavlja količino vode, ki jo je potrebno rastlini dodati. Evapotranspiracija pa predstavlja količino vode, ki je bila izgubljena. FAO predlaga račun ET_c s pomočjo izraza:

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c \quad (2)$$

Pri čemer je:

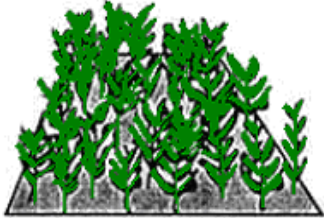
ET_0 referenčna evapotranspiracija $\left[\frac{mm}{dan}\right]$,

k_c koeficient rastline,

ET_c evapotranspiracija pod standardnimi pogoji $\left[\frac{mm}{dan}\right]$.

Evapotranspiracija pod standardnimi pogoji predstavlja produkt referenčne evapotranspiracije in koeficienta rastline (Slika 13).

$$ET_0 \times \text{faktor } K_c = ET_C$$



rastlina, ki raste pod optimalnimi pogoji

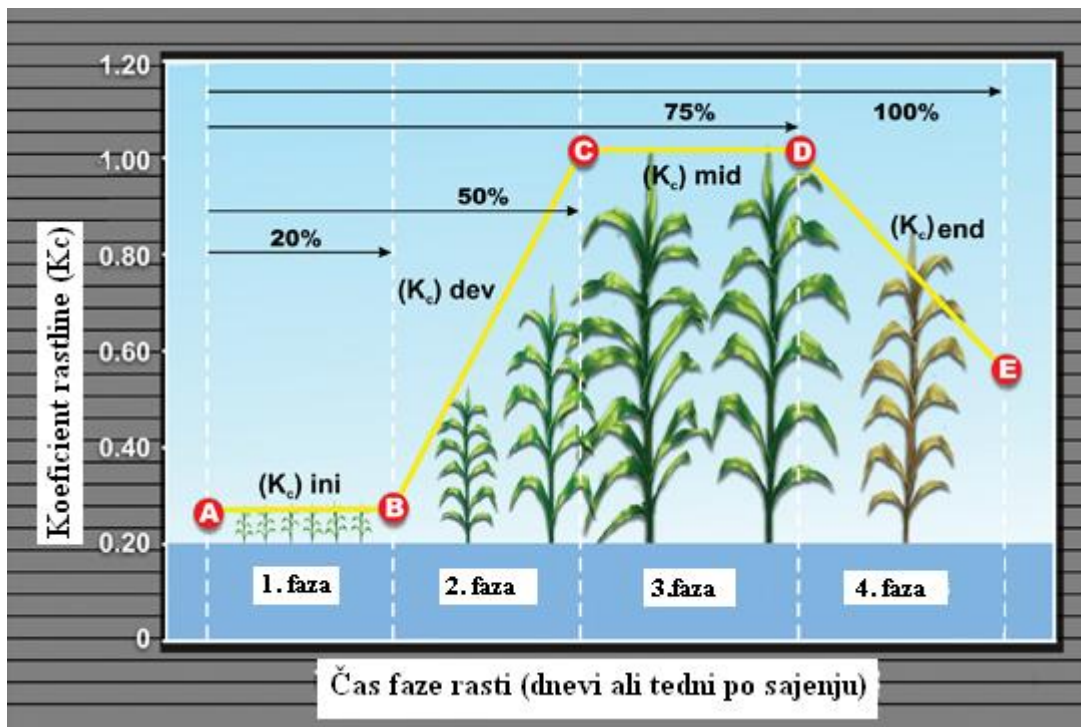
evapotranspiracija pod standardnimi pogoji

Slika 13: Shematski prikaz evapotranspiracije rastline pod standardnimi pogoji (Povzeto po: Allen in sod., 1998)

Koeficient rastline (k_c) je odvisen od anatomije listov, višine rastline, aerodinamičnih lastnosti in albeda. Zaradi naštetih lastnosti je koeficient rastline različen za vsako rastlino, pri posamezni rastlini pa se spreminja tudi tekom razvoja.

Ločimo štiri glavne faze rasti, in sicer začetno, razvojno, vmesno (cvetenje in razvoj plodov) in končno fazo (zrela faza) (Slika 14).

Glede na določeno fazo rasti se spreminja tudi koeficient rastline (k_c). Dolžina določene faze je odvisna od podnebja, zemljepisne širine, nadmorske višine, časa sajenja in tipa rastline. V fazi rasti se večina izhlapevanja izvaja iz zemljine, v kasnejših fazah le-ta pada, raste pa količina transpiracije, zaradi povečanja listne površine. Ko je rastlina v fazi razvoja, je poraba vode in vrednost koeficienta rastline relativno nizka, z razvojem rastline obe omenjeni vrednosti naraščata. Na poljščinah je stopnja transpiracije maksimalna, ko je rastlina na vrhuncu svojega razvoja, proti koncu sezone stopnja transpiracije ponovno pade (Vir: <http://elkhorn.unl.edu/epublic/pages/publicationD.jsp?publicationId=1237>, (11.05.2010)).



Slika 14: Prikaz koeficienta rastline v odvisnosti od faze rasti rastline

(<http://elkhorn.unl.edu/epublic/pages/publicationD.jsp?publicationId=1237>, (11.05.2010))

2.3.5 Evapotranspiracija rastline pod nestandardnimi pogoji (ETC_{adj})

Za rastlino, ki je bila pod vplivom nestandardnih pogojev, pomeni, da je rasla v pogojih, kot so prisotnost pesticidov, bolezni, prevelike vsebnosti soli v zemlji, nerodovitnost zemlje in suša. Zaradi teh dejavnikov, ki med drugim tudi zavirajo rast rastline, je lahko evapotranspiracija nižja od evapotranspiracije pod standardnimi pogoji. Te nestandardne pogoje upoštevamo v faktorju vodnega stresa (k_s) ali pa jih upoštevamo s prilagoditvijo koeficienta k_c (Slika 15).

Poznamo dva načina uporabe faktorja rastline, in sicer upoštevanje nestandardnih pogojev z enojnim ali dvojnimi faktorjem. Pri enojnem faktorju je razlika evapotranspiracije med posajeno rastlino in referenčno travo združena v enem samem koeficientu. Enojni koeficient se uporablja predvsem pri planiranju namakalnih sistemov, pri dvojnem pa vsak faktor posebej opisuje razliko med izhlapevanjem in transpiracijo zemljine izbrane rastline in referenčne rastline. Uporaba dvojnega koeficienta je nujna pri izračunih izhlapevanja iz

zemljine. Najpogosteje potrebujemo te podatke pri modeliranju kvalitete vode, izračunu časa namakanja in različnih raziskavah (Allen in sod., 1998).

$$ET_0 \times \begin{array}{c} \text{faktorja } K_s \times K_c \\ \text{vključen vodni in okoljski} \\ \text{stres} \end{array} = ET_c \text{ adj}$$

evapotranspiracija pod nestandardnimi pogoji

Slika 15: Shematski prikaz referenčne evapotranspiracije pod nestandardnimi pogoji (Povzeto po: Allen in sod., 1998)

2.4 Faktorji vpliva na evapotranspiracijo

Na stopnjo evapotranspiracije vplivajo različni faktorji (Slika 16). Allen in sod. (1998) jih delijo na tri glavne faktorje, in sicer meteorološki faktorji, faktor rastline in okoljski pogoji.



Slika 16: Glavni faktorji, ki vplivajo na evapotranspiracijo (Povzeto po: Allen in sod., 1998)

2.4.1 Meteorološki faktorji

Meteorološki faktorji proizvajajo energijo za izhlapevanje in odstranjujejo vodno paro iz površine. Mednje štejemo sončno sevanje, temperatura zraka, vlaga v zraku in hitrost vetra (Allen in sod., 1998).

2.4.1.1 Sončno sevanje

Za izhlapevanje vode potrebujemo energijo in prav sončna energija je tista, ki lahko spreminja agregatno stanje ogromne količine vode. Količina energije, ki je potrebna za proces evapotranspiracije, je odvisna od letnega časa in zemljepisne lege. Na dejansko količino energije, ki doseže površino iz katere izhlapeva voda, vplivajo tudi oblaki. Pri rastlini se večina sončne energije, ki jo vsrkajo listi, porabi za transpiracijo, preostanek pa za fotosintezo (Tyree, 2000).

2.4.1.2 Temperatura zraka

Glavna vpliva, ki določata temperaturo zraka, sta sončno sevanje in toplota. Za sončno sevanje je značilno, da ga absorbira atmosfera, medtem ko je za toploto značilno, da jo oddaja zemlja. V splošnem velja, da je pri višjih temperaturah višja tudi stopnja izhlapevanja in obratno, torej nižja temperatura vodi k nižjemu izhlapevanju.

Visoke temperature zraka, ki pospešijo stopnjo izhlapevanja in obdobja brez padavin, vodijo k zmanjšanju količine vode v tleh, kar predstavlja katastrofo za kmetijske površine (Young, 1994).

2.4.1.3 Vlaga v zraku

Na dobro navlaženih poljih v aridnih (vročih in suhih) območjih je izhlapevanje, za razliko od humidnih (vlažnih) območij, zelo veliko, saj je v humidnih območjih zrak že dovolj zasičen, kar znižuje stopnjo evapotranspiracije. Poleg tega je v aridnih območjih izhlapevanje neposredno odvisno od količine padavin (Prohaska, 2003).

2.4.1.4 Hitrost vetra

Proces evapotranspiracije je prav tako odvisen od vetra in zračnih turbolenc, ki nenehno prinašajo velike količine zraka nad površino iz katere se vrši izhlapevanje. Ko voda izhlapeva, postane zrak nad površino zasičen. S pomočjo vetra ta zasičen zrak nadomesti bolj suh zrak in evapotranspiracija se lahko nadaljuje. V nasprotnem primeru stopnja evapotranspiracije pade.

Kadar opazujemo razmerje med viharjem in rahlim vetrom, ugotovljamo, da je slednji veliko bolj učinkovit pri pospeševanju transpiracije (Brilly in Šraj, 2005).

2.4.2 Faktor rastline (k_c)

Faktor se spreminja glede na vrsto rastline in njeno fazo rasti. Nanj vplivajo podnebni dejavniki, izhlapevanje iz zemljine in vrsta rastline (Allen in sod., 1998).

2.4.2.1 Podnebni dejavniki

Pomemben podnebni dejavnik je veter, ki ima na faktor rastline velik vpliv. Ta je še posebej občuten pri višje rastočih rastlinah, medtem ko je pri nižje rastočih ta vpliv relativno majhen (za referenčno travo je k_c enak 1). Večja vrednost omenjenega faktorja rastline (k_c) se pojavlja v aridnih območjih z veliko vetra. Zaradi tega je tu višja tudi stopnja evapotranspiracije. V humidnih območjih z manj vetra, je vrednost faktorja rastline precej nižja.

2.4.2.2 Izhlapevanje iz zemljine

Kadar so rastline nižje rasti in ne senčijo tal, je vrednost koeficienta rastline ob namakanju ali dežju višja. Ob pomanjkanju vode in posledično suhi zemljini lahko vrednost faktorja rastline pade tudi pod 0,1.

2.4.2.3 Tip rastline

Vsaka rastlina ima določeno višino v svoji razvojni fazi. V tej fazi se, ob višini rastline, spreminja tudi pokrovnost tal in število stomat. Poleg omenjenega na faktor rastline vpliva tudi odpornost rastline, ki predstavlja obseg listne površine, število stomat, starost listov in možnost kontrole zapiranja stomat. Kadar imamo nižjo rastlino in manjšo oddaljenost med posameznimi rastlinami, je koeficient rastline višji (tudi k_c je večji od 1). Koeficient rastline je, v primeru zapiranja ali zmanjšanja števila por (za referenčno travnato površino je k_c enak 1), lahko tudi manjši od 1.

2.4.3 Okoljski pogoji

Pri evapotranspiraciji je potrebno upoštevati tudi **okoljske pogoje**. Mednje se uvrščajo slanost, rodovitnost prsti, gnojenje, bolezni rastlin, slabo upravljane z zemljino in vodo. Prav tako je potrebno upoštevati tudi druge dejavnike, kot so pokrovnost tal, gostota poraščanja in vsebnost talne vode.

2.4.4 Delitev faktorjev vpliva glede na površino s katere se vrši izhlapevanje

Matičič (1977) omenja faktorje vpliva glede na evaporacijsko površino. Slednjo je razdelil na **prosto vodno površino** in na **zemljino**. Ward in Trimble (2004) pa dodajata še vpliv faktorjev na **izhlapevanje s površine rastlin**.

2.4.4.1 Prosta vodna površina

Na izhlapevanje s proste vodne površine ima vpliv mnogo faktorjev, med njimi so dobava in skladiščenje toplote, razlika v parnem pritisku, temperatura, barometrični pritiski, evaporacijsko površje, okoliš, vsebnost soli v vodi in nečistoče.

2.4.4.1.1 Dobava toplote

Glavni vir toplote so sonce, nebo in druga telesa, ki oddajajo toploto. Sprememba zaloge toplote se ne odraža samo v spremembi izhlapevanja, ampak tudi v spremembi temperature vodnega površja.

2.4.4.1.2 Razlika v parnem pritisku

Izhlapevanje je ob ostalih nespremenjenih pogojih sorazmerno spremembi zasičene pare in parnega pritiska zraka.

2.4.4.1.3 Temperatura

Izhlapevanje je odvisno od temperature vode in zraka. Kadar so temperature vode in zraka višje, je proces izhlapevanja bolj izrazit in obratno.

2.4.4.1.4 Skladiščenje toplote

Skladiščenje toplote je zanemarljivo za plitvine, v globokih vodah pa je zelo pomembno. Poleti vode vsrkajo toploto, ki jo pridobijo s pomočjo sončne energije. Toploto skladiščijo in jo v hladnejših mesecih oddajajo, zato je stopnja izhlapevanja pozimi večja od stopnje izhlapevanja poleti.

2.4.4.1.5 Barometrični pritisk

Za barometrični pritisk je značilno, da s padanjem izhlapevanje narašča, z naraščanjem pa izhlapevanje pada.

2.4.4.1.6 Evaporacijsko površje

Evaporacijsko površje predstavlja vodno površje, iz katerega izhlapeva voda. Na manjših površinah moramo upoštevati hitrost vetra, vlažnost zraka, stanje atmosfere, na večjih površinah pa so omenjeni faktorji zanemarljivi.

2.4.4.1.7 Okoliš

Kadar merimo izhlapevanje v manjših evaporacijskih posodah, moramo upoštevati stanje tal, senčenje in vetrna zavetja.

2.4.4.1.8 Vsebnost soli v vodi

Če se vsebnost soli v vodi povečuje, stopnja izhlapevanja pada in lahko doseže tudi do 30 % nižjo vrednost (Brilly in Šraj, 2005). Pri teh pogojih morska voda za 2-3 % manj izhlapeva kot sladka.

2.4.4.1.9 Nečistoče in rastlinje

Pod nečistoče štejemo prah, olje, saje, rastlinje. Našteti elementi znižujejo stopnjo izhlapevanja.

2.4.4.2 Izhlapevanje iz zemljine

Na izhlapevanje iz zemljine vplivajo različni faktorji. Najbolj pogosti med njimi so vlaga v zemljini, globina nivoja podtalnice, sestava zemljine, razgibanost in naklon površja ter vrsta in stanje podlage, ki ju posebej omenjata Brilly in Šrajeva (2005).

2.4.4.2.1 Vlaga v zemljini

Vlaga v zemljini je pomembna za izhlapevanje predvsem v drugi fazi izhlapevanja iz zemljine (padajoča faza). Kadar pride do situacije, da je v zemljini dosežena točka venenja, se proces izhlapevanja ustavi.

2.4.4.2.2 Globina nivoja podtalnice

Kadar je globina nivoja podtalnice dovolj visoka da vlaži zgornje plasti zemljine, je lahko stopnja izhlapevanja enaka ali celo višja od izhlapevanja s proste vodne površine.

2.4.4.2.3 Vrsta in stanje podlage

Temnejša podlaga vsrka večjo količino sončnega sevanja, kot svetlejša podlaga. Pri bolj razgibanem površju je mejna površina z zrakom večja in posledično je višja tudi stopnja izhlapevanja.

2.4.4.3 Izhlapevanje s površine rastlin (transpiracija)

Ward in Trimble (2004) omenjata dva faktorja, ki vplivata na transpiracijo, in sicer vrsta rastline in rastlini dostopna voda.

2.4.4.3.1 Vrsta rastline

Pri vrsti rastline je potrebno omeniti tri faktorje, ki najbolj vplivajo na transpiracijo. To so sončenje, temperatura in relativna vlažnost. Vrsta rastline je bilo vedno sporno področje. Na začetku so nekateri menili, da je pomembno samo direktno sončenje (prejemajo ga tiste rastline, ki so direktno izpostavljene soncu), kasneje pa so ugotovili, da je zelo pomembno tudi indirektno sončenje, ki ga imajo zasenčene rastline. Pri vrsti rastline je pomembna tudi globina korenin, ki je sorazmerna z višino rastline, razen izjem, kjer korenine segajo do

podzemne vode. Pri vrsti rastline moramo upoštevati še višino pridelka, hrapavost listov in karakteristike koreninjenja (Allen in sod., 1998).

2.4.4.3.2 Rastlini dostopna voda

Transpiracija se vrši maksimalno, kadar je vode v izobilju, ustavi pa se pri točki venenja. Pri ugotavljanju vplivov dejanskih podnebnih razmer na transpiracijo rastline, si lahko pomagamo z meritvijo dejanske in potencialne transpiracije. Potencialna transpiracija predstavlja maksimalno količino vode, ki bi jo rastlina transpirirala ob zadostni količini vode. Pri dejanski transpiraciji je upoštevano pomanjkanje vode, zato je vrednost omenjene manjša od potencialne transpiracije (Allen in sod., 1998).

3 NAČINI MERJENJA EVAPOTRANSPIRACIJE

3.1 Wildov evaporimeter

Je eden najstarejših instrumentov za merjenje evapotranspiracije, ki pa ne daje zadovoljivih podatkov (Prohaska, 2003). Večina starejših podatkov, pri merjenju evapotranspiracije, je bilo izmerjeno prav z Wildovim evaporimetrom, zato Prohaska (2003) predlaga, da se ti podatki uporabljajo samo v praktične namene ali pa kot približek izhlapevanja na določenem območju.

Wildov evaporimeter (Slika 17) je največkrat nameščen v meteorološki hišici, kjer ni instrumentov za merjenje temperature zraka. Njegov način delovanja je princip tehtnice. Sestavljen je iz dveh pomembnih elementov, in sicer iz posodice, ki zadržuje vodo, in utežnega kazalca. Posodica je navadno iz medenine, njena površina za izhlapevanje pa meri približno 250 cm². Če želimo, da se potek izhlapevanja zapisuje, potrebujemo nadgradnjo evaporimetra, in sicer evaporigraf. Evaporigraf je povezan s tehtnico, ki mu pošilja podatke o izhlapevanju (Brilly in Šraj, 2005).

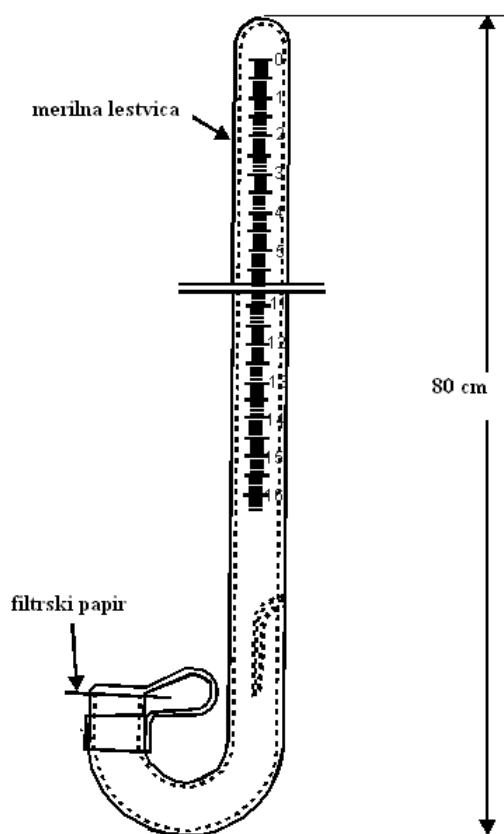


Slika 17: Wildov evaporimeter (Vir: http://www.noa.gr/museum/english/index_en.htm,
(10.03.2010))

3.2 Pichejev evaporimeter

Sestavljen je iz zvite steklene cevi, navadno dolžine 80 cm, ki je na dnu zavita pod kotom 180° (Slika 18). Na stekleni cevi je zapisana merilna lestvica, ki označuje količino izhlapele destilirane vode. Konec cevi prekriva filtrski papir, skozi katerega izhlapeva voda (Prohaska, 2003).

Evaporimeter obesimo v meteorološko hišico za tem, ko ga napolnimo z vodo in zatesnimo. Ko začne voda skozi evaporimeter izhlapevati, na vrhu nastane praznina, ki jo zapolni zrak. Zrak vstopa v evaporimeter skozi za to narejeno odprtino. Uporabimo ga lahko tudi izven meteorološke hišice, vendar v obdobju, ko ni padavin in možnosti zmrzovanja (Brilly in Šraj, 2005).



Slika 18: Pichejev evaporimeter (Vir: <http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/2C.htm>,
(11.05.2010))

3.3 Evaporacijske posode (posode za merjenje izhlapevanja)

Eden izmed najstarejših in najenostavnejših instrumentov za merjenje izhlapevanja so evaporacijske posode. Evaporacijsko posodo namestimo v prostor in jo napolnimo z vodo. Razlika v nivoju vode na začetku in koncu določenega časovnega obdobja predstavlja količino izhlapele vode v tem obdobju. Na količino izhlapele vode vpliva tudi vrsta materiala (plastika, steklo, jeklo) iz katerega je posoda (Ward in Trimble, 2004).

Evaporacijske posode se ločijo tudi po obliki, barvi, postavitvi in velikosti (Allen in sod., 1998). Lahko so vkopane v zemljo (GGI-3000 in WMO), postavljene na zemeljsko površino (evaporimeter »A«), ali pa so postavljene na vodno površino (Prohaska, 2003).

Evaporimeter »A«

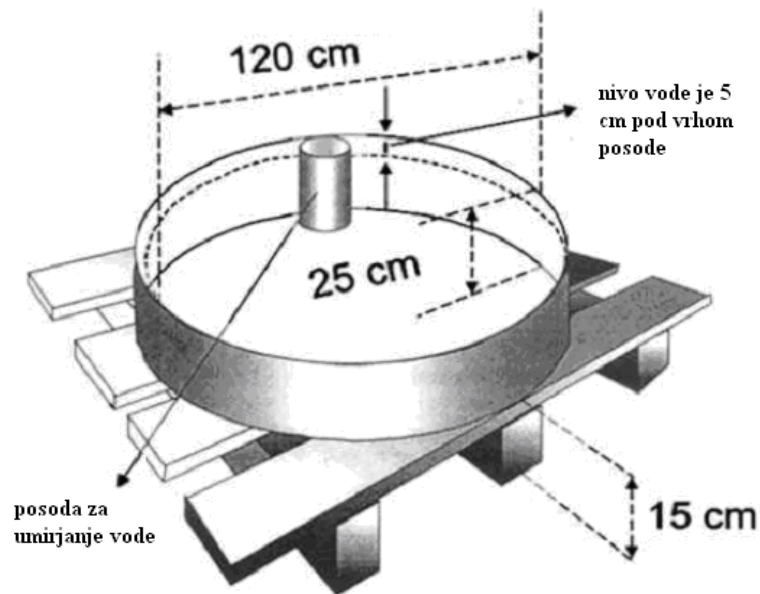
Ker se na splošno uporablja veliko posod za merjenje izhlapevanja, so na uradu za vreme v Združenih državah Amerike (United State Weather Bureau) standardizirali evaporimeter »A« (Ward in Trimble, 2004).

To je posoda, navadno s premerom 120 cm in globine okrog 25 cm. Izdelana je iz nerjavečega železa ali pločevine, ki sta debeline 0,8 cm in prelakirana z nitrosrebrnim lakom (Slika 19).

V evaporimetru »A« se nahaja medeninasta komora za merjenje izhlapevanja in je višine 20 cm in premera 9 cm. Kadar merimo izhlapevanje iz vodne površine s pomočjo evaporimetra »A« je potrebno redno izvajati meritve višine vode in količine padavin (Helmanov dežemer). Področje, kjer postavimo evaporimeter, mora biti odprto in ravno, zaradi senčenja in ostalih vplivov. Če pa imamo v bližini drevesa, grmovje ali zgradbe je priporočljivo, da so oddaljene vsaj za dvakratno višino evaporacijske posode (Allen in sod., 1998).

Evaporacijska posoda se napolni z vodo do 5 cm pod vrhom posode, ki je postavljena na lesen podstavek. Medeninasta posoda v evaporimetru služi tudi umirjanju vode. Postavi se na dno na severno stran. Merjenje nivoja vode se izvaja s pomočjo mikrometra. Evaporimeter se lahko postavi na travnato ali vodno površino. Priporočljivo je, da se pri izhlapevanju iz vodne površine obenem meri še hitrost vetra v neposredni bližini instrumenta in relativna vlažnost. Kadar se zgodi, da je nivo vode v evaporimetru »A« previsok, je možnost, da so padavine del

vode s pljuskanjem razpršile izven posode (tudi do 10%). Takšne možnosti ne smemo izključevati in jo moramo tudi v primeru pojava upoštevati, saj se nam v nasprotnem primeru poveča nivo izhlapevanja (Prohaska, 2003). Nivo vode v evaporimetru »A« je lahko občasno tudi prenizek, saj je zaradi vpliva energije iz dna in strani posode, izhlapevanje večje (Ward in Trimble, 2004).



Slika 19: Evaporimeter »A« (Allen in sod., 1998)

Slika 20 prikazuje evaporimeter »A«, s pomočjo katerega merijo izhlapevanje na Agenciji Republike Slovenije za okolje.



Slika 20: Evaporimeter na dvorišču Agencije Republike Slovenije za okolje (Foto: Polona Cesar, 12.05. 2010)

Vkopane evaporacijske posode

Evaporacijska posoda GGI 3000 je stožčaste oblike in je vkopana v tla. Globina posode je približno 60 cm, center posode, ki je vkopan v zemljinu, je globok 68.5 cm. Med vkopane evaporacijske posode spada tudi evaporimeter WMO, ki je cilindrične oblike z ravnim dnom in širine 20 m ter globine 2 m (Prohaska, 2003).

3.4 Lizimeter

Grajen objekt, ki je zakopan v teren in zapolnjen z referenčno zemljinu (da so pogoji čim bolj podobni naravnim pogojem), imenujemo lizimeter (Slika 21). Z njim merimo dejansko evapotranspiracijo, ob dodajanju vode v zemljinu pa merimo potencialno evapotranspiracijo (v našem primeru evapotranspiracija rastline pod standardnimi pogoji). Kadar želimo na enem območju meriti dejansko evapotranspiracijo, se običajno postavi več lizimetrov. Vsi lizimetri so zapolnjeni s karakteristično zemljinu, hkrati pa je v vsakem druga vegetacija. Lizimetri so povezani s cevmi, s pomočjo katerih lahko merimo pritek in odtok vode. Lizimetre se v splošnem deli na lizimetre brez tehtnice in lizimetre s tehtnico. Slednji so bolj redkeje v uporabi, vendar so natančnejši (Watson, 1995).

Meritve nam podajo rezultate dejanske infiltracije in rezultate evapotranspiracije. V zemljini lizimetra lahko merimo tudi elektroprevodnost in radioaktivnost. Na ta način spremljamo spremembo vlažnosti v zemljini. Na dnu lizimetra se nahaja drenaža, kjer se zbira in meri odtekla voda (infiltracija). Prav tako se v neposredni bližini meri količina zapadlih padavin. Evapotranspiracija se lahko določi na osnovi bilančne enačbe, ki velja za časovni korak t (Prohaska, 2003):

(3)

$$ET = P - \frac{\Delta W + IZ}{A}$$

Kjer je:

ET evapotranspiracija [mm],

P izmerjene padavine [mm],

ΔW sprememba višine vode v posodi [mm],

IZ voda, ki je iztekla iz posode [mm],

A površina sode [mm²].

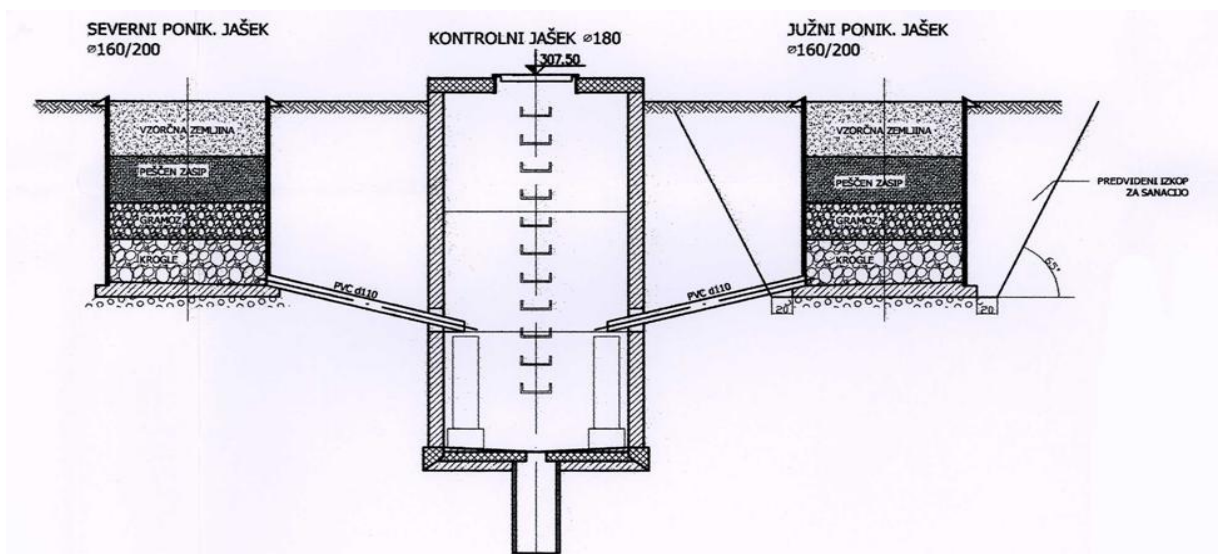
Kadar merimo evapotranspiracijo na terenu pri stalnem nivoju podtalne vode, ki jo vzdržujemo s piezometri (opazovalna vrtina namenjena merjenju podzemne vode), lahko evapotranspiracijo izračunamo po enačbi (Prohaska, 2003):

$$ET = P + \frac{VI - IZ}{A} \quad (4)$$

Kjer je:

VI količina dodane vode [mm],

IZ količina odstranjene vode [mm].



Slika 21: Lizimeter (ARSO, 2010)

S pomočjo lizimetra lahko pridobimo natančne podatke (pronicanje vode skozi zemljo, evapotranspiracija) za okolje in zemljo, kjer je lizimeter lociran. Namestitev lizimetrov v prostor je precej draga in zahtevna, vendar je njihova uporabnost obširna in dolgoročna (ARSO, 2010).

Slika 22 prikazuje star lizimeter, ki je bil nameščen v Klečah. Ker je bilo njegovo delovanje nepravilno in nenatančno, so ga zamenjali z novim lizimetrom. Namestitev je bila precej zahtevna, izvajalo pa jo je nemško podjetje UMS (Umwelt monitoring systeme) (Slika 23).



Slika 22: Lizimeter v Klečah (Foto: Polona Cesar, 21.05. 2010)



Slika 23: Nameščanje novega lizimetra (Foto: Polona Cesar, 21.05. 2010)

4 METODE IZRAČUNA REFERENČNE EVAPOTRANSPIRACIJE

V zadnjih petdesetih letih je bilo razvitih ogromno metod za račun referenčne evapotranspiracije, vendar so te metode prilagojene za točno določena podnebja in lokacije. Vsaka metoda za izračun referenčne evapotranspiracije je zasnovana za določen časovni interval v odvisnosti od vhodnih podatkov. Ti časovni koraki so lahko urni, dnevni, desetdnevni ali večdnevni. Nekatere metode so zasnovane tako, da ustrezajo izračunu evapotranspiracije za več različnih časovnih korakov. V nadaljevanju so opisane metode, s pomočjo katerih je možen izračun referenčne evapotranspiracije.

Referenčna evapotranspiracija se lahko izraža v dveh enotah. Prva enota je merska in predstavlja količino izgubljene vode iz referenčnih tal v milimetrih na časovno enoto (dan, teden, deset dni, mesec, sezona ali leto). Druga količina pa predstavlja količino energije, ki je potrebna za izhlapevanje vode iz referenčne površine. Pri 0°C na kvadratni meter potrebujemo 2.45 MJ energije, da izhlapi 1 milimeter vode. Pretvorba iz ene v drugo količino je zapisana v naslednji enačbi (Allen in sod., 1998):

$$\lambda ET_0 = 2,45 \frac{MJ}{mm} ET_0 \quad (5)$$

Metode za oceno evapotranspiracije se uporabljajo v primeru da nimamo pogojev za neposredno merjenje evapotranspiracije. Računanje evapotranspiracije po spodaj naštetih metodah je manj zamudno in finančno gledano cenejše.

Xu in Singh (2002) sta metode za oceno referenčne evapotranspiracije razdelila v pet skupin:

- radiacijske metode,
- temperaturne metode,
- kombinirane metode,
- metode na osnovi vodne bilance,
- metode na osnovi energijske bilance.

Prve tri vrste metod in njim pripadajočih enačb, ki so v praksi tudi največkrat uporabljene, so predstavljene v nadaljevanju.

4.1 Radiacijske metode

Xu in Singh (2002) sta na območju Švice izvedla primerjavo radiacijskih metod. Metode, ki so bile uporabljene, so: Turcova, Makkinkova, Jensen-Haisova, Hargreavesova, Doorenbos-Pruittova, McGuinness-Bordneova, Abtewova in Priestley-Taylerjeva. Med naštetimi sta se najboljše obnesli Makkinkova in Priestley-Taylerjeva.

Večina radiacijskih metod je izpeljanih iz:

$$\lambda ET = C_r(\omega R_s) \quad (6)$$

Kjer je:

R_s prihajajoče sončno sevanje,

ali

$$\lambda ET = (C_r \omega) R_n \quad (7)$$

Kjer je:

R_n neto sevanje,

λ latentna toplota uparjanja,

C_r koeficient odvisen od relativne vlažnosti in hitrosti vetra,

ω faktor odvisen od temperature.

4.1.1 Makkinkova enačba

Makkinkova enačba je bila razvita na Nizozemskem in predstavlja modificirano Penmanovo enačbo. Enačba je zelo podobna Priestley-Taylerjevi enačbi, razlika med njima je samo v energiji sončnega sevanja. Makkinkova enačba je izražena kot (Bakhtiari in sod., 2011):

(8)

$$ET_0 = 0,61 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda} - 0,12$$

Kjer je:

- ET_0 referenčna evapotranspiracija $\left[\frac{mm}{dan}\right]$,
 R_s skupno sončno sevanje $\left[\frac{MJ}{m^2 dan}\right]$,
 λ latentna toplota uparjanja $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$ (Enačba 16),
 γ psihrometrična konstanta $\left[\frac{kPa}{^\circ C}\right]$ (Enačba 35),
 Δ naklon krivulje parnega tlaka $\left[\frac{kPa}{^\circ C}\right]$ (Enačba 41).

Za izračun referenčne evapotranspiracije se uporablja tudi spodnja enačba. Enačba je bila izpeljana s pomočjo kasnejših raziskav, ki so se izvajale na Nizozemskem (Xu in Singh, 2002). Vse enote in oznake v enačbi (9) so enake enotam in oznakam v enačbi (8).

(9)

$$ET_0 = 0,7 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_s}{\lambda}$$

4.1.2 Priestley-Taylorjeva enačba

Enačba se uporablja za izračun evapotranspiracije v primeru, ko so tla zasičena z vodo, zato je dodan koeficient α . V primeru, da tla niso zasičena z vodo (»potencialna evapotranspiracija« ali v našem primeru evapotranspiracija pod standardnimi pogoji), se koeficient ne upošteva. Evapotranspiracija je izražena v $\left[\frac{mm}{dan}\right]$ (Xu in Singh, 2002):

(10)

$$ET_0 = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{\lambda}$$

Kjer je:

- ET_0 referenčna evapotranspiracija $\left[\frac{mm}{dan}\right]$,
 α koeficient, katerega vrednost je 1,26,
 R_n neto sevanje $\left[\frac{MJ}{m^2\ dan}\right]$,
 λ latentna toplota uparjanja $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$ (Enačba 16),
 γ psihrometrična konstanta $\left[\frac{kPa}{^\circ C}\right]$ (Enačba 35),
 Δ naklon krivulje parnega tlaka $\left[\frac{kPa}{^\circ C}\right]$ (Enačba 41).

4.1.3 Jensen-Haiseva enačba

Uvrščamo jo med radiacijske metode (Ward in Trimble, 2004), za izračun pa uporabimo sledečo enačbo:

$$ET_0 = \frac{C_T(T - T_X)R_S}{\lambda} \quad (11)$$

Kjer je;

- ET_0 referenčna evapotranspiracija $\left[\frac{mm}{dan}\right]$,
 C_T koeficient temperature,
 R_S sončno sevanje na horizontalni površini $\left[\frac{MJ}{m^2\ dan}\right]$,
 λ latentna toplota uparjanja $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$,
 T srednja dnevna temperatura [$^\circ C$],
 H nadmorska višina [m],
 e_1, e_2 zasičen parni tlak [kPa].

Izračun koeficienta C_T :

$$C_T = \frac{1}{C_I + 7,3 C_H} \quad (12)$$

kjer se koeficienta C_I in C_H izračunata po enačbi:

$$C_I = 38 - \frac{2 H}{305} \quad (13)$$

$$C_H = \frac{5}{e_2 - e_1} \quad (14)$$

$$T_x = -2,5 - 1,4 (e_2 - e_1) - \frac{H}{550} \quad (15)$$

Latentna toplota uparjanja:

$$\lambda = 2,501 - 2,361 \times 10^{-3} T \quad (16)$$

4.1.4 Enačba, ki temelji na sončni energiji

$$ET_0 = -0,611 + 0,149R_s + 0,079T_m \quad (17)$$

Kjer je:

ET_0 referenčna evapotranspiracija $\left[\frac{mm}{dan}\right]$,

- R_s skupno sončno sevanje $\left[\frac{MJ}{m^2 \text{ dan}}\right]$,
 T_m srednja dnevna temperatura [$^{\circ}C$].

4.1.5 Enačba, ki temelji na neto radiacijski energiji

(18)

$$ET_0 = 0,489 + 0,289 R_n + 0,023T_m$$

Kjer je:

- ET_0 referenčna evapotranspiracija $\left[\frac{mm}{dan}\right]$,
 T_m srednja dnevna temperatura [$^{\circ}C$],
 R_n neto sevanje $\left[\frac{MJ}{m^2 \text{ dan}}\right]$.

4.2 Temperaturne metode

Temperaturne metode sodijo med najstarejše metode za oceno referenčne evapotranspiracije in v osnovi temeljijo na enačbi (Xu in Singh, 2002):

(19)

$$ET = c(T_a)^n$$

ali

(20)

$$ET = c_1 d_1 T_a (c_2 - c_3 h)$$

Kjer je:

- ET evapotranspiracija $\left[\frac{mm}{časovno \text{ enoto}}\right]$,
 T_a temperatura zraka [$^{\circ}C$],
 H vlažnost,

c_1, c_2, c_3, c konstante
 d_1 dolžina dneva.

4.2.1 Hargreavesova enačba

Nam podaja dnevne rezultate izračuna referenčne evapotranspiracije izražene v milimetrih. Hargreavesova enačba je zelo priljubljena, saj za izračun potrebujemo samo dva podatka, in sicer srednjo dnevno temperaturo (preračunana iz maksimalne in minimalne dnevne temperature) ter energijo sevanja (Alkaeed in sod., 2006):

$$ET_0 = 0,0023 (T_m + 17.8) (\sqrt{T_{max} - T_{min}}) R_a \quad (21)$$

$$T_m = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (22)$$

Kjer je;

ET_0 referenčna evapotranspiracija $\left[\frac{mm}{dan} \right]$,
 T_m srednja dnevna temperatura [$^{\circ}C$],
 T_{max} dnevna maksimalna temperatura [$^{\circ}C$],
 T_{min} dnevna minimalna temperatura [$^{\circ}C$],
 R_a ekstraterestično sevanje $\left[\frac{MJ}{m^2 \text{ dan}} \right]$.

4.2.2 Blanney-Criddeleva enačba

To enačbo lahko uporabljamo po celem svetu, najbolj pogosto pa je uporabljena v zahodnih predelih Združenih držav Amerike (Xu in Singh, 2002). Rezultate izračuna referenčne evapotranspiracije dobimo v milimetrih na izbrano periodo (dan, mesec).

(23)

$$ET_0 = k \cdot p(0,46T_a + 8,13)$$

Kjer je:

ET_0 referenčna evapotranspiracija $\left[\frac{mm}{periodo} \right]$,

T_a srednja temperatura [°C] (dnevna ali mesečna),

p odstotek svetlih dnevnih ur za uporabljeno periodo (dnevno ali mesečno),

k koeficient, odvisen od vegetacije, lokacije, letnega časa in obdobja rasti, za sezono rasti (april do september) znaša od 0,85, medtem ko za preostale mesece znaša (oktober do marec) 0,45.

4.2.3 Thorntwaitova enačba

Enačba se uporablja za oceno mesečne vrednosti referenčne evapotranspiracije izražene v milimetrih. Za izračun potrebujemo vrednost srednje mesečne temperature in število mesečnih ur sončnega sevanja. V obdobju hladnejših mesecih so rezultati izračuna lahko višji od dejanskih. Prav tako so lahko vrednosti izračuna v aridnih območjih nižje, v humidnih pa višje, zato je priporočljivo rezultate primerjati še z izračuni po drugih metodah. Negativne lastnosti te enačbe so neustrezne vrednosti evapotranspiracije pri negativnih povprečnih temperaturah (Papadopoulou in sod., 2003).

(24)

$$ET_0 = 16 \left(\frac{10 T_i}{I} \right)^a \left(\frac{n}{12} \right) \left(\frac{N}{30} \right)$$

Kjer je:

ET_0 referenčna evapotranspiracija $\left[\frac{mm}{mesec} \right]$.

(25)

$$I = \sum_{i=1}^{12} (0,09 \cdot (T_i)^{1,5})$$

(26)

$$a = 0,016 \cdot I + 0,5$$

Kjer je:

T_i srednja mesečna temperatura [$^{\circ}\text{C}$],

N povprečne mesečne ure sončnega sevanja.

4.3 Kombinirane metode

4.3.1 Turcova enačba

Enačba predstavlja eno izmed najpreprostejših metod za oceno referenčne evapotranspiracije izražene v milimetrih na dan. Najbolj natančen izračun evapotranspiracije s pomočjo enačbe dobimo takrat, kadar je okolje humidno (vlažno). V omenjenih pogojih je pod različnimi raziskavami podala boljše rezultate le Penman-Monteith enačba (Traković in Stojnić, 2007).

(27)

$$ET_0 = 0,013 (23,88 R_s + 50) T \frac{I}{(T+15)}$$

ET_0 referenčna evapotranspiracija $\left[\frac{\text{mm}}{\text{dan}}\right]$,

T povprečna dnevna temperatura zraka [$^{\circ}\text{C}$],

R_s sončno sevanje $\left[\frac{\text{MJ}}{\text{m}^2 \text{ dan}}\right]$.

4.3.2 Penmanova enačba

Penmanova enačba se je v praksi uporabljala najpogosteje, saj so njeni rezultati bili najbolj primerljivi dejanski evapotranspiraciji. Njena uporaba je enostavna, saj se podatki lahko pridobijo iz standardnih opazovanj na meteoroloških postajah. Za izračun so potrebni naslednji podatki: sončno sevanje, temperatura, hitrost vetra in vlažnost. Podane so tri enačbe po katerih se izračunajo osnovne komponente (Yoshuda, 1981). Prva enačba predstavlja moč izhlapevanja:

(28)

$$E_a = 0,35 (e_a - e_d) \left(0,5 + \frac{u_2}{100} \right)$$

Kjer je:

- E_a aerodinamična komponenta izhlapevanja $\left[\frac{mm}{dan} \right]$,
 e_a parni pritisk zasičenosti (funkcija temperature) [mm Hg],
 e_d srednji dnevni parni tlak [mm Hg],
 u_2 hitrost vetra dva metra nad zemeljskim površjem $\left[\frac{m}{s} \right]$.

Druga enačba omogoča oceno sevanja, ki je potrebna za izhlapevanje in segrevanje zemeljskega površja:

(29)

$$R_n = A - B$$

(30)

$$A = (1 - r) R_a \left(0,18 + 0,55 \frac{n}{N} \right)$$

(31)

$$B = \sigma T_a^4 (0,56 - 0,09 \sqrt{e_d}) \left(0,10 + 0,90 \frac{n}{N} \right)$$

Kjer je:

- R_n neto energija sevanja $\left[\frac{mm}{dan} \right]$,
 R_a kratkovalovno sevanje sonca in neba, ki ga absorbira površina vode ali travnata površina,
 r koeficient refleksije (albedo) v odvisnosti od vrste površine,
 $\frac{n}{N}$ relativno število ur insolacije,
 T_a srednja dnevna temperatura zraka [K],
 e_d srednji dnevni parni tlak [mm Hg],
 σ Stefan-Boltzmannova konstanta.

Tretja enačba je sestavljena iz prvih dveh enačb in predstavlja aerodinamično komponento izhlapevanja:

(32)

$$E = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} R_n + E_a}{\frac{\Delta}{\gamma} + 1}$$

Kjer je:

- E aerodinamična komponenta izhlapevanja $\left[\frac{mm}{dan}\right]$,
- Δ naklon krivulje zasičenega parnega tlaka $\left[\frac{kPa}{^{\circ}C}\right]$,
- γ naklon krivulje parnega tlaka (psihrometrična konstanta) $\left[\frac{kPa}{^{\circ}C}\right]$.

4.3.3 FAO Penman-Monteithova enačba

Enačba se je razvila na pobudo FAO v sodelovanju z Mednarodno komisijo za namakanje in drenažo (ICID) ter s Svetovno meteorološko organizacijo (WMO). Od leta 1990 je na njihov predlog ta standardna metoda izračuna potencialne evapotranspiracije. FAO Penman-Monteith enačba je bila izpeljana iz enačb za aerodinamično odpornost in enačb za odpornost rastlin ter enačbe Penman-Monteith. Ker je v enačbi upoštevana referenčna rastlina, se lahko uporablja po celem svetu (Allen in sod., 1998).

Za račun referenčne evapotranspiracije s pomočjo FAO Penman-Monteith enačbe so potrebni naslednji podatki: sončno sevanje, temperatura zraka, vlažnost zraka in hitrost vetra. Minimalno in maksimalno dnevno temperaturo je priporočljivo preračunati po enačbi (36) v srednjo dnevno temperaturo. Potek računanja lahko nadaljujemo z minimalno in maksimalno dnevno temperaturo ali pa uporabimo srednjo dnevno temperaturo. Spodnja enačba predstavlja dnevni korak računanja.

(33)

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,43 u_2)}$$

Kjer je:

- ET_0 referenčna evapotranspiracija $\left[\frac{mm}{dan}\right]$,
 R_n neto sevanje $\left[\frac{MJ}{m^2 dan}\right]$,
 G tok toplote iz površja $\left[\frac{MJ}{m^2 dan}\right]$,
 T povprečna mesečna temperatura $[^{\circ}C]$,
 u_2 hitrost vetra na višini 2 m $\left[\frac{m}{s}\right]$,
 e_s zasičen parni tlak $[kPa]$,
 e_a dejanski parni tlak $[kPa]$,
 $e_s - e_a$ razlika med zasičenim in dejanskim parnim tlakom $[kPa]$,
 Δ naklon krivulje zasičenega parnega tlaka $\left[\frac{kPa}{^{\circ}C}\right]$,
 γ naklon krivulje parnega tlaka (psihrometrična konstanta) $\left[\frac{kPa}{^{\circ}C}\right]$.

Za določitev vremenskih parametrov potrebujemo srednjo vrednost atmosferskega pritiska, radiacijo (R_a) in v nekaterih primerih ure dnevne svetlobe (N), katerih količine so izražene v radianih. Te količine dobimo s pomočjo podatkov kot sta nadmorska višina (m) in zemljepisna širina lokacije. V Aneksu 2, ki je priloga monografiji Evapotranspiracija rastline (Allen in sod., 1998), so zapisani in natančneje obrazloženi še **atmosferski parametri**, ki vplivajo na izračun referenčne evapotranspiracije.

4.3.3.1 Atmosferski parametri

Atmosferski pritisk

Je pritisk, ki ga povzroča zemeljska atmosfera in se z višino spreminja. Atmosferski pritisk se lahko meri na meteoroloških postajah. Kadar pa meritve niso možne, se ga izračuna po naslednji enačbi:

(34)

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 z}{293} \right)^{5,26}$$

Kjer je:

P atmosferski pritisk [kPa],

z višina meritev nad zemeljskim površjem [m].

$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 z}{293} \right)^{5,26}$							
z (m)	P (kPa)	z (m)	P (kPa)	z (m)	P (kPa)	z (m)	P (kPa)
0	101.3	1000	90.0	2000	79.8	3000	70.5
50	100.7	1050	89.5	2050	79.3	3050	70.1
100	100.1	1100	89.0	2100	78.8	3100	69.6
150	99.5	1150	88.4	2150	78.3	3150	69.2
200	99.0	1200	87.9	2200	77.9	3200	68.8
250	98.4	1250	87.4	2250	77.4	3250	68.3
300	97.8	1300	86.8	2300	76.9	3300	67.9
350	97.2	1350	86.3	2350	76.4	3350	67.5
400	96.7	1400	85.8	2400	76.0	3400	67.1
450	96.1	1450	85.3	2450	75.5	3450	66.6
500	95.5	1500	84.8	2500	75.0	3500	66.2
550	95.0	1550	84.3	2550	74.6	3550	65.8
600	94.4	1600	83.8	2600	74.1	3600	65.4
650	93.8	1650	83.3	2650	73.7	3650	65.0
700	93.3	1700	82.8	2700	73.2	3700	64.6
750	92.7	1750	82.3	2750	72.7	3750	64.1
800	92.2	1800	81.8	2800	72.3	3800	63.7
850	91.6	1850	81.3	2850	71.8	3850	63.3
900	91.1	1900	80.8	2900	71.4	3900	62.9
950	90.6	1950	80.3	2950	71.0	3950	62.5
1000	90.0	2000	79.8	3000	70.5	4000	62.1

Slika 24: Atmosferski pritisk v odvisnosti od nadmorske višine (Allen in sod., 1998)

Latentna toplota uparjanja

Latentna toplota izraža energijo, ki je potrebna, da se enota mase vode pri konstantnem pritisku spremeni v vodno paro. Latentna toplota je odvisna od temperature. Pri enačbi FAO

Penman-Monteith lahko privzamemo konstantno vrednost (0,245 MJ/kg pri 20 °C) ali pa jo izračunamo s pomočjo enačbe (35).

Psihrometrična konstanta

Psihrometrična konstanta je podana z enačbo:

$$\gamma = 0,665 \times 10^{-3} P \quad (35)$$

Kjer je:

P atmosferski pritisk [kPa],

γ psihrometrična konstanta $\left[\frac{\text{kPa}}{^\circ\text{C}}\right]$.

$\gamma = \frac{c_p P}{\epsilon \lambda} = 0.665 \times 10^{-3}$							
z (m)	γ kPa/°C	z (m)	γ kPa/°C	z (m)	γ kPa/°C	z (m)	γ kPa/°C
0	0.067	1000	0.060	2000	0.053	3000	0.047
100	0.067	1100	0.059	2100	0.052	3100	0.046
200	0.066	1200	0.058	2200	0.052	3200	0.046
300	0.065	1300	0.058	2300	0.051	3300	0.045
400	0.064	1400	0.057	2400	0.051	3400	0.045
500	0.064	1500	0.056	2500	0.050	3500	0.044
600	0.063	1600	0.056	2600	0.049	3600	0.043
700	0.062	1700	0.055	2700	0.049	3700	0.043
800	0.061	1800	0.054	2800	0.048	3800	0.042
900	0.061	1900	0.054	2900	0.047	3900	0.042
1000	0.060	2000	0.053	3000	0.047	4000	0.041

Slika 25: Psihrometrična konstanta v odvisnosti od nadmorske višine (Allen in sod., 1998)

Temperatura zraka

Temperaturo merimo v zavetju najpogosteje s termometri, s termistorji ali termočleni. Novejše elektronske vremenske postaje zapisujejo temperaturo vsako minuto in na ta način lahko dobimo že natančne povprečne urne temperature.

Najpomembnejši podatek pri izračunu referenčne evapotranspiracije je maksimalna in minimalna dnevna temperatura zraka. Kadar imamo na voljo samo povprečne dnevne temperature, jih lahko uporabimo, vendar bo viden vpliv pri nadaljnjih izračunih. Pojavi se nižja vrednost nasičenega parnega pritiska, nižja vrednost deficita parnega pritiska ($e_s - e_a$) in nižja ocena referenčne evapotranspiracije. Kadar imamo na voljo povprečne urne podatke, je priporočljivo, da uporabimo srednjo dnevno temperaturo, ki se izračuna po enačbi (Allen in sod., 2005):

(36)

$$T_m = \frac{T_{max} + T_{min}}{2}$$

Kjer je:

T_{max} maksimalna dnevna temperatura [°C],

T_{min} minimalna dnevna temperatura [°C],

T_m srednja dnevna temperatura [°C].

Vlažnost zraka

Na območjih, kjer nam podatki za dejansko vlažnost (e_a) niso dostopni, jih lahko pridobimo s pomočjo minimalne in maksimalne relativne vlažnosti [%], podatkov iz psihrometra (suhi in mokri termometer [°C]) ali temperature pri točki rosišča [°C].

Temperatura rosišča

Je temperatura, do katere se mora temperatura zraka znižati, da lahko sprejme nove količine hlapov. Bolj kot je zrak suh, večja je razlika med temperaturo zraka in temperaturo rosišča.

4.3.3.2 Postopki izračuna

Srednja vrednost zasičenega parnega pritiska:

Srednja vrednost zasičenega parnega pritiska predstavlja kapaciteto zraka, ki vsebuje vodno paro in se računa po enačbi (Allen in sod. 2005):

$$e_s = \frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2} \quad (37)$$

Kjer je:

e_s srednja vrednost zasičenega parnega pritiska [kPa],

$e^0(T)$ zasičen parni pritisk [kPa], ki ga izrazimo za maksimalno $e^0(T_{max})$ in minimalno temperaturo $e^0(T_{min})$.

$$e^0(T) = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27 T}{T + 237,3} \right] \quad (38)$$

$e^0(T) = 0.6108 \exp\left[\frac{17.27T}{T + 237.3}\right]$							
T °C	e_s kPa	T °C	$e^0(T)$ kPa	T °C	$e^0(T)$ kPa	T °C	e_s kPa
1.5	0.681	13.5	1.547	25.5	3.263	37.5	6.448
2.0	0.706	14.0	1.599	26.0	3.361	38.0	6.625
2.5	0.731	14.5	1.651	26.5	3.462	38.5	6.806
3.0	0.758	15.0	1.705	27.0	3.565	39.0	6.991
3.5	0.785	15.5	1.761	27.5	3.671	39.5	7.181
4.0	0.813	16.0	1.818	28.0	3.780	40.0	7.376
4.5	0.842	16.5	1.877	28.5	3.891	40.5	7.574
5.0	0.872	17.0	1.938	29.0	4.006	41.0	7.778
5.5	0.903	17.5	2.000	29.5	4.123	41.5	7.986
6.0	0.935	18.0	2.064	30.0	4.243	42.0	8.199
6.5	0.968	18.5	2.130	30.5	4.366	42.5	8.417
7.0	1.002	19.0	2.197	31.0	4.493	43.0	8.640
7.5	1.037	19.5	2.267	31.5	4.622	43.5	8.867
8.0	1.073	20.0	2.338	32.0	4.755	44.0	9.101
8.5	1.110	20.5	2.412	32.5	4.891	44.5	9.339
9.0	1.148	21.0	2.487	33.0	5.030	45.0	9.582
9.5	1.187	21.5	2.564	33.5	5.173	45.5	9.832
10.0	1.228	22.0	2.644	34.0	5.319	46.0	10.086
10.5	1.270	22.5	2.726	34.5	5.469	46.5	10.347
11.0	1.313	23.0	2.809	35.0	5.623	47.0	10.613
11.5	1.357	23.5	2.896	35.5	5.780	47.5	10.885
12.0	1.403	24.0	2.984	36.0	5.941	48.0	11.163
12.5	1.449	24.5	3.075	36.5	6.106	48.5	11.447

Slika 26: Odvisnost zasičenega parnega pritiska od temperature (Allen in sod., 1998)

Dejanski parni pritisk:

Dejanski parni pritisk predstavlja vsebnost vode v zraku (vlažnost) pri določenih vremenskih pogojih. Njegova vrednost se lahko meri, lahko pa se izračuna po slednji enačbi (Allen in sod., 2005):

(39)

$$e_a = \frac{e^0(T_{min}) \frac{RH_{max}}{100} + e^0(T_{max}) \frac{RH_{min}}{100}}{2}$$

Kjer je:

e_a dejanski parni tlak [kPa],

$e^0(T_{\max})$ zasičen parni pritisk pri dnevni maksimalni temperaturi [kPa],

$e^0(T_{\min})$ zasičen parni pritisk pri dnevni minimalni temperaturi [kPa].

Relativna vlažnost

Odraža stopnjo zasičenosti zraka kot količnik med e_a in e^0 . Predstavlja razmerje med količino vode, ki jo zrak vsebuje, in količino vode, ki bi jo zrak lahko vseboval pri isti temperaturi. Na meteoroloških postajah se izvajajo meritve relativne vlažnosti, če pa teh ni, jo izračunamo s pomočjo enačbe (40). Izračuni so možni celo za srednjo dnevno temperaturo (RH) in za minimalno (RH_{\min}) ter maksimalno (RH_{\max}) dnevno temperaturo. Relativna vlažnost [%] je odvisna od temperature, kot prikazuje spodnja enačba:

(40)

$$RH = 100 \frac{e_a}{e^0(T)}$$

Kjer je:

RH relativna vlažnost (minimalna ali maksimalna) [%],

$e^0(T)$ zasičeni tlak vodne pare [kPa],

e_a dejanski parni tlak [kPa].

Naklon krivulje parnega tlaka

Pritisk vodne pare prispeva k totalnem atmosferskem pritisku. Zasičeni parni pritisk se spreminja eksponentno v odvisnosti od temperature. Naklon krivulje parnega pritiska je pomemben pri uparjanju in izračunih referenčne evapotranspiracije. Kadar zrak ni nasičen z vodo, je dejanski parni pritisk nižji od zasičenega parnega pritiska. Razlika med zasičenostjo in dejanskim parnim pritiskom se imenuje deficit parnega pritiska ali deficit zasičenosti, ki predstavlja indikator dejanske kapacitete izhlapevanja. Naklon krivulje zasičenega parnega pritiska je izražen s formulo:

(41)

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 \exp \left(\frac{17,27 T_m}{T_m + 237,3} \right) \right]}{(T_m + 237,3)^2}$$

Kjer je:

Δ naklon krivulje zasičenega parnega tlaka pri temperaturi T $\left[\frac{kPa}{^\circ C} \right]$,

T_m povprečna mesečna temperatura zraka $[^\circ C]$.

Toplotno sevanje

Ti podatki pogosto niso dostopni, vendar jih lahko pridobimo s pomočjo ostalih podatkov (kratkotrajno sevanje in dejansko število sončnih ur na dan).

	MJ m ⁻² day ⁻¹	J cm ⁻² day ⁻¹	cal cm ⁻² day ⁻¹	W m ⁻²	mm day ⁻¹
1 MJ m ⁻² day ⁻¹	1	100	23.9	11.6	0.408
1 cal cm ⁻² day ⁻¹	4.1868 10 ⁻²	4.1868	1	0.485	0.0171
1 W m ⁻²	0.0864	8.64	2.06	1	0.035
1 mm day ⁻¹	2.45	245	58.5	28.4	1

Slika 27: Pretvarjanje merskih enot (Allen in sod, 1998)

Ekstraterestično sevanje

Lokalna intenziteta sevanja je določena s kotom med smerjo sončnih žarkov in zemeljsko površino. Ta se spreminja tekom dneva in skozi letne čase. Sončno sevanje, ki ga sprejme zemlja na vrhu atmosfere, se imenuje ekstraterestično sevanje in je določeno z enačbo:

(42)

$$R_a = \frac{24 \cdot 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\sigma) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)]$$

Kjer je:

R_a ekstraterestično sevanje $\left[\frac{MJ}{m^2 \text{ dan}} \right]$,

G_{sc} sončeva konstanta = 0,0820 $\left[\frac{MJ}{m^2 \text{ min}} \right]$,

- d_r inverzna relativna razdalja Zemlja-Sonce,
 ω_s kot sončnega zahoda [rad],
 P zemljepisna širina [rad],
 d_r zaporedno število dneva (od 1 do 356 ali 366 dni),
 δ sončni odklon [-],
 φ zemljepisna širina preračunana v radiane ($\text{rad} = \pi/180$),
 J vrstna številka dneva v letu.

(43)

$$d_r = 1 + 0,33 \cos\left(\frac{2\pi J}{365}\right)$$

(44)

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi J}{365} - 1,39\right)$$

(45)

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)]$$

(46)

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s$$

Kjer je:

- N svetle dnevne ure [h],
 ω_s kot sončnega zahoda [rad].

Neto sevanje

Je razlika med prejetim in oddanim sevanjem med kratko in dolgovalovno dolžino, hkrati pa predstavlja ravnotežje med vsrkano in odbito energijo na zemeljskem površju. Definira se tudi kot razlika med R_{ns} in R_{nl} ;

(47)

$$R_n = R_{ns} - R_{nl}$$

Kjer je:

R_n neto sevanje $\left[\frac{MJ}{m^2 \text{ dan}} \right]$,

R_{ns} kratkovalovno sončno sevanje $\left[\frac{MJ}{m^2 \text{ dan}} \right]$,

R_{nl} dolgovalovno sončno sevanje $\left[\frac{MJ}{m^2 \text{ dan}} \right]$.

(48)

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s$$

Kjer je:

R_s sončno sevanje do zemeljskega površja (kratkovalovno sevanje) $\left[\frac{MJ}{m^2 \text{ dan}} \right]$,

α albedo, ki znaša pri referenčni travnati površini 0,23.

Na boljše opremljenih meteoroloških postajah se pogosto meri tudi kratkovalovno sevanje (R_s). Če meritve niso izvedljive, se izračuna po sledeči enačbi:

(49)

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a$$

Kjer je:

a_s regresijska konstanta (priporočljiva vrednost je 0,25),

b_s regresijska konstanta (priporočljiva vrednost je 0,50),

n dejansko trajanje sončnega sevanja [h],

R_a izven zemeljsko sevanje $\left[\frac{MJ}{m^2 \text{ dan}} \right]$,

N maksimalno možno trajanje sončnega sevanja [h],

$\frac{n}{N}$ relativno število ur insolacije

(50)

$$\frac{n}{N} = 1 - \frac{m}{10}$$

Kjer je:

m srednja dnevna oblačnost [-]

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{max,k^4} + T_{min,k^4}}{2} \right] (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{s0}} - 0,35 \right) \quad (51)$$

Kjer je:

R_{nl} dolgovalovno sončno sevanje $\left[\frac{MJ}{m^2 \text{ dan}} \right]$,

T_{max,k^4} povprečna mesečna maksimalna temperatura [K],

T_{min,k^4} povprečna mesečna minimalna temperatura [K],

σ Stefan–Boltzmannova konstanta $\left[4,903 \cdot 10^{-9} \frac{MJ}{m^2 \text{ dan}} \right]$,

R_{s0} sončno sevanje do zemeljske površine pri jasnem nebu $\left[\frac{MJ}{m^2 \text{ dan}} \right]$

e_a dejanski parni tlak [kPa].

(52)

$$R_{s0} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z) R_a$$

Kjer je:

z višina meritev nad zemeljskim površjem [m].

Zemeljski toplotni tok

Zemeljski toplotni tok je vključen v proces ogrevanja zemlje. Njegova vrednost je pozitivna, ko se zemlja segreva in negativna, ko se ohlaja. Za opis toplotnega toka so dostopni kompleksni modeli, enačba (53) pa predstavlja preprostejši model. Zemeljski toplotni tok je za dnevne ali desetdnevne periode enak nič. Za mesečni interval ali interval, ki je krajši od ene ure, se računa po različnih enačbah.

(53)

$$G = 0,07 (T_i - T_{i-1})$$

Kjer je:

- G tok toplote iz površja $\left[\frac{MJ}{m^2 \text{ dan}} \right]$,
 T_i povprečna mesečna temperatura za mesec naprej od obravnavanega meseca [°C],
 T_{i-1} povprečna mesečna temperatura za mesec nazaj od obravnavanega meseca [°C],
 C_s kapaciteta zemeljske toplote $\left[\frac{MJ}{m^3 \text{ °C}} \right]$.

Hitrost vetra

Hitrost vetra merimo dva metra nad zemeljsko površino. Višina meritve vetra je zelo pomembna, saj hitrost vetra z višino narašča. Logaritmična enačba za izračun hitrosti vetra na višini 2 m nad referenčno površino je sledeča:

(54)

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8 z - 5,42)}$$

Kjer je:

- u₂ hitrost vetra 2m nad zemeljskim površjem $\left[\frac{m}{s} \right]$,
 u_z faktor za hitrost vetra na z metrov nadmorske višine $\left[\frac{m}{s} \right]$,
 z višina meritev nad zemeljskim površjem [m].

$u_z = \frac{4.87}{\ln(67.8z - 5.42)}$							
z (m)	u_z	z (m)	u_z	z (m)	u_z	z (m)	u_z
-	-	2.2	0.980	4.2	0.865	6.0	0.812
-	-	2.4	0.963	4.4	0.857	6.5	0.802
-	-	2.6	0.947	4.6	0.851	7.0	0.792
-	-	2.8	0.933	4.8	0.844	7.5	0.783
1.0	1.178	3.0	0.921	5.0	0.838	8.0	0.775
1.2	1.125	3.2	0.910	5.2	0.833	8.5	0.767
1.4	1.084	3.4	0.899	5.4	0.827	9.0	0.760
1.6	1.051	3.6	0.889	5.6	0.822	9.5	0.754
1.8	1.023	3.8	0.881	5.8	0.817	10.0	0.748
2.0	1.000	4.0	0.872	6.0	0.812	10.5	0.742

Slika 28: Spreminjanje faktorja u_z v odvisnosti od višine meritev vetra (Allen in sod. 1998)*Manjkajoči podatki*

Včasih imamo omejene možnosti za dostop do podatkov za izračun referenčne evapotranspiracije, vendar se, kljub pomanjkanju le-teh, odsvetuje uporabo prirejenih alternativnih enačb. Tudi če imamo na razpolago samo minimalne in maksimalne dnevne temperature, je še vedno priporočljivo računati desetdnevno ali mesečno evapotranspiracijo po zgoraj omenjeni enačbi.

5 IZRAČUN REFERENČNE EVAPOTRANSPIRACIJE PO RAZLIČNIH METODAH IN NA RAZLIČNIH OBMOČJIH

5.1 Slovenska meteorološka mreža in opis izbranih postaj

Slovenska meteorološka mreža pokriva več kot 20.000 km². Razlog za gosto meteorološko mrežo je predvsem v spremenljivih podnebnih razmerah, saj lahko Slovenijo razdelimo v alpsko, panonsko, sredozemsko, celinsko in gorsko deželo.

Slovenska meteorološka stroka izvaja meteorološke meritve, ki po zapisih segajo že v leto 1779. Največ meteoroloških postaj je bilo leta 1977, in sicer 347. Leta 2008 je ostalo samo še 271 postaj, od tega 38 klimatoloških, 175 padavinskih in 58 avtomatskih postaj. Meteorološke postaje se delijo v popolnoma avtomatizirane, samodejne z opazovalci in na postaje zgolj z opazovalci. Podatki, ki se jih pridobi na meteoroloških postajah, se zbira, hrani in vzdržuje v Uradu za meteorologijo, in sicer po arhivskih standardih.

Podatki so na postajah pridobljeni na klasičen način in s pomočjo avtomatskih postaj. Klasične meritve se po pripravi kontrolirajo in digitalizirajo ter vnesejo v meteorološko bazo. Meritve avtomatskih postaj se direktno prenašajo v relacijsko bazo. Podatki, ki so na voljo v digitalni obliki, so podatki o padavinah, temperaturi, pritisku, vlažnosti, vetru itn. Kadar se upravlja z meteorološkimi podatki, je pomembno navesti tudi pripadajoče metapodatke. Z njihovo pomočjo se lažje ovrednoti podatke, oceni ustreznost meteorološke postaje za posamezno spremenljivko in oceni spremenljivost izmerjenega podatka v času in prostoru. Metapodatki vsebujejo informacijo o lokaciji, instrumentih na postaji (tip instrumenta, lastnosti, datum umerjanja in načinu postavitve) in o načinu merjenja ter opazovanja (klasična, meteorološka, samodejna, termini opazovanj in meritev) (Bergant, 2010).

Meteorološke postaje so opremljene s standardnimi registrskimi instrumenti, pogosto pa so na istem mestu nameščeni tudi elektronski senzorji za merjenje meteoroloških spremenljivk. Senzorji so povezani z računalnikom, ki shranjuje izmerjene podatke in jih sproti sporoča v omrežje meteorološke službe. Avtomatske meteorološke postaje razbremenjujejo opazovalce,

vendar je za nekatera opazovanja potreben tudi opazovalec. Poleg pozitivnih lastnosti avtomatskih postaj, se pojavljajo tudi negativne. Težave se pojavijo predvsem v ekstremnih vremenskih pogojih (močan veter, ivje, led, strela). Takrat senzorji niso nadzorovani in pogosto se zgodi, da podatki niso zapisani. V takšnem primeru je nujno potrebno ukrepanje opazovalcev (Rakovec, 2007).

V okviru diplomskega dela sem uporabila meteorološke podatke za leto 2008 s štirih meteoroloških postaj: Ljubljana Bežigrad, Murska Sobota, Portorož in Kredarica (Slika 29). Podatki, ki sem jih uporabljala pri izračunih, so pridobljeni iz avtomatskih (samodejnih) meteoroloških postaj.



Slika 29: Lega meteoroloških postaj (ARSO, 2008)

5.1.1 Meteorološka postaja Ljubljana Bežigrad

V Ljubljani (Slika 30) so z meritvami meteoroloških podatkov začeli leta 1850. Lokacija meritev se je spreminjala do leta 1948. Od omenjenega leta se lokacija meritev ne spreminja, spreminja se samo njena okolica (ceste, zgradbe, itn.). Meteorološka postaja Ljubljana Bežigrad zajema zmerno celinsko podnebje osrednje Slovenije. Leži na nadmorski višini 299

m, na območju koordinat $46^{\circ}3'$ geografske širine in $14^{\circ}31'$ geografske dolžine. Postaja se nahaja sredi mesta na travniku dimenzije 50×70 m. Približno 30 do 50 m od opazovalnega prostora rastejo posamezna drevesa v smereh sever, jug in zahod. Na zahodu je kompleks Bežigrajskih stavb, na vzhodu stoji stavba ARSO, na jugu pa parkirišče in vrtec (Bergant, 2010).

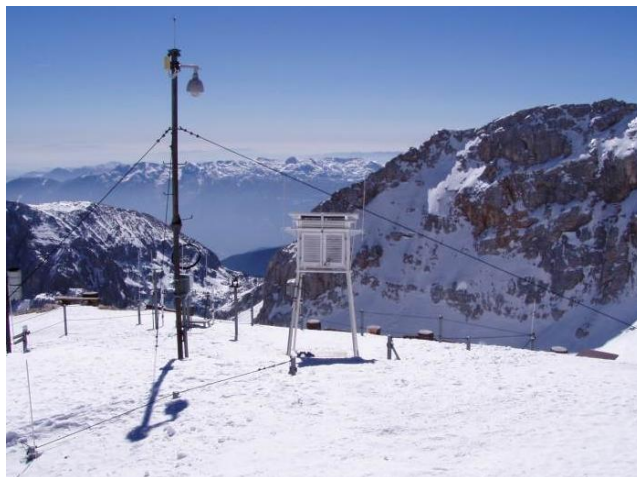


Slika 30: Meteorološka postaja Ljubljana Bežigrad (Nadbath, 2010)

5.1.2 Meteorološka postaja Kredarica

Meteorološka postaja Kredarica stoji na območju gorskega podnebja, saj leži na nadmorski višini 2514 m (Slika 31). Njene koordinate so: $46^{\circ}22'$ geografske širine in $13^{\circ}51'$ geografske dolžine. Opazovalni prostor se nahaja na oddaljenosti 15 m od Triglavskega doma na Kredarici. Na zahodni strani se nahaja najvišji vrh Slovenije, Triglav, na jugozahodni strani Mali Triglav, na severozahodni pa grebena Kredarice in Rži. V okolici meteorološke postaje se svet na jugozahodu spusti približno 20 m v sedlo proti Triglavu, na jugovzhodni do južni strani se pobočje spušča proti Krmu in Snežni Konti. Na severozahodni strani se teren nagiba proti Triglavskemu ledeniku, na severovzhodu pa se teren dviga proti grebenu Kredarice. Meteorološke meritve in opazovanja so se na omenjeni postaji začela leta 1897, in sicer samo poleti. Kasneje so se meritve začele izvajati skozi celo leto. Meteorološki podatki, pridobljeni

s postaje Kredarica, morajo biti podrobno pregledani in selekcionirani zaradi ekstremne lege in vremena (Bergant, 2010).



Slika 31: Meteorološka postaja Kredarica (ARSO, 2010)

5.1.3 Meteorološka postaja Portorož

Je postaja, ki leži na območju sredozemskega podnebja. Leži na nadmorski višini 2 m in na geografskih koordinatah: $45^{\circ}28'$ geografske širine in $13^{\circ}34'$ geografske dolžine. Meteorološka postaja (Slika 32) na obalnem območju deluje od leta 1991, vendar je bila leta 1997 prestavljena iz lokacije Beli Križ na lokacijo letališča. Meteorološka postaja se nahaja na ravnini v Piranskem zalivu pri solinah v okviru letališča. Na jugovzhodni strani, na oddaljenosti 65 m od meteorološke postaje, leži letališka zgradba visoka 12 m. Na vzhodni strani stoji hangar visok 7 m. Na zahodni strani leži letališka pista v smeri sever-jug, ki je od postaje oddaljena 120 m (Nadbath, osebna komunikacija, 2011).



Slika 32: Meteorološka postaja Portorož (ARSO, 2010)

5.1.4 Meteorološka postaja Murska Sobota

Meteorološka postaja v Murski Soboti (Slika 33) leži na koordinatah $46^{\circ}39'$ geografske širine in $13^{\circ}37'$ geografske dolžine, in sicer na 188 m nadmorske višine. Predstavlja zmerno celinsko podnebje vzhodne Slovenije. Meteorološka postaja je bila postavljena leta 1985 v vasi Rakičan na Dolinskem polju, ki je od Murske Sobote oddaljena približno 3 km. Postaja leži na območju Kmetijske šole Rakičan. Območje postaje je na severu in zahodu odprto, proti jugu in zahodu pa se razprostira vas Rakičan (Nadbath, osebna komunikacija, 2011).



Slika 33: Meteorološka postaja Murska Sobota (Savič, 2010)

5.2 Meritve meteoroloških spremenljivk

5.2.1 Temperatura

Pri vseh opisanih metodah izračuna referenčne evapotranspiracije je osnoven vhodni podatek temperatura zraka (T). Podatki, ki sem jih pridobila na ARSU, so polurni za leto 2008. Merjeni so z avtomatskimi postajami, izražajo pa se v enotah °C. V Ljubljani, Murski Soboti in Portorožu se temperatura meri s pomočjo avtomatske postaje proizvajalca Vaisala – v Ljubljani s pomočjo senzorja QMT102, v Murski Soboti s senzorjem HMP155, v Portorožu pa s senzorjem QMT102. Na Kredarici se temperatura meri z avtomatsko postajo proizvajalca Lambrecht. Avtomatska postaja (Slika 34) ima lahko priključene različne senzorce (senzor za temperaturo, veter, vlažnost, itn.) istega ali pa drugega proizvajalca (Vičar, osebna komunikacija, 2010).



Slika 34: Avtomatska postaja Vaisala, na katero so lahko priključeni različni senzorce
(<http://www.vaisala.com/en/defense/products/automaticweatherstations/Pages/MAWS100.aspx>, (16.01.2011))

Pri pridobljenih polurnih podatkih temperature so se pojavljale napačne vrednosti ali pa teh sploh ni bilo. V primeru, da so se pojavljale napačne vrednosti, sem jih zanemarila in pri računu evapotranspiracije upoštevala samo pravilne vrednosti. Iz teh vrednosti sem nato izrazila maksimalno in minimalno dnevno temperaturo, ki je potrebna za nadaljnje izračune.

5.2.1.1 Temperatura po Sloveniji leta 2008

Leta 2008 je povprečna najnižja dnevna temperatura zraka opazno preseгла dolgoletno povprečje. V večjem delu države so bila jutra za 1,5 do 2 °C toplejša kot običajno. Največji odklon je bil zabeležen na Krasu (2,3 °C), najmanjši pa na Kredarici (1,2 °C). Popoldnevi so bili 1,2 do 2 °C toplejši kot običajno. Največji odklon je bil v Murski Soboti (2,3 °C), najmanjši pa na Kredarici (0,7 °C). Najvišji absolutni maksimum v letu 2008 je bil v Ljubljani, in sicer 32,7 °C, najmanjši absolutni minimum pa na Kredarici (-18,9 °C) (Preglednica 1). Večina mesecev je bila toplejša od povprečja, z izjemo marca in decembra, na Kredarici pa z izjemo septembra (Cegnar, 2008).

Preglednica 1: Prikaz maksimalnih in minimalnih temperatur leta 2008 v Ljubljani, Murski Soboti, Kredarici in Portorožu (Povzeto po: Cegnar, 2008)

POSTAJA	Absolutni maksimum [°C]	Maksimum leta 2008 [°C]	Absolutni minimum [°C]	Minimum leta 2008 [°C]
Ljubljana	38,8	32,7	-23,3	-7,7
Murska Sobota	39,8	33,2	-31	-11
Kredarica	21,6	16,4	-28,3	-18,9
Portorož	36,9	33,5	-12,8	-6,7

5.2.2 Veter

Podatki za veter (u_2) so v Ljubljani, Murski Soboti in Portorožu merjeni z anemometrom proizvajalca Vaisala – v Ljubljani s senzorjem WAA151 (Slika 35), v Murski Soboti in Portorožu s senzorjem WS425 (Slika 36), na Kredarici pa s senzorjem WAA252. Izraženi so v enotah m/s. Podatke za hitrost vetra sem pridobila na ARSU, njihov časovni korak je polurni (Vičar, osebna komunikacija, 2010).

Hitrost in smer vetra se v Ljubljani meri na višini 22 m, v Murski Soboti in Portorožu na višini 10 m, na Kredarici pa na višini 6 m. Enačbe za izračun referenčne evapotranspiracije navadno zahtevajo meritev vetra na 2 m, zato je višina merjenja hitrosti vetra na zahtevano višino korigirana s pomočjo enačbe (54). Pri pridobljenih polurnih podatkih o hitrosti vetra se je pogosto pojavljala vrednost nič. Ta vrednost v splošnem predstavlja zatišje, vendar ne v

vseh primerih, na primer na Kredarici je prej izjema, kot pravilo, da je vrednost hitrosti vetra enaka nič. Tu pogosto anemometer zajame sneg ali led in posledično se meritve ne izvajajo. V takšnih primerih sem vrednost hitrosti vetra zanemarila. Kadar se je vrednost nič pojavljala več ur zaporedoma, sem hitrost vetra izračunala s pomočjo meritev vetra, ki jih izvajajo opazovalci trikrat dnevno in so dostopne na spletnih straneh ARSO. Meritve te vrednosti vetra nisem višinsko korigirala (Enačba 54), saj opazovalec meri veter z iztegnjeno roko, ki pa predstavlja hitrost vetra na višini 2 m. Največ popravkov hitrosti vetra je bilo potrebno izvajati na meteorološki postaji Kredarica, najmanj pa na postaji v Ljubljani.



Slika 35: Anemometer WAA151

([http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/User%20Guides%20and%20Quick%20Ref%20Guides/WAA151 User Guide in English.pdf](http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/User%20Guides%20and%20Quick%20Ref%20Guides/WAA151%20User%20Guide%20in%20English.pdf), (17.01.2011))



Slika 36: Anemometer WS425

(<http://www.vaisala.com/en/meteorology/products/weatherinstruments/windsensors/Pages/WS425.aspx>, (17.01.2011))

5.2.2.1 Veter po Sloveniji leta 2008

Najbolj ekstremni vremenski pogoji, ki se nanašajo na veter, so se pojavljali predvsem poleti v času neviht. Prvi močni sunki vetra so se pojavili 7. julija. Na ta dan so na meteorološki postaji v Portorožu izmerili veter s hitrostjo 134 km/h. Prav tako je močan veter spremljal neurje 13. in 14. julija. V Ljubljani in njeni okolici je povzročil veliko materialne škode. Številna neurja so se pojavljala tudi v mesecu avgustu. V tem času je veter pihal na območju meteorološke postaje Portorož tudi s hitrostjo 129 km/h (ARSO, 2009).

5.2.3 Relativna vlažnost

Vhodni podatek za izračun evapotranspiracije je tudi relativna vlažnost (RH), merjena v %. Polurne podatke sem pridobila na ARSU, merjeni pa so bili z avtomatskimi postajami. Na vseh lokacijah se za merjenje relativne vlažnosti uporablja senzorje proizvajalca Vaisala. V Ljubljani in Murski Soboti se uporablja senzor HMP155 (Slika 37), na Kredarici senzor HMP45D, v Portorožu pa senzor HMP45DX (Vičar, osebna komunikacija, 2010) .



Slika 37: Senzor HMP155

(<http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/User%20Guides%20and%20Quick%20Ref%20Guides/HMP155%20Quick%20Reference%20Guide%20-%20M210913EN-C.pdf>, (17.01.2011))

Polurne meritve, ki se izvajajo s pomočjo avtomatskih postaj, sem pred vnosom v enačbe za izračun referenčne evapotranspiracije še natančno pregledala. V primeru, da je avtomatska postaja beležila napačne vrednosti relativne vlage (dve do tri ure dnevno), sem dotične zanemarila. Kadar pa relativna vlaga ni bila zabeležena več ur v dnevu, sem njeno

maksimalno in minimalno vrednost odčitala iz meritev, ki jih opazovalec izvaja trikrat dnevno ob točno določeni uri.

5.2.4 Energija sončnega sevanja

Energija kratkovalovnega sončnega sevanja (R_s) se na vseh omenjenih meteoroloških postajah meri s piranometri proizvajalca Kipp & Zonnen. Enota, s katero se izraža omenjeno sevanje, je W/m^2 . Merilni senzor je termo člen pokrit s črno površino, ki absorbira sončno sevanje. Z vsrkavanjem sončnega sevanja se mu temperatura poviša, vrednost te temperature pa s termo členom pretvori v električni signal (Kastelec, 2007). V Ljubljani, Murski Soboti in na Kredarici se energija sončnega sevanja meri s pomočjo senzorja CM6B, v Portorožu pa s pomočjo senzorja CMP6 (Slika 38) (Vičar, osebna komunikacija, 2010). Na nekaterih meteoroloških postajah se meri tudi neposredno sončno sevanje s pirheliometrom in difuzno sončno sevanje. Slednje se meri enako kot globalno, le da ima piranometer obroč, ki zastira neposredne sončne žarke (Bertalanič, 2003).



Slika 38: Piranometer CMP6 (<http://www.kippzonen.com/?product/1251/CMP+6.aspx>,
(17.01.2011))

Podatki o energiji kratkovalovnega sončnega sevanja (R_s), ki sem jih pridobila na ARSU, so polurni in v enotah W/m^2 . Na meteorološki postaji Kredarica so bili podatki nepopolni skozi celo leto 2008. Vzrok za nepopolne podatke na Kredarici je vpliv težkih podnebnih razmer (led, ivje, sneg, močan veter). Prav tako so bili podatki nepopolni na postaji Murska Sobota 11., 12. in 13. maja 2008. V tem obdobju je bil piranometer predvidoma v okvari. Namesto podatkov, ki so bili izmerjeni s pomočjo piranometrov, so za to obdobje uporabljeni polurni prostorsko interpolirani podatki o energiji sončnega sevanja. Prostorska interpolacija se izvede s pomočjo okoljskih postaj ali s pomočjo trajanja sončnega sevanja. Podlaga za tako

prostorsko interpolacijo je vsaj nekaj letna analiza konkretnih podatkov za določeno postajo in njeno okolico (Vičar, osebna komunikacija, 2010). Na meteoroloških postajah, kjer je bila vrednost energije kratkovalovnega sončnega sevanja izmerjena, je bilo potrebno vse podatke tudi pregledati. Nekajkrat se je med podanimi polurnimi vrednostmi pojavljala negativna vrednost izmerjenega sončnega sevanja. Te se pojavljajo večinoma v jutranjih urah hladnejših mesecev in ponoči. Vse negativne vrednosti sem popravila na vrednost 0 W/m^2 in s tem podatkom nadaljevala računanje dnevne vrednosti energije kratkovalovnega sevanja.

S pomočjo podatkov o energiji kratkovalovnega sončnega sevanja sem izračunala energijo dolgovalovnega in neto sevanja. Za račun evapotranspiracije je v nekaterih enačbah zahtevana energija ekstraterestičnega sevanja, ki se izračuna s pomočjo enačbe (42).

Trajanje sončnega obsevanja (N) se meri na postajah s pomočjo heliografa. Heliograf je optična priprava, ki je sestavljena iz krogelne leče in podstavka, na katerem je pritrjen registrski trak. Krogelna leča zbira sončne žarke v gorišču in izžiga sled na heliogramu (ARSO, 2004).

5.2.4.1 Sončno sevanje v Sloveniji leta 2008

V letu 2008 je od dolgoletnega povprečja po trajanju števila ur sončnega obsevanja najbolj odstopal februar, na Goriškem pa avgust. Najbolj siv, glede na povprečje, je bil januar in december, na Kredarici pa april. Trajanje sončnega obsevanja je bilo podpovprečno v severozahodni Sloveniji, Savinjski dolini, delu Koroške in južnem ter jugozahodnem delu Slovenije. Največji presežki (nad 10 %) so bili v severovzhodni Sloveniji. V letu 2008 je glede na dolgoletno povprečje v Murski Soboti in Ljubljani sonce sijalo nadpovprečno dolgo, na Kredarici podpovprečno, na obali pa povprečno (Cegnar, 2008).

5.2.5 Tlak

Vhodni podatek za enačbe, po katerih se računa količina referenčne evapotranspiracije, je tudi povprečna dnevna vrednost tlaka. Na avtomatskih postajah se merijo polurne vrednosti in se izražajo z enoto kPa (ARSO, 2010). Iz podanih polurnih vrednosti sem izračunala povprečno

dnevno vrednost tlaka na določeni meteorološki postaji. Pred izračunom te vrednosti, je bilo potrebno podatke še pregledati. Če se je v dnevu pojavila polurna neveljavna vrednost tlaka, sem jo zanemarila in izračunala dnevno povprečje iz ostalih vrednosti. Kadar se meritve zaradi okvare ali vplivov vremena niso izvajale več ur ali dni zaporedoma, sem povprečne dnevne vrednosti tlaka povzela iz Meteorološkega letopisa, ki je dostopen na spletu. Na meteorološki postaji Murska Sobota sem takšne povprečne vrednosti vstavila od 28. marca 2008 do konca leta 2008. Na meteorološki postaji Kredarica sem takšne vrednosti uporabila za več dni v mesecu, in sicer od marca do septembra.

5.3 Priprava vhodnih podatkov in metodologija

Za izračun referenčne evapotranspiracije se v splošnem uporablja veliko metod in enačb. Za izračune sem izbrala dve temperaturni, dve radiacijski in dve kombinirani metodi. Pri temperaturnih metodah sem se odločila za Thorntwaithovo in Hargreavesovo enačbo, pri radiacijskih metodah za Priestley-Taylorjevo in Makkinkovo enačbo, pri kombiniranih metodah pa za FAO Penman-Monteithovo in Turcovo enačbo. Enačbe sem izbrala glede na njihovo pogostost uporabe po svetu. Po omenjenih enačbah sem izračunala količino referenčne evapotranspiracije za štiri meteorološke postaje (Ljubljana Bežigrad, Kredarica, letališče Portorož in Murska Sobota), za leto 2008. Polurne vrednosti spremenljivk (temperatura, relativna vlažnost, sončno sevanje, hitrost vetra in pritisk), ki so potrebne za izračun, sem pridobila na ARSU. Na postajah, kjer so bili polurni podatki nepopolni, sem jih nadomestila s podatki, ki se pridobijo s pomočjo opazovalcev. Ti odčitajo vrednost podatkov trikrat dnevno. Največ nepopolnih podatkov je bilo na meteorološki postaji Kredarica, predvsem zaradi vpliva vremenskih razmer. Kadar izračun referenčne evapotranspiracije, zaradi nepopolnosti podatkov ali neprimernosti enačbe, ni bil mogoč, sem tisti dan ali mesec označila z znakom *.

5.4 Izračun referenčne evapotranspiracije po različnih metodah

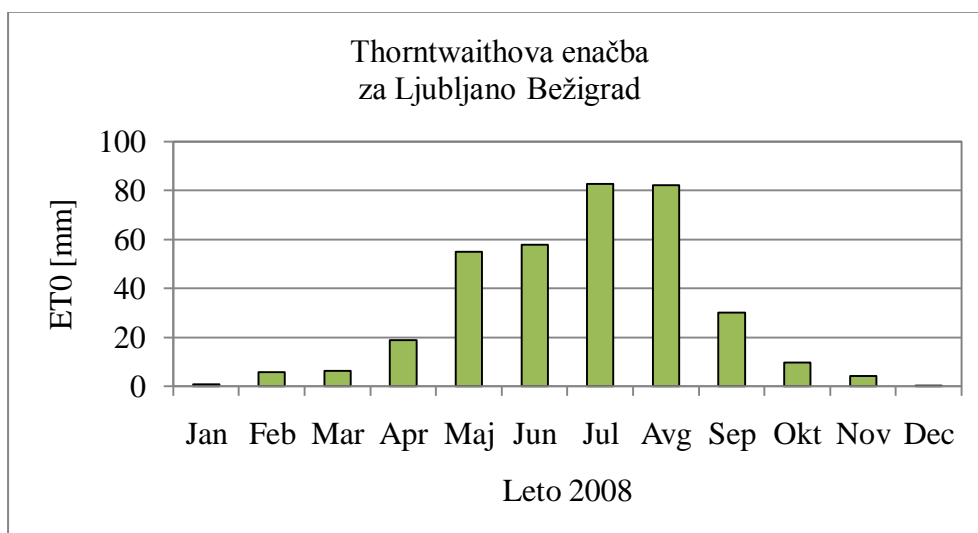
5.4.1 Thorntwaithova enačba

Thorntwaithova enačba je ena izmed najstarejših in manj zahtevnih enačb. Uvršča se jo med temperaturne metode, saj sta potrebna vhodna podatka samo povprečna mesečna temperatura in povprečno mesečno število ur sončnega sevanja. Oba vhodna podatka sem pridobila na ARSU. Iz polurnih podatkov temperature (za leto 2008), sem izračunala povprečne mesečne vrednosti temperature. Podatke o povprečnem mesečnem številu ur sončnega sevanja sem pridobila iz dnevnik podatkov števila ur sončnega sevanja. Rezultati izračuna mesečne vrednosti evapotranspiracije so prikazani v Preglednici 2. Iz preglednice je razvidno, da mesečna vrednost referenčne evapotranspiracije ni izračunana za meteorološko postajo Kredarica. Na omenjeni lokaciji so se pojavljajo negativne povprečne mesečne vrednosti temperature. Le-te pa so vzrok, da izračun ni bil mogoč, saj za Thorntwaithovo enačbo velja, da je njena uporabnost omejena prav v primeru, kadar so povprečne temperature manjše od 0 °C (Papadopoulou in sod., 2003). Maksimalna vrednost referenčne evapotranspiracije se pojavi na meteorološki postaji v Portorožu, in sicer v mesecu avgustu (108,4 mm), minimalna vrednost pa v Ljubljani v mesecu decembru (0,4 mm).

Preglednica 2: Mesečne vrednosti evapotranspiracije po Thorntwaithovi enačbi

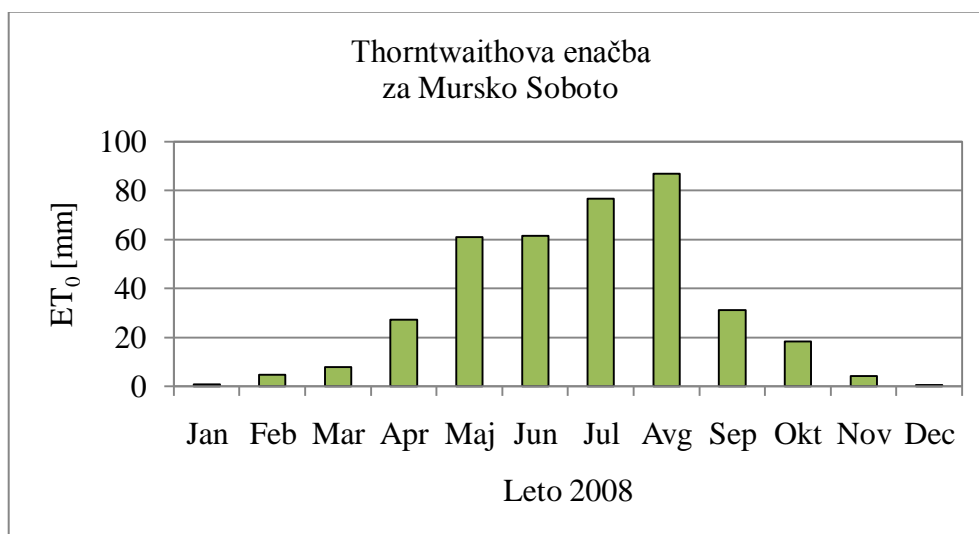
Postaja Mesec	ET ₀ [mm] za Ljubljano Bežigrad	ET ₀ [mm] za Mursko Soboto	ET ₀ [mm] za letališče Portorož	ET ₀ [mm] za Kredarico
Januar	0,9	0,7	3,6	*
Februar	5,7	4,8	5,7	*
Marec	6,3	8,0	10,6	*
April	19,0	27,3	23,3	*
Maj	54,8	60,9	56,4	*
Junij	57,8	61,5	70,2	*
Julij	82,6	76,7	106,7	*
Avgust	82,0	86,8	108,4	*
September	30,1	31,1	41,8	*
Oktober	9,6	18,3	26,4	*
November	4,2	4,4	9,1	*
December	0,4	0,6	4,7	*

V Ljubljani je vrednost referenčne evapotranspiracije najnižja v zimskih mesecih. Najnižja vrednost je v mesecu decembru, in sicer 0,4 mm, najvišja pa v mesecu avgustu (82 mm). Vrednost evapotranspiracije od januarja do avgusta narašča, od avgusta proti decembru pa upada (Slika 39).



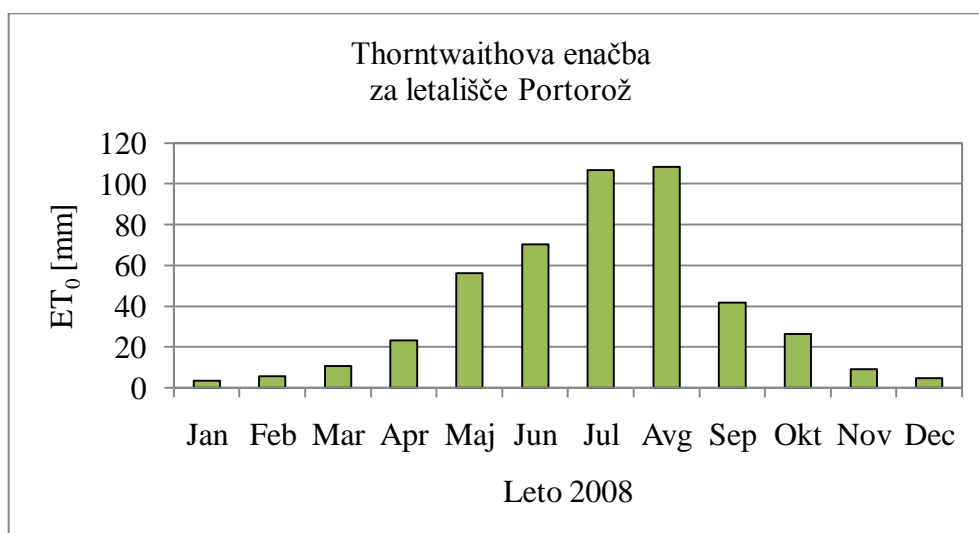
Slika 39: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Ljubljano po Thornthwaithovi enačbi

V Murski Soboti je, če rezultate primerjam z ostalimi lokacijami, v januarju in februarju najnižja vrednost evapotranspiracije. Najnižja vrednost se pojavi decembra (0,6 mm), najvišja vrednost pa v avgustu (86,8 mm). Vrednost evapotranspiracije narašča vse do avgusta, proti koncu leta pa vidno pada (Slika 40).



Slika 40: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Mursko Soboto po Thorntwaithovi enačbi

Najvišje vrednosti evapotranspiracije se pojavijo v Portorožu. V mesecu avgustu je vrednost 108,4 mm in predstavlja najvišjo izračunano vrednost med vsemi lokacijami po Thorntwaithovi metodi. V mesecu septembru (41,8 mm) vrednost evapotranspiracije močno pade in se niža vse do konca leta (Slika 41).



Slika 41: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Mursko Soboto po Thorntwaithovi enačbi

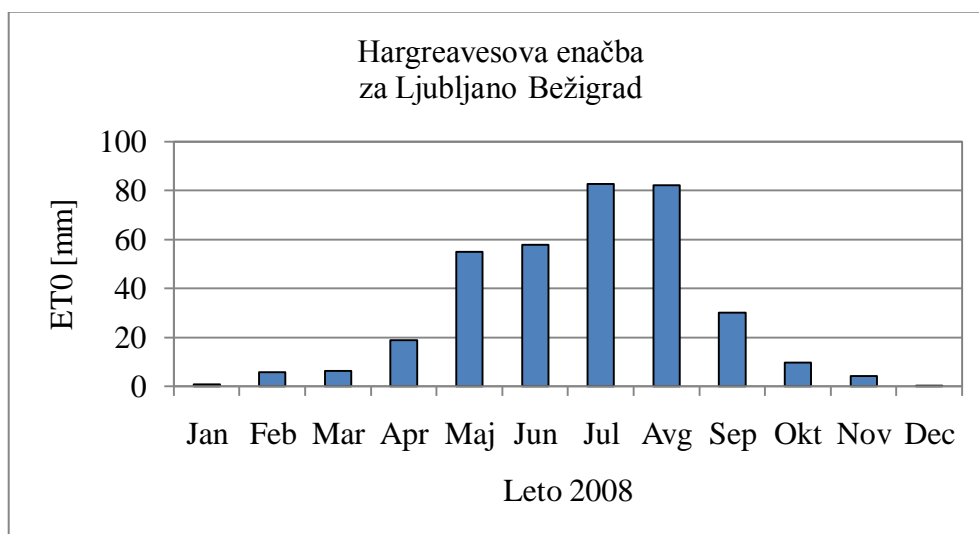
5.4.2 Hargreavesova enačba

Referenčno evapotranspiracijo, s pomočjo Hargreavesove enačbe, sem računala na dnevnem časovnem koraku. Potrebni vhodni podatki so dnevna maksimalna in minimalna temperatura in energija ekstraterestičnega sončnega sevanja (R_a). Dnevno maksimalno in minimalno temperaturo sem določila iz polurnih dnevnih podatkov temperatur, ki sem jih pridobila na ARSU. Povprečno dnevno temperaturo sem izračunala iz dnevne maksimalne in minimalne temperature. Energijo ekstraterestičnega sevanja (R_a) sem izračunala s pomočjo enačbe (42). Vse izračunane dnevne vrednosti sem preračunala tudi v mesečne, ki so prikazane v Preglednici 3. Hargreavesova enačba je podala najvišje vrednosti referenčne evapotranspiracije med vsemi enačbami. Najvišja vrednost evapotranspiracije se pojavi v Portorožu meseca julija (396,6 mm), najnižja (13,4 mm) pa decembra na Kredarici.

Preglednica 3: Mesečne vrednosti evapotranspiracije po Hargreavesovi enačbi

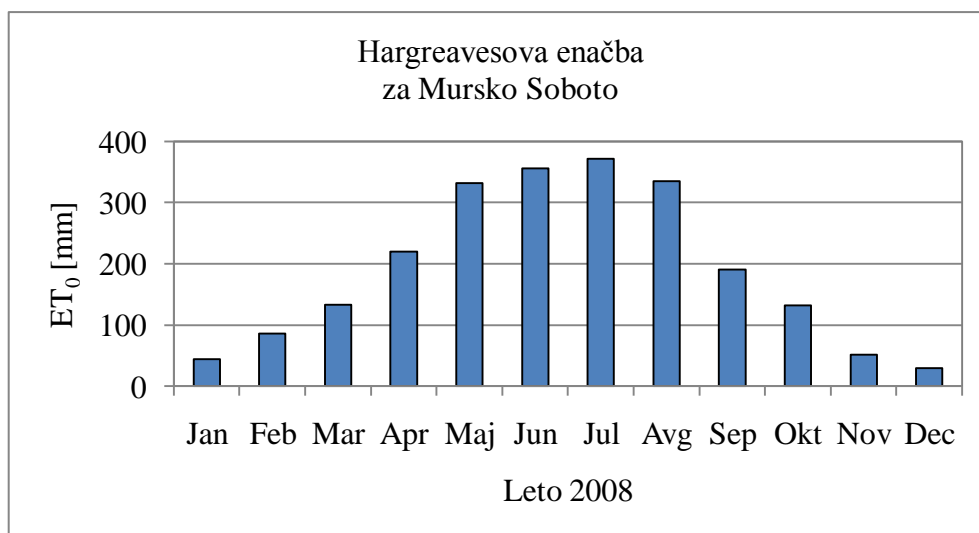
Postaja Mesec	ET ₀ [mm] za Ljubljano Bežigrad	ET ₀ [mm] za Mursko Soboto	ET ₀ [mm] za letališče Portorož	ET ₀ [mm] za Kredarico
Januar	37,5	44,1	52,6	22,2
Februar	82,3	85,8	79,5	32,1
Marec	125,8	133,4	142,9	44,3
April	204,7	219,8	212,3	60,4
Maj	313,5	331,8	325,4	103,5
Junij	342,1	355,3	361,8	130,0
Julij	373,9	371,2	396,6	141,0
Avgust	325,2	334,8	356,7	134,6
September	194,0	190,1	218,1	72,8
Oktober	124,1	131,6	143,8	54,4
November	49,5	51,2	68,6	24,7
December	23,8	29,0	48,1	13,4

V Ljubljani je vrednost referenčne evapotranspiracije dosegla najvišjo vrednost julija (373,9 mm), najnižja se pojavi v mesecu decembru (23,8 mm) (Slika 42).



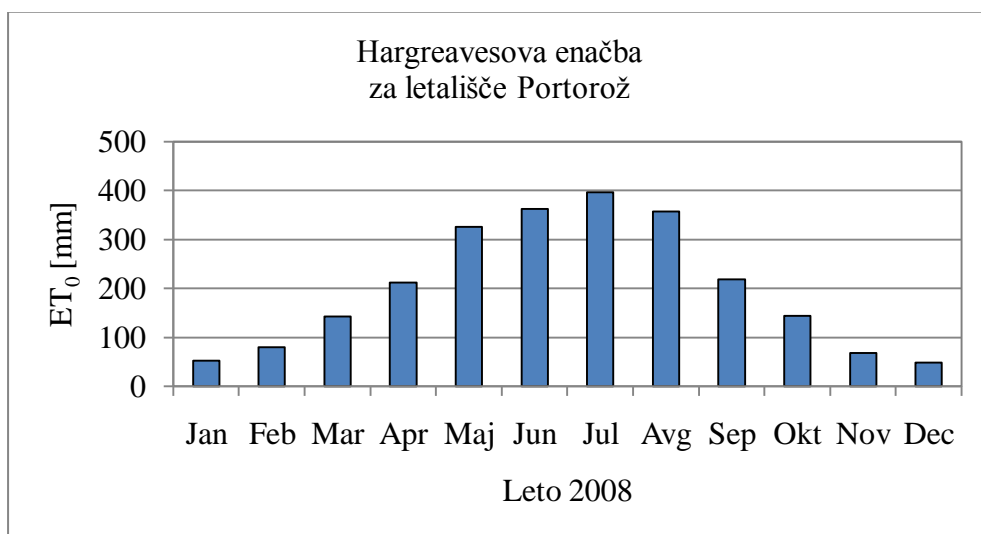
Slika 42: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Ljubljano po Hargreavesovi enačbi

Vrednost evapotranspiracije v Murski Soboti je najvišja v poletnih mesecih, vrh pa doseže meseca julija (371,2 mm). Najnižje vrednosti evapotranspiracije so v zimskih mesecih, v mesecu decembru vrednost znaša 29 mm (Slika 43).



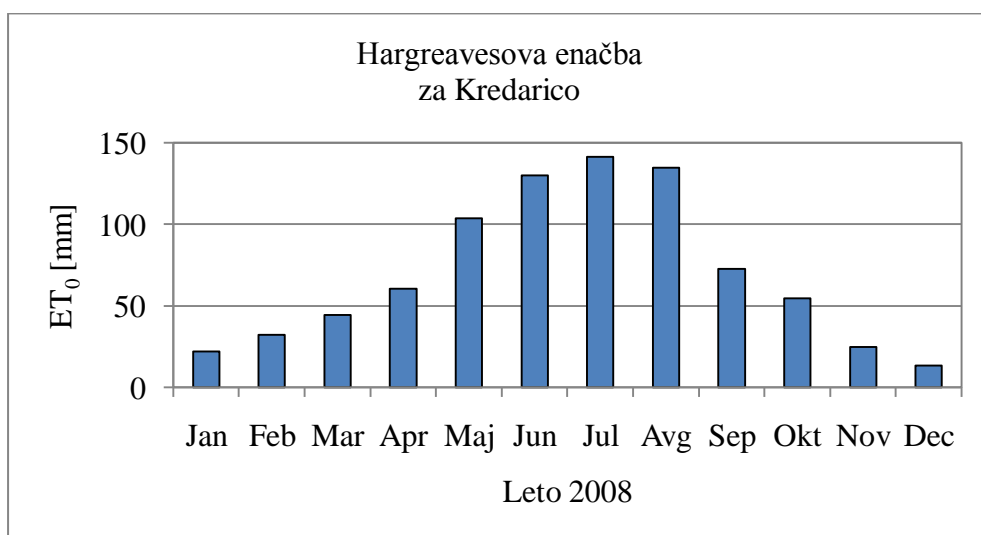
Slika 43: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Mursko Soboto po Hargreavesovi enačbi

Najvišje vrednosti evapotranspiracije po Hargreavesovi enačbi so med vsemi lokacijami prav v Portorožu. Njihova vrednost naraste v juliju do 396,9 mm, najnižja vrednost pa se pojavi v decembru, in sicer znaša 48,1 mm (Slika 44).



Slika 44: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Portorož po Hargreavesovi enačbi

Najnižje izračunane vrednosti evapotranspiracije po Hargreavesovi metodi se pojavijo na Kredarici. Med njimi se najvišja pojavi v juliju (141 mm), najnižja pa v decembru (13,4 mm) (Slika 45). Izračunana vrednost evapotranspiracije v decembru predstavlja tudi najnižjo vrednost evapotranspiracije med vsemi lokacijami po Hargreavesovi enačbi.



Slika 45: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Kredarico po Hargreavesovi enačbi

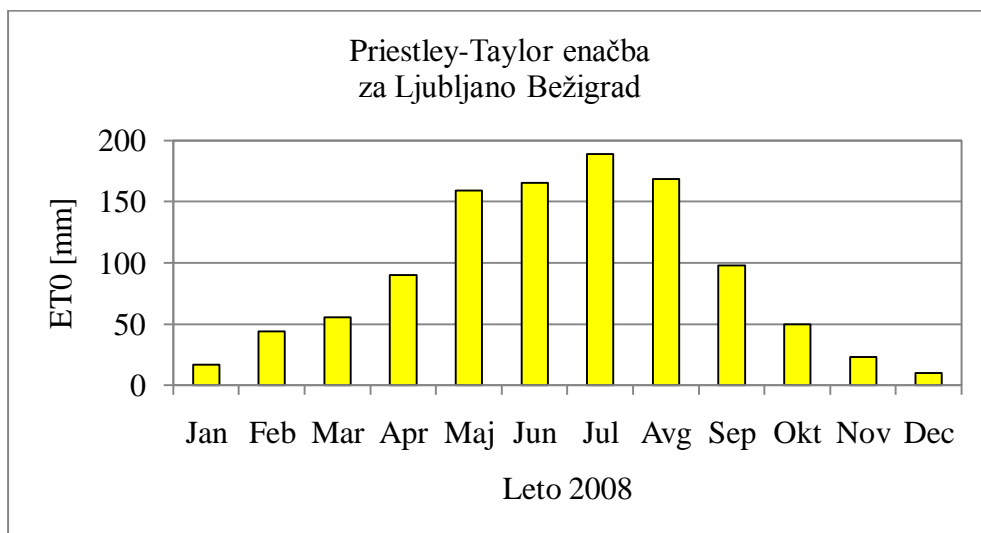
5.4.3 Priestley-Taylorjeva enačba

Priestley-Taylorjeva enačba spada med radiacijske metode. Poleg minimalne in maksimalne dnevne temperature enačba zahteva tudi dnevno količino energije neto sončnega sevanja (R_n). V račun so vključene tudi dnevne vrednosti psihrometrične konstante, latentne toplote uparjanja in naklon krivulje parnega tlaka. Prva je odvisna od povprečne dnevne vrednosti tlaka, drugi dve pa od povprečne dnevne temperature. Vsi vhodni podatki, ki sem jih uporabila za izračun evapotranspiracije po Priestley-Taylorjevi enačbi, so polurni. V nadaljevanju sem polurne vrednosti preračunala v dnevne in nadaljevala izračune na dnevnem koraku. Za prikaz rezultatov sem izračunane dnevne vrednosti evapotranspiracije seštela in izračunala mesečne vrednosti. Količino energije neto sončnega sevanja sem izračunala s pomočjo enačbe (47). Enačba je zahtevala tudi naklon krivulje parnega tlaka (Enačba 41), latentno toploto uparjanja (Enačba 16) in psihometrično konstanto (Enačba 35). Vse izračunane dnevne vrednosti evapotranspiracije sem preračunala tudi v mesečne in jih prikazala v Preglednici 4. Najvišja vrednost evapotranspiracije se pojavi julija v Portorožu (229,9 mm), najnižja vrednost pa decembra v Ljubljani (10,3 mm).

Preglednica 4: Mesečne vrednosti evapotranspiracije po Priestley-Taylorjevi enačbi

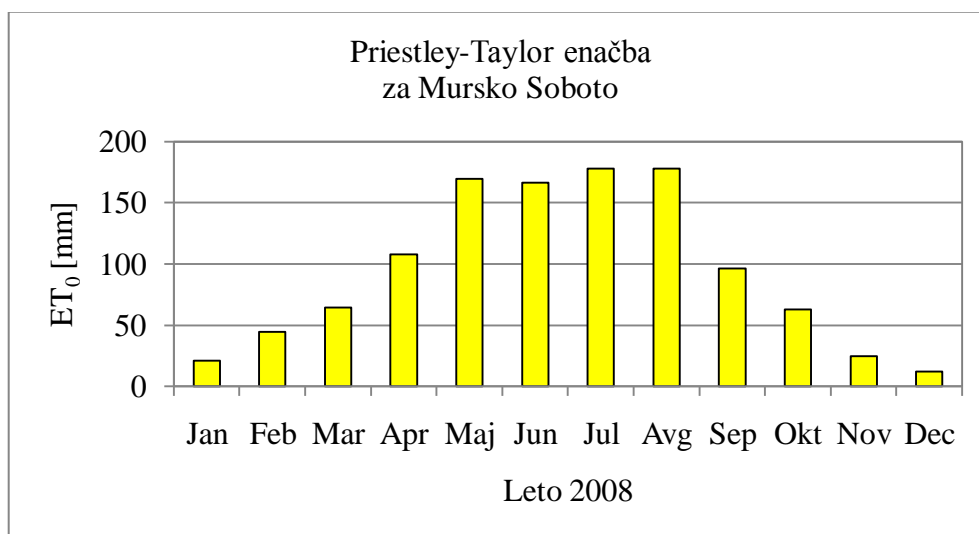
Postaja Mesec	ET ₀ [mm] za Ljubljano Bežigrad	ET ₀ [mm] za Mursko Soboto	ET ₀ [mm] za letališče Portorož	ET ₀ [mm] za Kredarico
Januar	17,0	21,1	22,9	28,8
Februar	43,8	44,5	43,6	49,8
Marec	55,3	64,4	73,0	56,7
April	90,3	107,7	112,7	73,5
Maj	159,1	169,6	175,9	124,4
Junij	165,3	166,2	194,2	108,8
Julij	188,7	178,1	229,9	115,6
Avgust	168,2	177,7	208,6	119,8
September	97,8	96,0	120,1	66,6
Oktober	50,0	62,7	71,8	60,2
November	23,0	24,6	32,2	30,7
December	10,3	11,9	23,7	20,1

Priestley-Taylorjeva enačba poda v Ljubljani najvišjo vrednost evapotranspiracije v mesecu juliju (188,7 mm), najnižjo pa v decembru (10,3 mm). Najvišje vrednosti evapotranspiracije so značilne v obdobju od maja do avgusta (Slika 46).



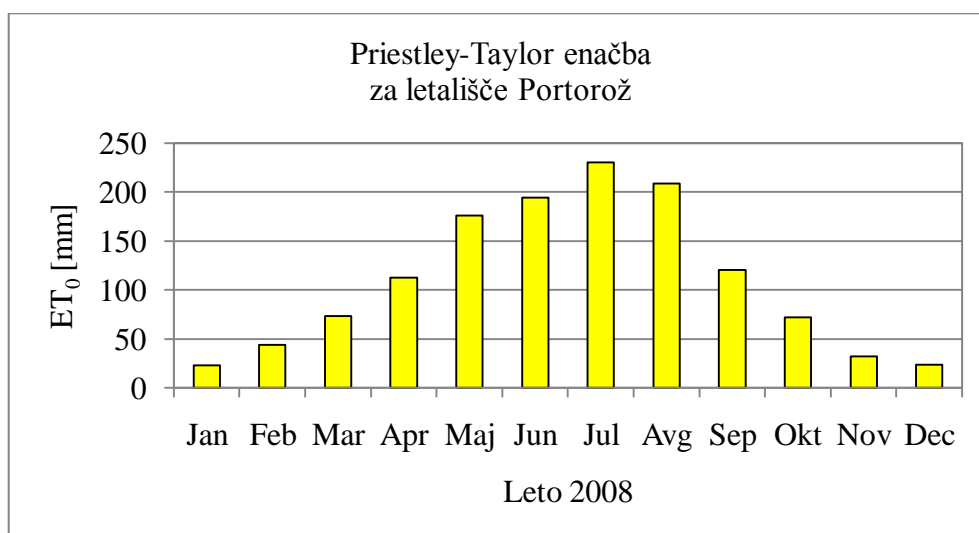
Slika 46: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Ljubljano po Priestley-Taylor enačbi

Tako kot v Ljubljani, je tudi v Murski Soboti opazna visoka vrednost evapotranspiracije v obdobju od maja do avgusta. Vrednosti evapotranspiracije so si v tem obdobju med seboj zelo podobne in se gibljejo okrog 170 mm. Najvišja vrednost evapotranspiracije nastopi julija (178,4 mm), najnižja vrednost pa je v mesecu decembru in znaša 11,9 mm (Slika 47).



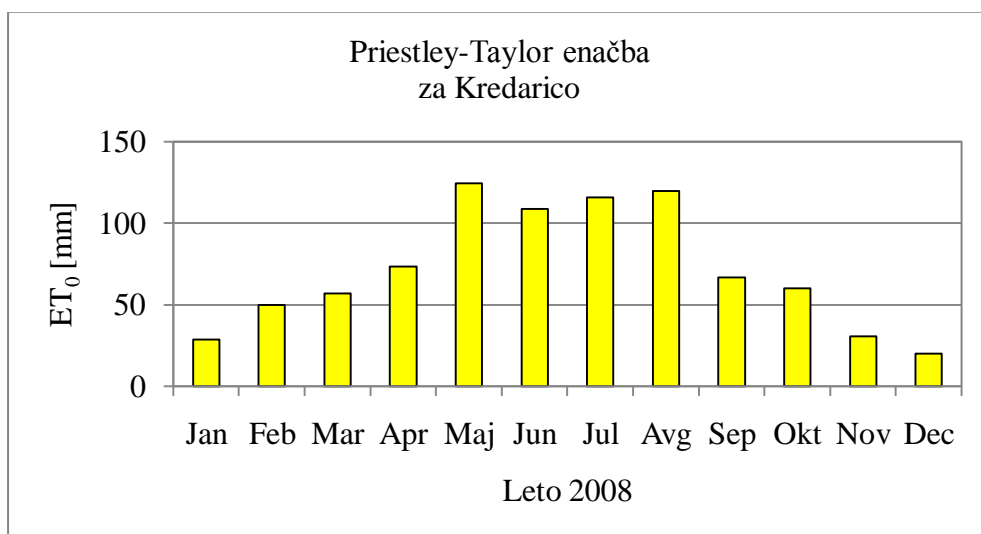
Slika 47: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Mursko Soboto po Priestley-Taylor enačbi

Najvišja izračunana vrednost evapotranspiracije, med vsemi lokacijami, se po Priestley-Taylorjevi enačbi pojavi v Portorožu. Vrh doseže v mesecu juliju, najnižjo vrednost pa, za razliko od drugih postaj, januarja (28,8 mm) (Slika 48).



Slika 48: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Portorož po Priestley-Taylor enačbi

Najnižje vrednosti evapotranspiracije se po Priestley-Taylorjevi enačbi pojavljajo na Kredarici. Najvišja vrednost nastopi avgusta (119,8 mm), najnižja vrednost pa decembra (20,1 mm) (Slika 49).



Slika 49: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Kredarico po Priestley-Taylor enačbi

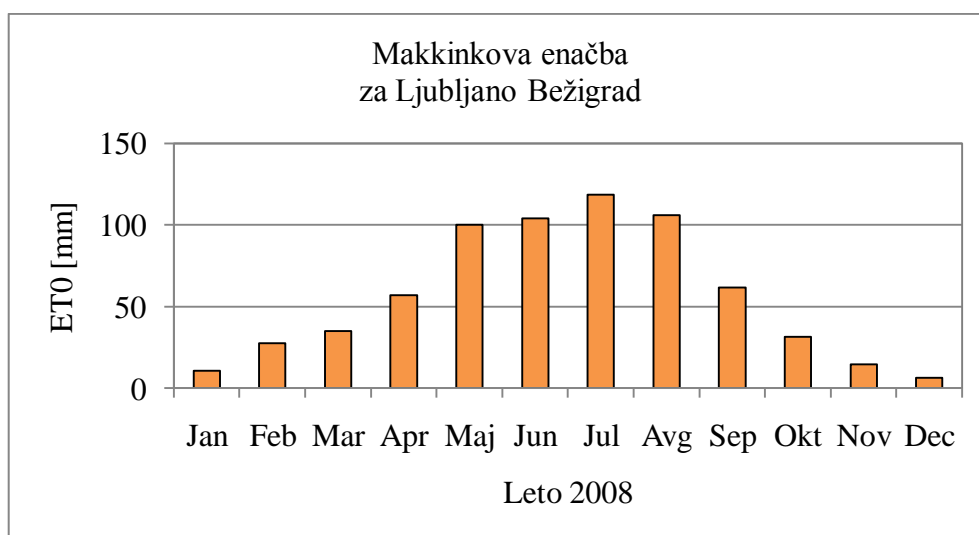
5.4.4 Makkinkova enačba

Radiacijska enačba Makkink ima vse spremenljivke v enačbi enake kot Priestley-Taylorjeva enačba. Edina razlika je, da Makkinkova enačba zahteva podatek za energijo kratkovalovnega sončnega sevanja (R_s). Kratkovalovno sončno sevanje se meri na vseh obravnavanih meteoroloških postajah. Polurne podatke za omenjeno sevanje sem pridobila na ARSU. Izračunane dnevne vrednosti evapotranspiracije sem pretvorila v mesečne in jih prikazala v Preglednici 5. Iz nje je razvidna najvišja mesečna vrednost evapotranspiracije, ki je bila julija v Portorožu (165,9 mm), in najnižja vrednost, ki pa je bila decembra v Ljubljani (6,4 mm).

Preglednica 5: Mesečne vrednosti evapotranspiracije po Makkinkovi enačbi

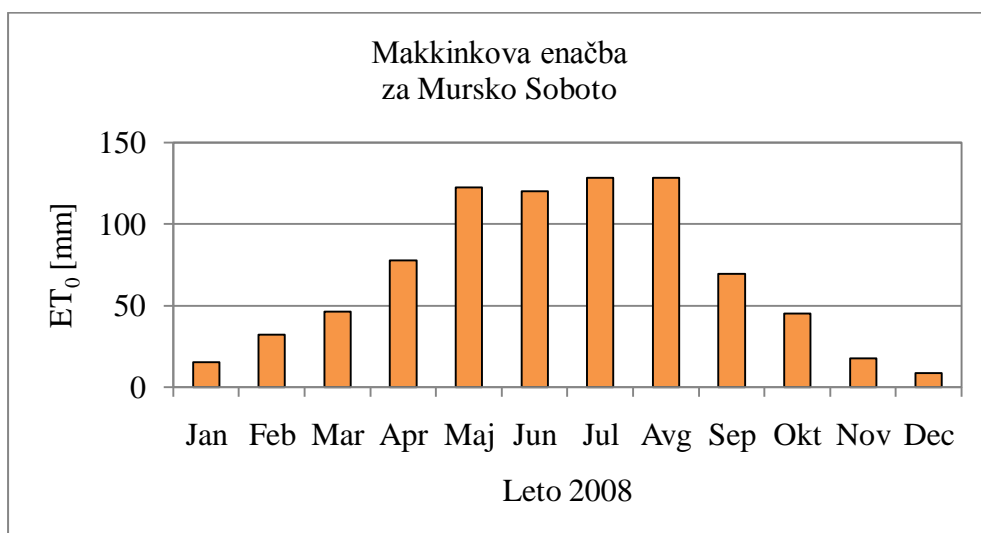
Postaja Mesec	ET ₀ [mm] za Ljubljano Bežigrad	ET ₀ [mm] za Mursko Soboto	ET ₀ [mm] za letališče Portorož	ET ₀ [mm] za Kredarico
Januar	10,7	15,2	16,6	20,8
Februar	27,5	32,1	31,5	35,9
Marec	34,8	46,5	52,7	40,9
April	56,8	77,7	81,3	53,0
Maj	100,1	122,4	126,9	89,7
Junij	103,9	119,9	140,1	78,5
Julij	118,7	128,5	165,9	83,4
Avgust	105,8	128,2	150,5	86,4
September	61,5	69,3	86,7	48,0
Oktober	31,4	45,2	51,8	43,4
November	14,5	17,7	23,2	22,2
December	6,4	8,6	17,1	14,5

V Ljubljani se v poletnih mesecih količina evapotranspiracije giblje okrog 100 mm. V mesecu juliju je količina evapotranspiracije najvišja, njen vrh doseže vrednost 128,5 mm. Najnižja vrednost se pojavi v decembru, in sicer 6,4 mm (Slika 50).



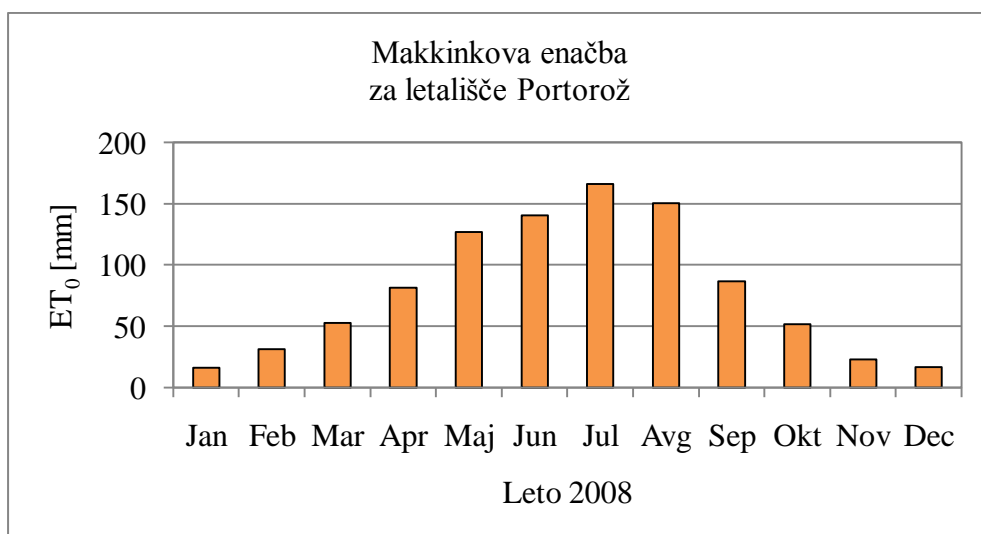
Slika 50: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Ljubljano po Makkinkovi enačbi

Najnižja vrednost evapotranspiracije je, tako kot v Ljubljani, tudi v Murski Soboti v decembru (8,6 mm). Najvišja vrednost je v juliju in avgustu in se giblje okrog 128 mm (Slika 51).



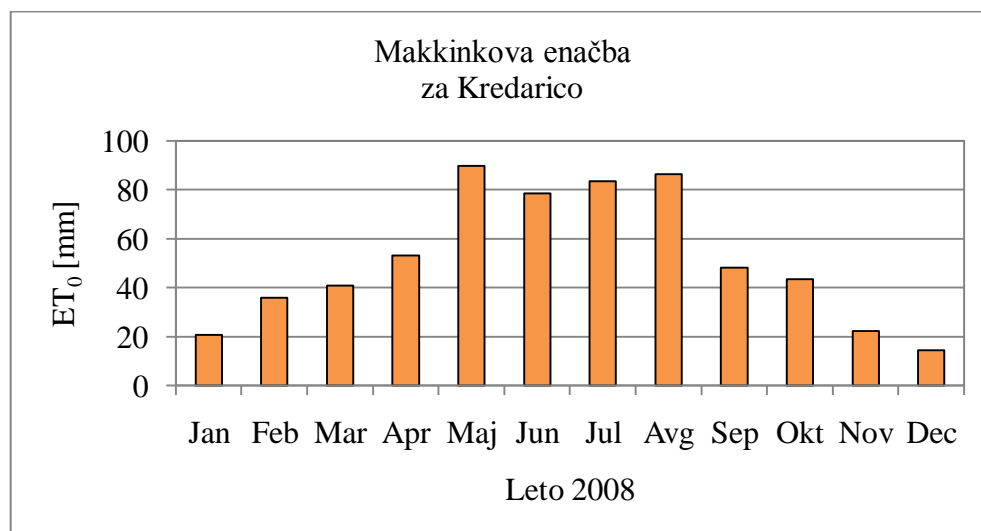
Slika 51: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Mursko Soboto po Makkinkovi enačbi

V Portorožu je tudi po Makkinkovi enačbi količina evapotranspiracije, v primerjavi z ostalimi postajami, skozi celo leto najvišja. Vrh doseže v juliju (165,9 mm), minimum pa v decembru (14,5 mm) (Slika 52).



Slika 52: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Portorož po Makkinkovi enačbi

Na Kredarici se pojavi najvišja vrednost evapotranspiracije v mesecu maju (89,7 mm), najnižja pa v decembru, in sicer znaša 14,5 mm (Slika 53).



Slika 53: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Kredarico po Makkinkovi enačbi

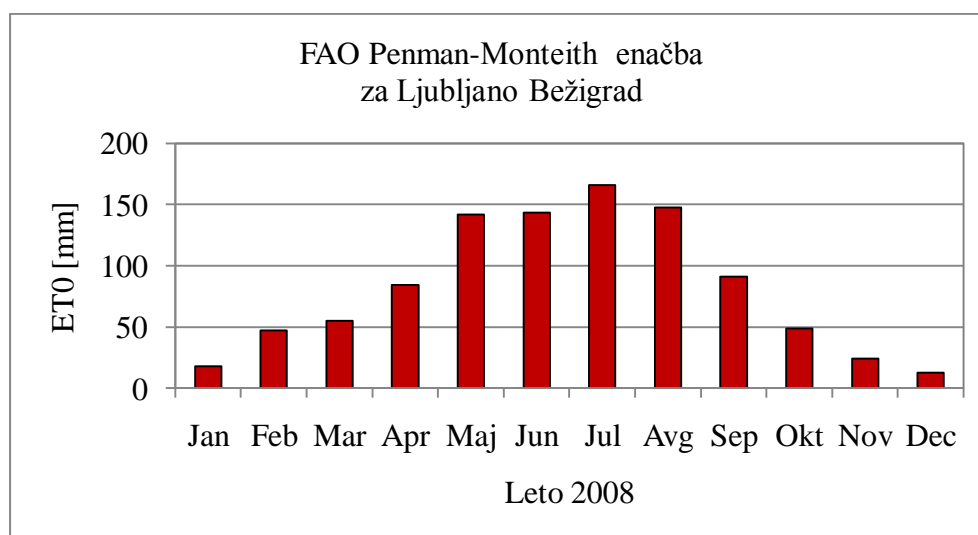
5.4.5 FAO Penman-Monteith enačba

Kombinirana enačba FAO Penman-Monteith je enačba, ki zahteva največ podatkov. Vsi uporabljeni podatki imajo časovni korak pol ure in so bili pridobljeni na ARSU. Iz polurnih podatkov sem izračunala njihove dnevne vrednosti. S pomočjo dnevnih vrednosti podatkov sem izračunala dnevno vrednost referenčne evapotranspiracije po opisanih lokacijah. Za prikaz rezultatov sem iz dnevnih izračunov evapotranspiracije izračunala še mesečno vrednost evapotranspiracije (Preglednica 6). Potrebni vhodni podatki za enačbo so: maksimalna in minimalna dnevna temperatura, maksimalna in minimalna dnevna vrednost relativne vlažnosti, povprečna dnevna hitrost vetra, povprečna dnevna vrednost pritiska in dnevna vrednost energije neto sončnega sevanja. Za izračun energije sončnega sevanja so potrebni še podatki o nadmorski višini, zemljepisni širini in zaporedno število dneva v letu. Vse ostale spremenljivke v enačbi se izračunajo s pomočjo naštetih vhodnih podatkov. Maksimalna vrednost evapotranspiracije (222,2 mm) se po FAO Penman-Monteith enačbi pojavi julija v Portorožu, minimalna pa decembra v Ljubljani (12,4 mm).

Preglednica 6: Mesečne vrednosti evapotranspiracije po FAO Penman-Monteithovi enačbi

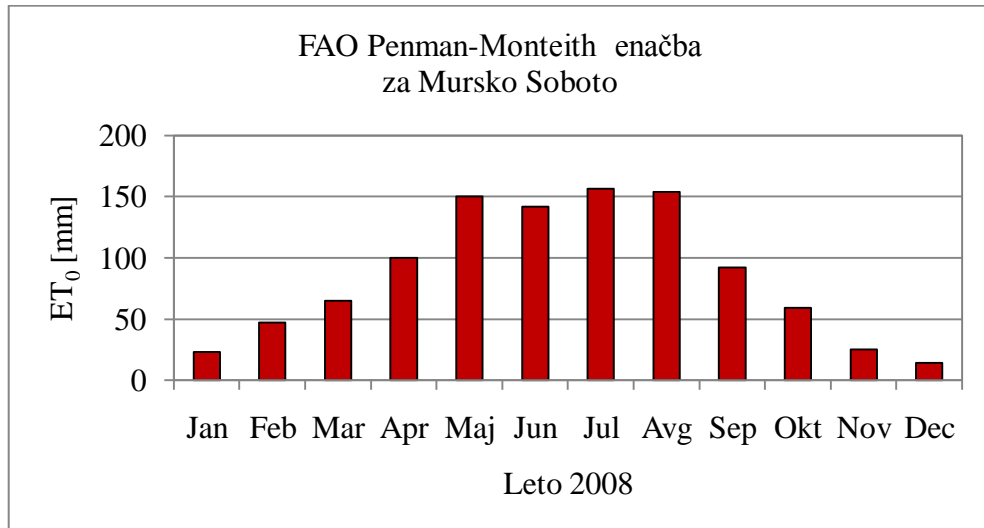
Postaja Mesec	ET ₀ [mm] za Ljubljano Bežigrad	ET ₀ [mm] za Mursko Soboto	ET ₀ [mm] za letališče Portorož	ET ₀ [mm] za Kredarico
Januar	17,9	23,1	34,6	44,5
Februar	47,2	47,1	53,4	52,0
Marec	54,8	64,9	80,4	39,7
April	84,2	99,8	112,1	42,5
Maj	141,8	149,9	166,8	83,5
Junij	143,3	141,7	176,3	80,3
Julij	166,1	156,5	222,2	80,6
Avgust	147,3	153,9	210,9	84,0
September	91,2	92,1	139,7	46,6
Oktober	48,8	59,0	95,4	52,3
November	24,4	25,0	49,8	35,6
December	12,4	14,0	40,2	20,0

V Ljubljani pride do maksimalne vrednosti izhlapevanja v juliju (166,1 mm). V ostalih poletnih mesecih se ta giblje okrog 150 mm. Minimalna vrednost evapotranspiracije je v decembru, in sicer znaša 12,4 mm (Slika 54).



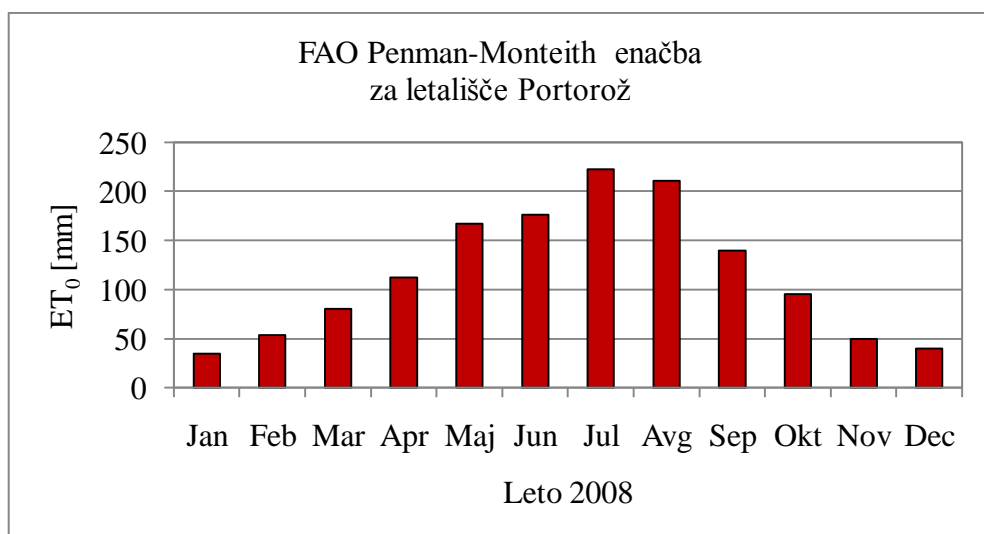
Slika 54: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Ljubljano po FAO Penman-Monteith enačbi

Za Mursko Soboto sem izračunala, da se vrednost evapotranspiracije poleti giblje okrog 150 mm, z vrhom v juliju (156,5 mm). V januarju in decembru je količina evapotranspiracije najnižja. Decembra doseže minimum (14 mm) (Slika 55).



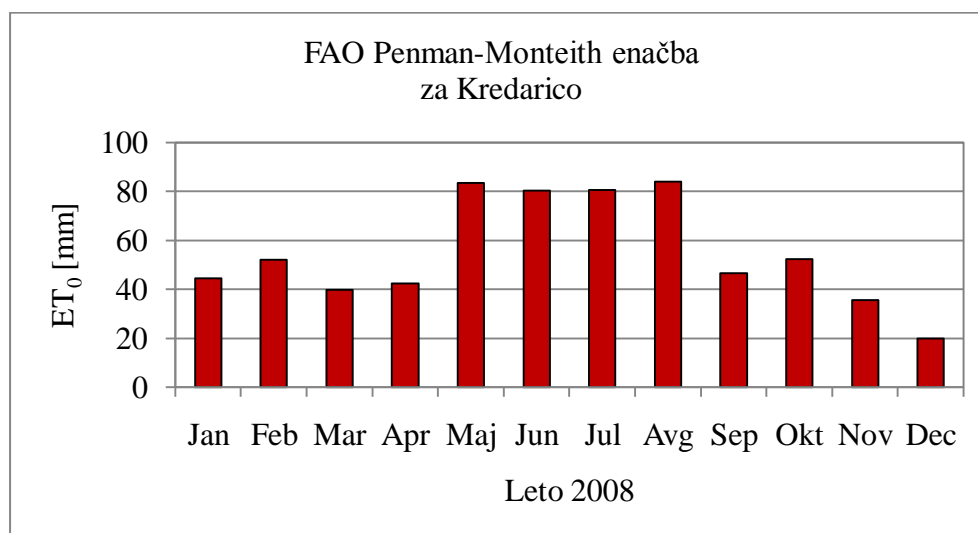
Slika 55: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Mursko Soboto po FAO Penman-Monteith enačbi

V Portorožu se pojavijo najvišje vrednosti evapotranspiracije. Le-te se gibljejo vse od maksimuma 222,2 mm v juliju, pa do minimuma 34,6 mm v januarju (Slika 56).



Slika 56: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Portorož po FAO Penman-Monteith enačbi

Na Kredarici je količina evapotranspiracije v poletnih mesecih približno enaka in se giblje okrog 80 mm. Najvišje vrednosti se pojavijo v maju (83,5 mm) in avgustu (84 mm). Najnižja vrednost se pojavi decembra, ko vrednost znaša 20 mm (Slika 57).



Slika 57: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Kredarico po FAO Penman-Monteith enačbi

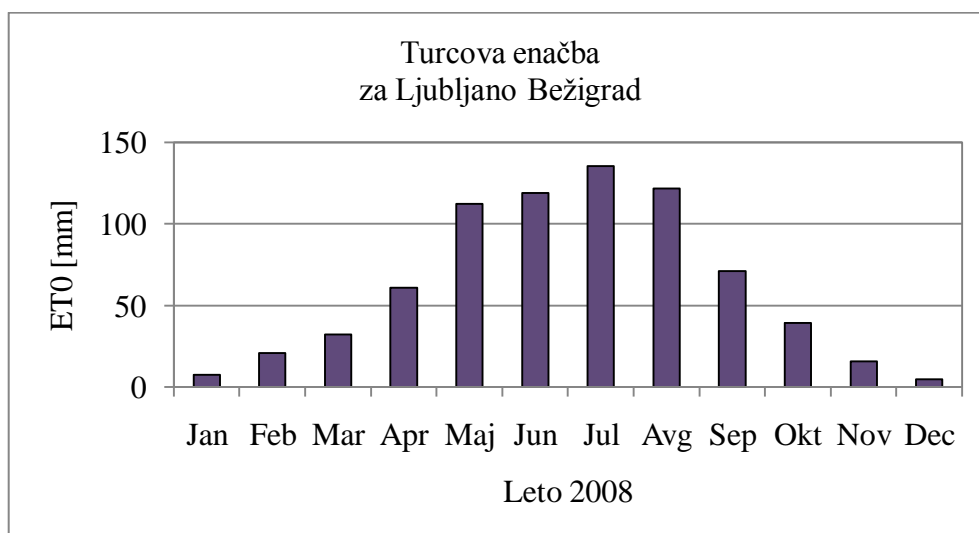
5.4.6 Turcova enačba

Potrebni vhodni podatki za Turcovo enačbo so: maksimalna in minimalna dnevna temperatura in energija kratkovalovnega sončnega sevanja (R_s). Vse tri vhodne podatke sem pridobila na ARSU, in sicer njihove polurne vrednosti. Iz polurnih vrednosti sem izračunala dnevne vrednosti in iz dnevni vrednosti mesečno količino referenčne evapotranspiracije. Turcova enačba se je izkazala za neuporabno pri dnevih, kjer je srednja dnevna temperatura nižja od 0 °C. V takšnem primeru je izračun referenčne evapotranspiracije negativen. Za prikaz spodnjih rezultatov sem vse dnevne vrednosti, kjer je bila evapotranspiracija negativna, spremenila v 0. Mesečne vrednosti evapotranspiracije pa sem dobila z vsoto dnevni vrednosti. Preglednica 7 in grafi v nadaljevanju, zaradi težav z negativnimi vrednostmi, niso primerni za natančno, ampak samo za splošno primerjavo. Minimalna vrednost evapotranspiracije (0 mm) se pojavi decembra na Kredarici, maksimalna (164,3 mm) pa julija v Portorožu.

Preglednica 7: Mesečne vrednosti evapotranspiracije po Turcovi enačbi

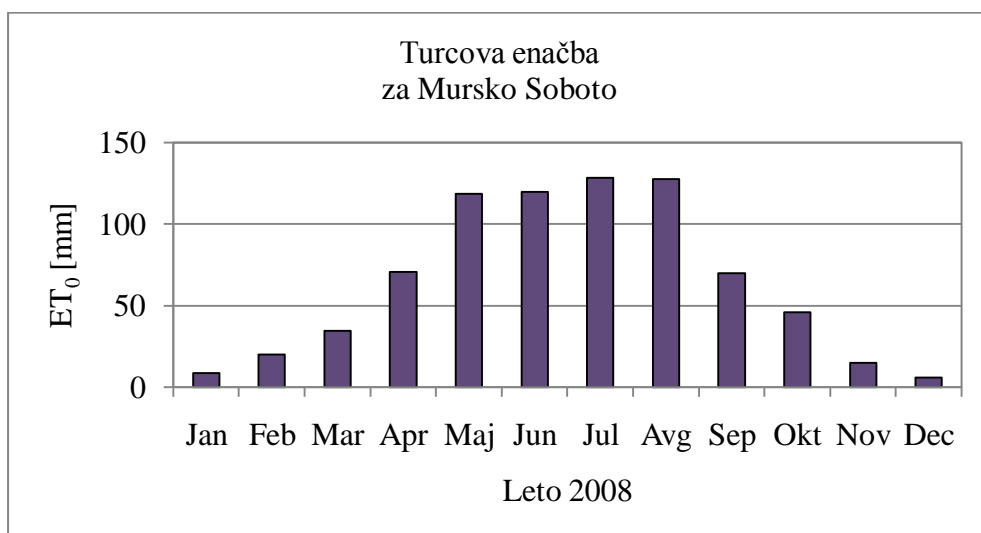
Postaja Mesec	ET ₀ [mm] za Ljubljano Bežigrad	ET ₀ [mm] za Mursko Soboto	ET ₀ [mm] za letališče Portorož	ET ₀ [mm] za Kredarico
Januar	7,7	8,6	16,7	1,0
Februar	21,0	20,0	23,2	2,3
Marec	32,0	34,6	47,4	0,4
April	60,8	70,8	78,3	0,0
Maj	112,0	118,5	125,2	27,0
Junij	119,0	119,6	139,6	48,5
Julij	135,1	128,3	164,3	54,4
Avgust	121,6	127,7	150,2	57,9
September	71,2	69,9	88,4	20,6
Oktober	39,1	45,9	56,1	19,0
November	15,8	15,1	25,2	3,2
December	4,7	6,0	15,7	0,0

V Ljubljani so izračuni referenčne evapotranspiracije pokazali najvišjo vrednost v juliju (135,1 mm), najnižjo pa v decembru (4,7 mm) (Slika 58).



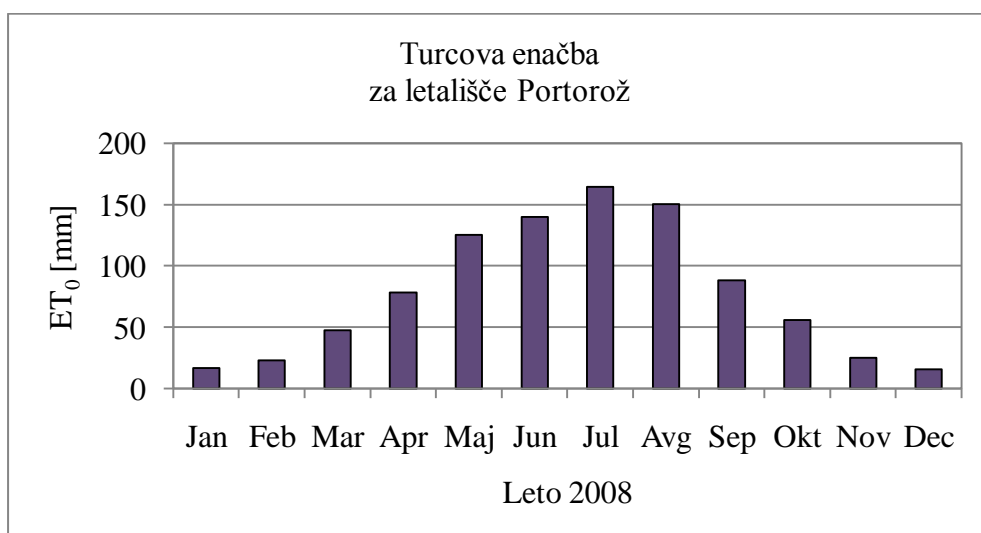
Slika 58: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Ljubljano po Turcovi enačbi

V Murski Soboti se vrednosti evapotranspiracije gibljejo okrog 199 mm v maju in juniju. V januarju in decembru pa okrog 5 mm. Količina evapotranspiracije doseže vrh v juliju (128,3 mm), minimalna vrednost se pojavi v decembru (6 mm) (Slika 59).



Slika 59: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Mursko Soboto po Turcovi enačbi

V Portorožu se vrednosti evapotranspiracije gibljejo od 15,7 mm v decembru, pa vse do 128,3 mm v juliju (Slika 60).



Slika 60: Vrednost referenčne evapotranspiracije za Portorož po Turcovi enačbi

Za Kredarico so rezultati izračuna referenčne evapotranspiracije prikazani v Preglednici 7. Za to območje so značilne nizke temperature, ki običajno padejo precej pod ledišče. Ker Turcova enačba poda negativne vrednosti dnevne evapotranspiracije pri povprečnih dnevnihih temperaturah, ki so nižje od 0°C, so izračuni za Kredarico neveljavni. Pri izračunu dnevnihih vrednosti evapotranspiracije je bil vpliv negativne vrednosti temperature zelo visok. Pri vsoti dnevnihih količin evapotranspiracije je prišlo tudi do primera, kjer je mesečna količina evapotranspiracije 0 mm. To je razvidno v Preglednici 7, in sicer za mesec april in december.

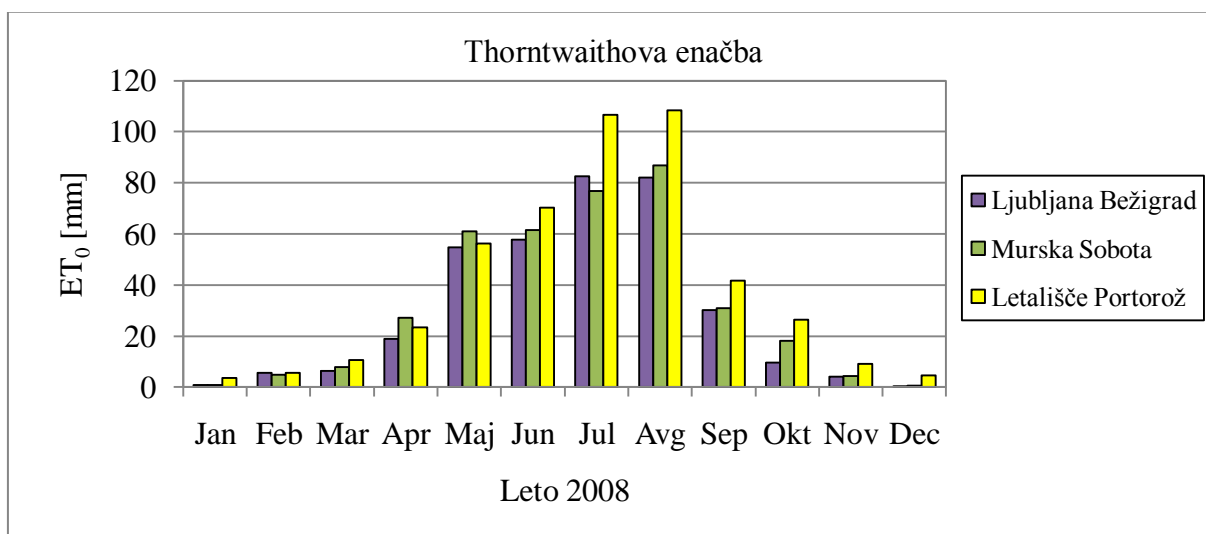
6 PRIMERJAVA REZULTATOV IN ANALIZA

6.1 Primerjava rezultatov po meteoroloških postajah

Izračun referenčne evapotranspiracije sem izvedla na dnevnem časovnem koraku. Rezultati so prikazani na mesečnem časovnem koraku za leto 2008, za vse štiri meteorološke postaje (Ljubljana, Murska Sobota, Portorož in Kredarica), po šestih različnih metodah. Ker izbrane postaje pripadajo različnim tipom podnebja in so postavljene na različnih nadmorskih višinah, je seveda primerjava med njimi smiselna, na kar kažejo tako vhodni podatki, kot tudi rezultati.

6.1.1 Thorntwaithova enačba

Thorntwaithova enačba zahteva dva osnovna podatka. To sta srednja mesečna temperatura in povprečno mesečno število ur sončnega sevanja. Rezultati (Slika 61) niso prikazani za Kredarico, saj izračun referenčne evapotranspiracije, zaradi negativnih vrednosti povprečne mesečne temperature, po tej metodi ni bil mogoč. Najvišje vrednosti količine evapotranspiracije, v primerjavi z vsemi postajami, so se pojavile v Portorožu. Razlog za takšne rezultate je v višjih povprečnih mesečnih temperaturah in večjem številu ur sončnega sevanja. Na vseh postajah je bila najvišja vrednost evapotranspiracije v poletnih mesecih (julij in avgust), najnižja pa v zimskih (januar in december). Maksimum (108,4 mm) količine evapotranspiracije nastopi julija v Portorožu, minimum (0,4 mm) decembra v Ljubljani. Skoraj brez evapotranspiracije sta bila meseca januar in december v Murski Soboti in Ljubljani. Količina evapotranspiracije je v vseh mesecih najvišja v Portorožu, z izjemo meseca aprila in maja. V teh dveh mesecih se pojavi maksimum v Murski Soboti. Med primerjanimi lokacijami sta si po količini evapotranspiracije najbolj podobni Ljubljana in Murska Sobota. Na teh dveh lokacijah imajo vrednosti povprečne mesečne temperature in mesečnega števila ur sončnega sevanja zelo podobne vrednosti. V Ljubljani je evapotranspiracija v vseh mesecih nekoliko nižja kot v Murski Soboti, razen v februarju in juliju.

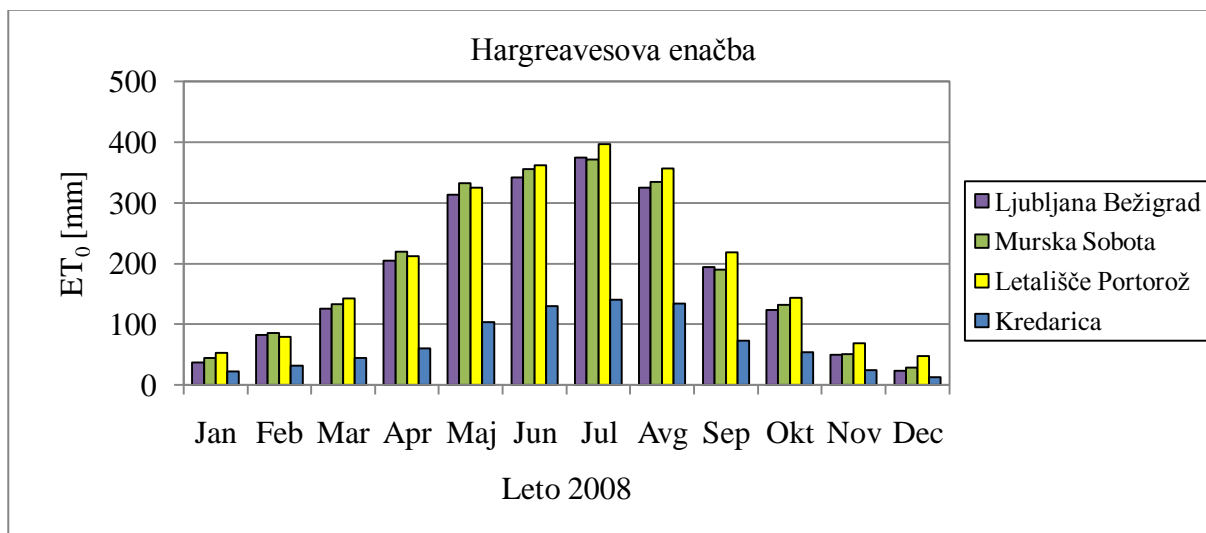


Slika 61: Primerjava količine referenčne evapotranspiracije po Thorntwaithovi enačbi za izbrane lokacije

6.1.2 Hargreavesova enačba

Referenčna vrednost evapotranspiracije je v Hargreavesovi enačbi odvisna od dnevne maksimalne in minimalne temperature ter dnevne energije ekstraterestičnega sončnega sevanja. Na Sliki 62 so prikazane mesečne vrednosti evapotranspiracije po lokacijah, ki so vsota dnevni vrednosti evapotranspiracije. Najvišje vrednosti evapotranspiracije so v Portorožu, z izjemo februarja, marca, aprila in maja. V teh mesecih je bila najvišja evapotranspiracija v Murski Soboti. Vzrok za takšne rezultate je v višji povprečni dnevni temperaturi (izračuna se iz povprečja maksimalne in minimalne dnevne temperature), saj je energija ekstraterestičnega sevanja glede na lokacije zelo podobna. V obdobju, kjer ima Murska Sobota najvišje vrednosti evapotranspiracije, je njena povprečna dnevna temperatura najvišja. Enako velja za Portorož v obdobju, ko je količina evapotranspiracije za to območje najvišja. Maksimum (396,9 mm) doseže evapotranspiracija julija v Portorožu, minimum (13,4 mm) pa na Kredarici v decembru. Od vseh vrednosti evapotranspiracije najbolj odstopajo vrednosti na Kredarici. Le-te so vidno nižje od ostalih skozi celo leto. Takšni rezultati so bili seveda pričakovani, saj Kredarica leži na nadmorski višini 2514 m in ima zato precej nižje temperature in energijo sončnega sevanja od ostalih postaj. Zelo podobna količina referenčne evapotranspiracije je skozi celo leto na območju Murske Sobote in Ljubljane. Na teh dveh lokacijah je energija ekstraterestičnega sevanja zelo podobna, podobne pa so tudi vrednosti

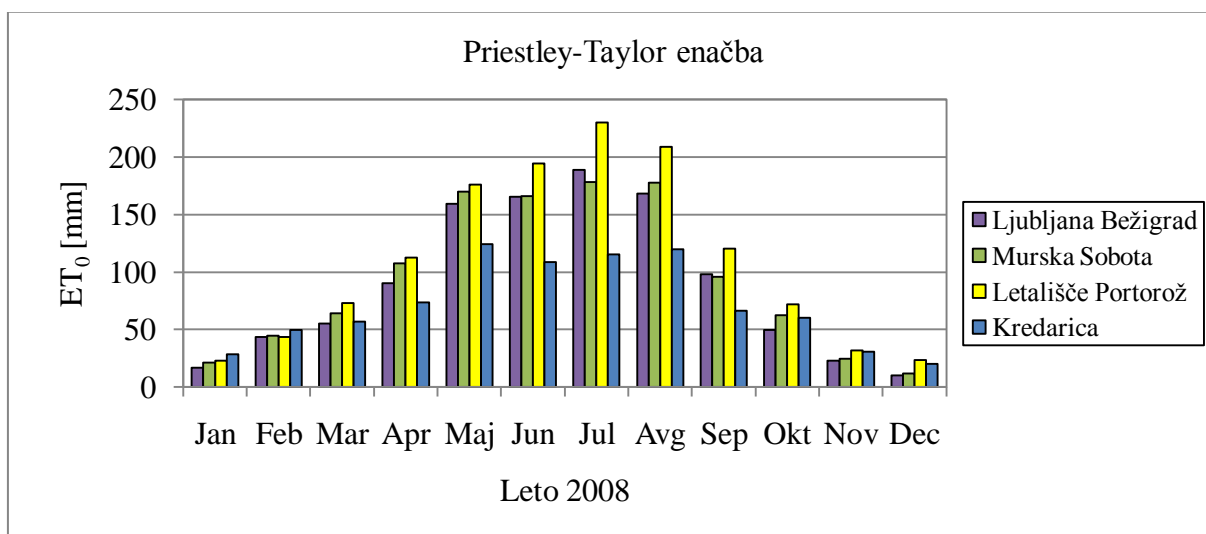
povprečne dnevne temperature. Največja razlika v količini evapotranspiracije med postajama se pojavi v mesecu maju. V Ljubljani je količina evapotranspiracije 313,5 mm, v Murski Soboti pa 331,8 mm. Tudi v tem primeru je vzrok za višje vrednosti evapotranspiracije v Murski Soboti višja vrednost povprečne dnevne temperature.



Slika 62: Primerjava količine referenčne evapotranspiracije po Hargreavesovi enačbi za izbrane lokacije

6.1.3 Priestley-Taylorjeva enačba

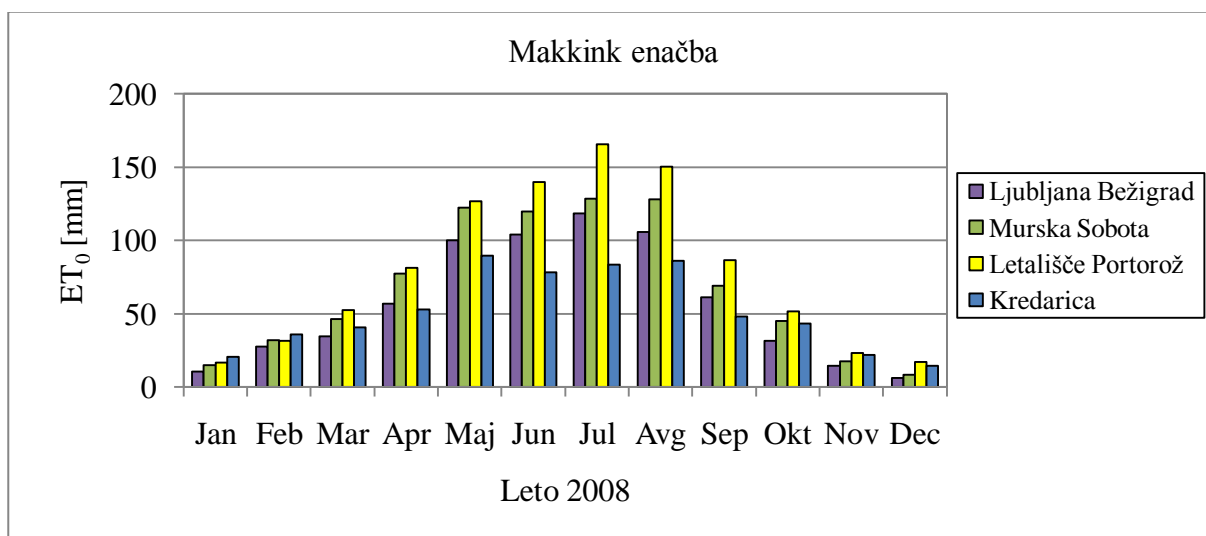
Spremenljivke, ki vplivajo na izračune evapotranspiracije po Priestley-Taylorjevi enačbi, so minimalna in maksimalna dnevna temperatura in količina energije dnevnega neto sevanja. Za izračun psihrometrične konstante je zahtevana tudi povprečna dnevna vrednost tlaka. Izračune dnevne vrednosti evapotranspiracije sem izrazila v mesečni vrednosti in jih prikazala na Sliki 63. Absolutni maksimum (229,9 mm) nastopi julija v Portorožu, absolutni minimum (10,3 mm) decembra v Ljubljani. Najvišje vrednosti evapotranspiracije so bile skozi celo leto v Portorožu, z izjemo januarja in februarja, kjer so najvišje vrednosti na Kredarici. V teh dveh mesecih so na Kredarici vrednosti povprečne dnevne temperature najnižje, vrednosti energije neto sevanja pa najvišje.



Slika 63: Primerjava količine referenčne evapotranspiracije po Priestley-Taylorjevi enačbi za izbrane lokacije

6.1.4 Makkinkova enačba

Rezultati izračuna referenčne evapotranspiracije so v primeru uporabe Makkinkove enačbe, kot v primeru Priestley-Taylorjeve enačbe, odvisni od enakih vhodnih podatkov (dnevna minimalna in maksimalna temperatura in povprečen dnevni tlak). Razlika med njima je samo ta, da je evapotranspiracija v primeru Makkinkove enačbe odvisna od povprečne dnevne vrednosti kratkovalovnega sončnega sevanja. Mesečne vrednosti evapotranspiracije, glede na izbrano lokacijo, so prikazane na Sliki 64. V splošnem so se skozi celo leto pojavljale najvišje vrednosti evapotranspiracije v Portorožu, najnižje pa na Kredarici. Maksimum (165,9 mm) je meseca julija v Portorožu, minimum (6,4 mm) decembra v Ljubljani. V poletnih mesecih so vrednosti evapotranspiracije na Kredarici precej nižje od evapotranspiracije na ostalih lokacijah. Kredarica prav v poletnih mesecih izstopa po najnižjih temperaturah in najnižjih vrednostih energije kratkovalovnega sončnega sevanja. Pozimi so si te vrednosti precej blizu in se gibljejo v januarju od 10,7 mm (Ljubljana) do 20,8 mm (Kredarica). Razlika med količino energije kratkovalovnega sevanja je med lokacijami precej manjša. Največ energije kratkovalovnega sevanja ima Kredarica, najmanj pa Ljubljana, kar se odraža tudi v količini evapotranspiracije. V decembru ima najvišjo povprečno temperaturo in energijo kratkovalovnega sevanja Portorož, kar povzroči tudi najvišjo količino evapotranspiracije.

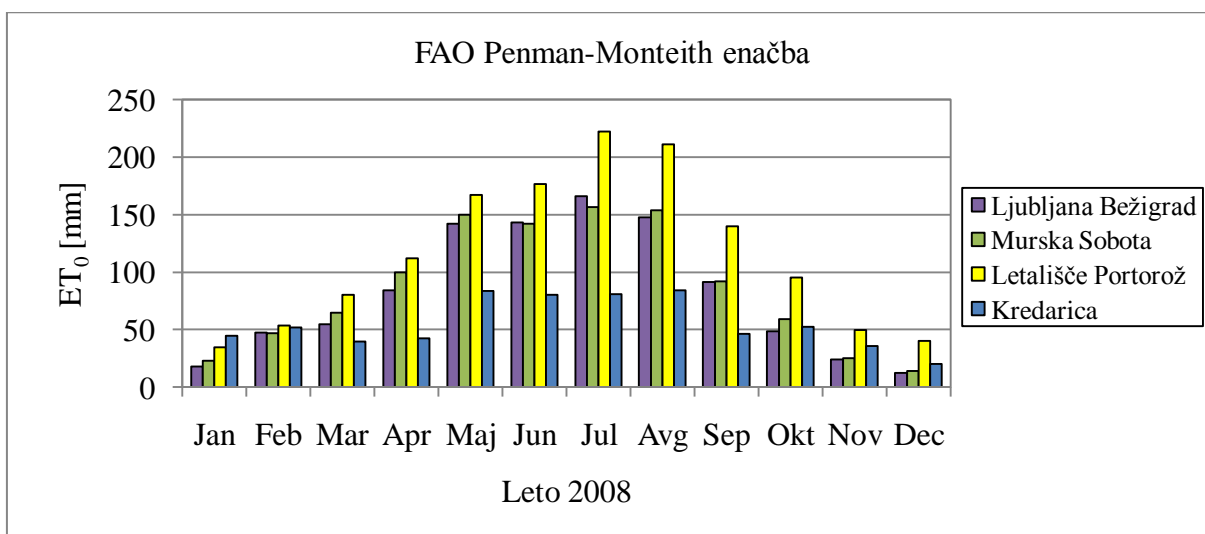


Slika 64: Primerjava količine referenčne evapotranspiracije po Makkinkovi enačbi za izbrane lokacije

6.1.5 FAO Penman-Monteithova enačba

Količina referenčne evapotranspiracije je po FAO Penman-Monteith enačbi odvisna od največ spremenljivk med vsemi enačbami. Odvisna je od maksimalne in minimalne dnevne temperature, maksimalne in minimalne relativne vlage, povprečne dnevne hitrosti vetra, povprečnega dnevnega tlaka in povprečne dnevne vrednosti energije neto sončnega sevanja. Na energijo neto sončnega sevanja, hkrati pa tudi na količino evapotranspiracije, vpliva nadmorska višina, zemljepisna širina in zaporedna številka dneva v letu. Vpliv vseh naštetih spremenljivk na količino evapotranspiracije po omenjeni metodi, je prikazan na Sliki 65. Čez celo leto so si količine evapotranspiracije v Murski Soboti in Ljubljani zelo podobne. Na obeh lokacijah je povprečna mesečna temperatura zelo podobna in se razlikuje za največ 2°C, podobne pa so si tudi ostale spremenljivke, ki so potrebne za izračun referenčne evapotranspiracije. Vzrok za podobnost podatkov je v lokaciji in celinskemu podnebju, v katerem ležita oba kraja. Najbolj izstopajo visoke vrednosti evapotranspiracije v Portorožu, kjer dosežejo maksimum v juliju (222,2 mm). Zaradi sredozemskega podnebja ima Portorož skozi celo leto najvišje povprečne mesečne temperature. Poleg najvišje povprečne temperature v juliju (21,6 °C), ima tudi zelo visoko povprečno mesečno hitrost vetra (2,4 m/s) v primerjavi z Mursko Soboto (1,02 m/s) in Ljubljano (0,75 m/s). Temperatura, hitrost vetra in energija neto sončnega sevanja imajo julija v Portorožu maksimalno vrednost. Te vrednosti

so vzrok za maksimalno evapotranspiracijo. Najnižje vrednosti evapotranspiracije se pojavljajo na Kredarici, predvsem v toplejšem delu leta. Poleti so na tej lokaciji povprečne mesečne temperature in vrednosti energije neto sončnega sevanja najnižje. Najvišje pa so povprečne mesečne vrednosti relativne vlage. Zanimivo je, da se v januarju prav na Kredarici pojavi najvišja vrednost evapotranspiracije (44,5 mm). Vzrok za takšno stanje je v najvišji mesečni energiji neto sončnega sevanja in visoki povprečni hitrosti vetra, ki znaša 5,2 m/s.

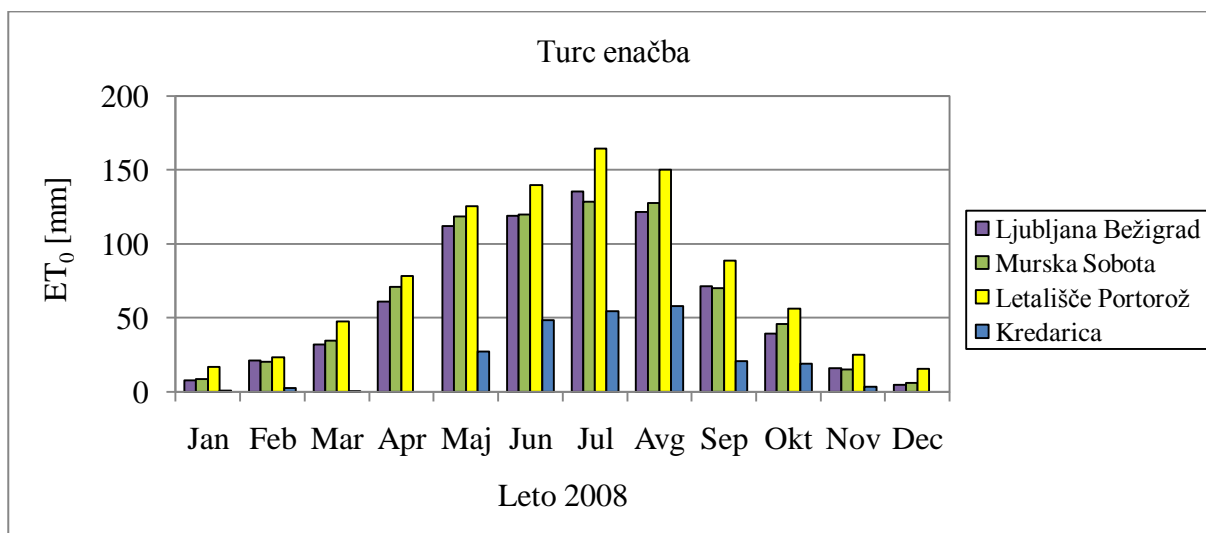


Slika 65: Primerjava količine referenčne evapotranspiracije po FAO Penman-Monteith enačbi za izbrane lokacije

6.1.6 Turcova enačba

Količina referenčne evapotranspiracije po Turcovi enačbi je groba ocena evapotranspiracije. Odvisna je od minimalne in maksimalne dnevne temperature in od povprečne dnevne energije kratkovalovnega sončnega sevanja. Izračun dnevne vrednosti evapotranspiracije je v nekaterih primerih (zaradi negativnih vrednosti povprečne dnevne temperature) podal negativen rezultat. Vse negativne dnevne vrednosti, ki so se pojavljale v določenem mesecu, sem spremenila v 0 mm. Rezultati so prikazani na Sliki 66. Najvišje vrednosti so se pojavljale v Portorožu, najnižje pa na Kredarici. V Portorožu so skozi celo leto najvišje vrednosti povprečne mesečne temperature in energije kratkovalovnega sončnega sevanja. Za Kredarico velja ravno obratno. Pojavljajo se najnižje povprečne mesečne temperature in izrazito nižje vrednosti evapotranspiracije. Mesečna količina evapotranspiracije je zelo podobna na lokaciji

Murske Sobote in Ljubljane. Ti dve lokaciji sta si podobni v povprečni mesečni temperaturi in prejeti energiji kratkovalovnega sevanja.



Slika 66: Primerjava količine referenčne evapotranspiracije po Turcovi enačbi za izbrane lokacije

6.2 Primerjava rezultatov po metodah

Izračune količine referenčne evapotranspiracije na izbranih meteoroloških postajah (Ljubljana Bežigrad, Murska Sobota, letališče Portorož in Kredarica) sem primerjala še na podlagi metode izračuna. Ker se metode med seboj razlikujejo glede na zahtevane vhodne podatke in njihovo natančnost, so primerjave smiselne. V Preglednici 8 so prikazani vhodni podatki po posameznih metodah. Referenčna evapotranspiracija je pri Thorntwaithovi enačbi izračunana na mesečnem časovnem koraku, pri ostalih enačbah pa na dnevnom časovnem koraku. Pri vseh enačbah so potrebni podatki o dnevni temperaturi. Različne energije sončnega sevanja (neto, kratkovalovna, ekstraterestična energija) zahtevajo vse enačbe, razen Thorntwaithove. Enačba FAO Penman-Monteith zahteva največ vhodnih podatkov, najmanj pa Thorntwaithova, Hargreavesova in Turcova.

Kadar se na določenem območju računa količina referenčne evapotranspiracije s pomočjo različnih empiričnih enačb, imajo dobljeni rezultati različne vrednosti. Ti so odvisni od postavk posamezne enačbe, saj so nekatere prilagojene za točno določena klimatska območja

in od vhodnih podatkov, ki jih posamezna enačba zahteva (Grismer in sod., 2002). Rezultati primerjav so prikazani v nadaljevanju za vsako meteorološko postajo posebej.

Preglednica 8: Zahtevani vhodni podatki po posameznih metodah

ENAČBA	TEMPERATURA	ENERGIJA SONČNEGA SEVANJA	RELATIVNA VLAŽNOST	PRITISK	DRUGO
Thorntwaith	povprečna mesečna temperatura				povprečno mesečno število ur sončnega sevanja
Hargreaves	dnevna maksimalna in minimalna temperatura	dnevna vrednost energije ekstraterestičnega sončnega sevanja			
Priestley-Taylor	dnevna maksimalna in minimalna temperatura	dnevna vrednost energije neto sončnega sevanja		povprečna dnevna vrednost pritiska	
Makkink	dnevna maksimalna in minimalna temperatura	dnevna vrednost energije kratkovalovnega sončnega sevanja			
FAO Penman-Monteith	dnevna maksimalna in minimalna temperatura	dnevna vrednost energije neto sončnega sevanja	dnevna maksimalna in minimalna vrednost relativne vlage	povprečna dnevna vrednost pritiska	povprečna dnevna hitrost vetra, nadmorska višina, zemljepisna širina
Turc	dnevna maksimalna in minimalna temperatura	dnevna vrednost energije kratkovalovnega sončnega sevanja			

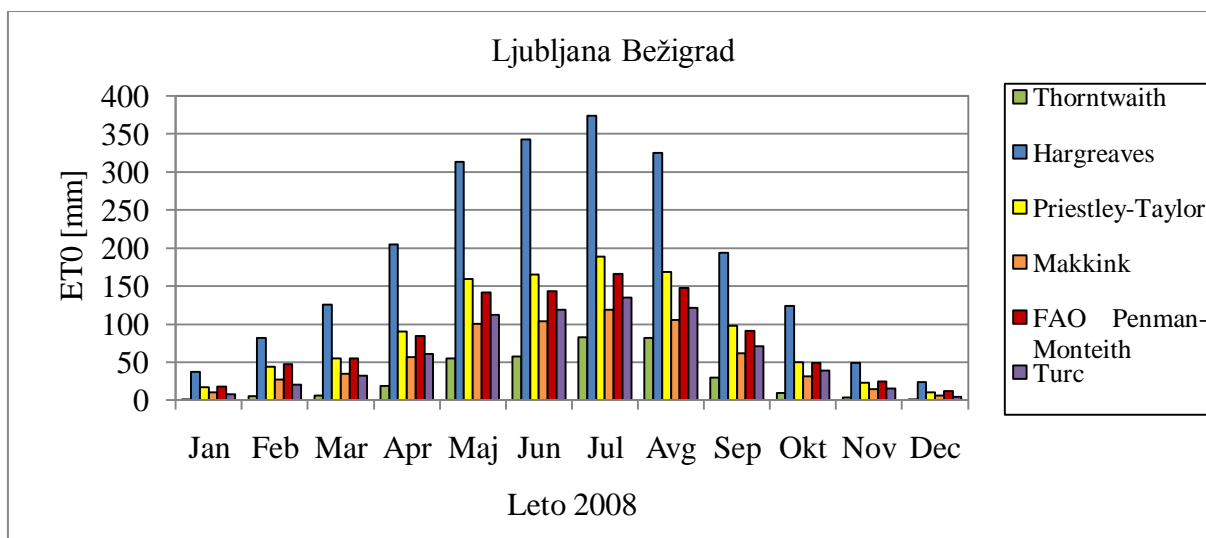
6.2.1 Ljubljana Bežigrad

Daleč najvišje vrednosti evapotranspiracije je v Ljubljani dala Hargreavesova enačba (Slika 67). Ta enačba zahteva za izračun referenčne evapotranspiracije dva podatka, in sicer

povprečno dnevno temperaturo (izračunana iz dnevne maksimalne in minimalne temperature) in dnevno energijo ekstraterestičnega sončnega sevanja. Slednja ima najvišje vrednosti v primerjavi z drugimi energijami sončnega sevanja (kratkovalovna in neto energija sončnega sevanja), kar je verjetno tudi vzrok za višje vrednosti izračunane evapotranspiracije po tej metodi. Do podobnih ugotovitev je prišel tudi Lu s sodelavci (2005), ki je naredil primerjavo šestih metod izračuna referenčne evapotranspiracije za jugovzhodni del ZDA. Med najvišjimi vrednostmi evapotranspiracije so se pojavile vrednosti Hargreavesove enačbe tudi v primeru raziskave na območju Floride (Martinez in sod., 2010). Absolutni maksimum, po omenjeni metodi, se pojavi v Ljubljani julija in znaša 373,9 mm. Izračun evapotranspiracije po ostalih metodah ne preseže vrednosti 188,7 mm. Le-ta se pojavi v juliju po Priestley-Taylorjevi enačbi. Vse enačbe podajo maksimalno vrednost evapotranspiracije v juliju, minimalno pa v januarju ali decembru. Najnižje vrednosti evapotranspiracije poda Thorntwaithova enačba z maksimumom v juliju (82,6 mm). Vzrok za najnižje vrednosti je v zahtevanih vhodnih podatkih, ki sta povprečna mesečna temperatura in število ur sončnega sevanja. Najnižje vrednosti količine evapotranspiracije, v primerjavi z drugimi metodami, je podala Thorntwaithova enačba tudi v raziskavah, ki so bile narejene na področju ZDA (Lu in sod., 2005).

V splošnem si po količini evapotranspiracije sledijo enačbe od najnižje do najvišje vrednosti po sledečem vrstnem redu: Thorntwaithova, Makkinkova, Turcova, FAO Penman-Monteithova, Priestley-Taylorjeva in Hargreavesova (Slika 67). Aleksandris in sod. (2008) so prišli do podobnih ugotovitev v raziskavi, ki se je izvajala na območju Beograda. V tem primeru so si od najnižje do najvišje vrednosti evapotranspiracije sledile enačbe: Makkink, Turc, Copais, FAO Penman-Monteith, Priestley-Taylor in Hargreaves. Hargreavesova je pokazala zelo dobre rezultate v suhih in vetrovnih območjih severovzhodne Španije (Martinez in sod., 2004). Enačbi Priestley-Taylor in Turc, ki sta bili razviti za topla in vlažna območja, sta podali zelo podobne rezultate, tako v našem primeru, kot v primeru raziskave v ZDA (Lu in sod., 2005). Vrednosti evapotranspiracije pri temperaturnih metodah (Hargreavesova in Thorntwaithova enačba) kažejo na skromnost vhodnih podatkov. V enačbah ni vključena energija sončnega sevanja, ki ima zelo velik vpliv na količino evapotranspiracije, poleg tega ne vsebujejo aerodinamične komponente. Zato je ocena količine evapotranspiracije po teh metodah relativno slaba (Irmak in sod., 2008).

Na Sliki 67 je opaziti, da je količina evapotranspiracije po Makkinkovi enačbi nižja od količine evapotranspiracije po FAO Penman-Monteith in Turcovi enačbi. Do enakega rezultata je prišel tudi Er-Raki s sodelavci (2004), ki so na območju Maroka primerjali količino evapotranspiracije po petih različnih enačbah (FAO Penman-Monteith, Penman, Priestley-Taylor, Makkink in Turc).

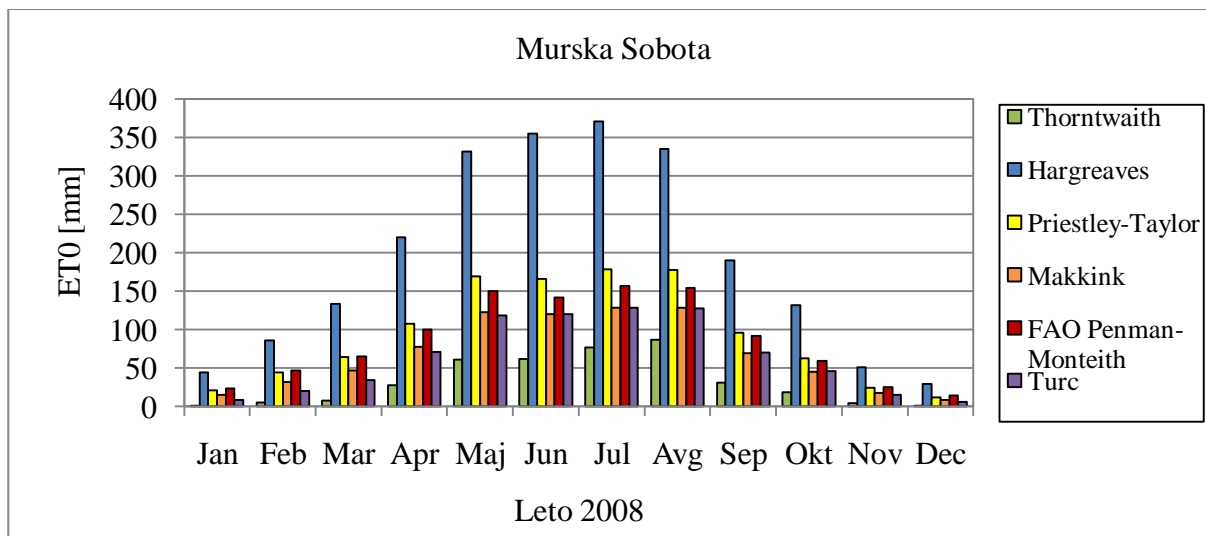


Slika 67: Primerjava rezultatov referenčne evapotranspiracije po različnih metodah za Ljubljano Bežigrad

6.2.2 Murska Sobota

Podobno kot v Ljubljani, se tudi v Murski Soboti najnižje vrednosti referenčne evapotranspiracije pojavijo po Thorntwaithovi, najvišje pa po Hargreavesovi enačbi (Slika 68). Thorntwaithova enačba zahteva samo dva vhodna podatka in ne vsebuje energije sončnega sevanja, kar vpliva na nižje vrednosti evapotranspiracije. Za razliko od Thorntwaithove enačbe, Hargreavesova zahteva energijo ekstraterestičnega sončnega sevanja, ki močno poviša količino referenčne evapotranspiracije. Prva enačba poda maksimalno (86,8 mm) vrednost v avgustu in minimalno (0,6 mm) v decembru. Druga poda maksimalno (371,2 mm) v juliju, minimalno (29 mm) pa prav tako v decembru. Visoke vrednosti evapotranspiracije po Hargreavesovi metodi izstopajo predvsem v poletnih mesecih, ko je energija ekstraterestičnega sončnega sevanja in temperatura najvišja. Zelo podobne rezultate o količini mesečne evapotranspiracije podata Makkinkova in Turcova enačba, saj obe enačbi

vsebujeta dnevno maksimalno in minimalno temperaturo ter energijo kratkovalovnega sončnega sevanja. Vrednosti evapotranspiracije po Makkinkovi in Turcovi metodi so si med seboj podobne tudi v primeru raziskave med metodami izračuna evapotranspiracije v Beogradu (Alexandris in sod., 2008), Maroku (Er-Raki in sod., 2004) in v južnem delu Nebraske (Irmak in sod., 2008)

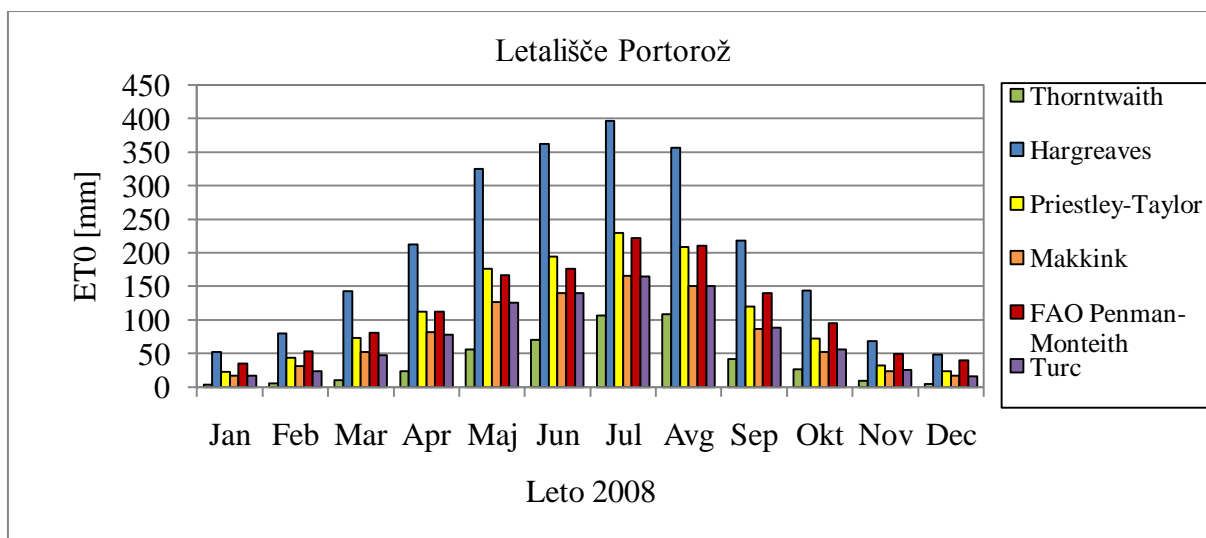


Slika 68: Primerjava rezultatov referenčne evapotranspiracije po različnih metodah za Mursko Soboto

6.2.3 Letališče Portorož

V Portorožu doseže količina evapotranspiracije po Hargreavesovi metodi v mesecu juliju maksimum (396,9 mm) (Slika 69). Vrednosti evapotranspiracije, ki sem jih izračunala po Hargreavesovi metodi, so čez celo leto najvišje. Vzrok temu je visoka energija ekstraterestičnega sevanja in visoke temperature, ki so značilne za sredozemsko podnebje. Najnižje so vrednosti izračunane po Thorntwaithovi metodi, saj ta zahteva le povprečno mesečno temperaturo in število mesečnih ur sončnega sevanja. Maksimum (108,4 mm) se po tej metodi pojavi v avgustu. Precej podobne so si mesečne vrednosti evapotranspiracije po Priestley-Taylorjevi in FAO Penman-Monteith enačbi ter Makkinkovi in Turcovi enačbi. Prvi dve enačbi zahtevata neto energijo sončnega sevanja in srednjo dnevno temperaturo, drugi dve enačbi pa energijo kratkovalovnega sončnega sevanja in srednjo dnevno temperaturo. Čeprav je FAO Penman-Monteith enačba bolj zahtevna, je vpliv omenjenih spremenljivk

dovolj močan, da je rezultat podoben manj zahtevni Priestley-Taylorjevi enačbi. Podobnost rezultatov med enačbama je pokazala tudi raziskava na območju Beograda (Alexandris in sod., 2008). V isti raziskavi je prikazana tudi podobnost rezultatov referenčne evapotranspiracije, med enačbo Makkink in Turc, vendar v tem primeru Alexandris in sod. (2008) ugotavljajo, da so rezultati podcenjeni.

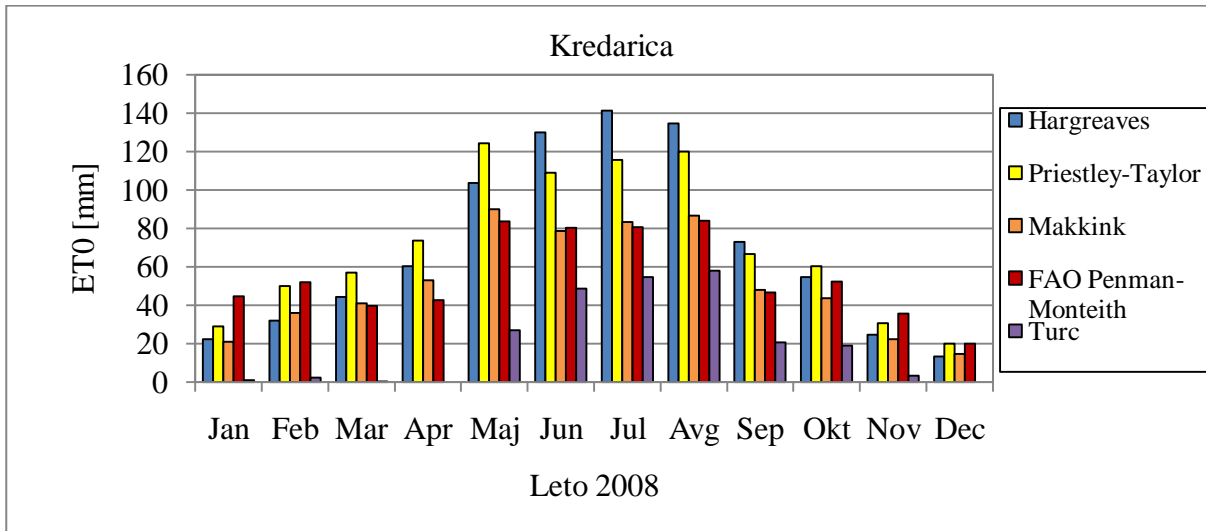


Slika 69: Primerjava rezultatov referenčne evapotranspiracije po različnih metodah za letališče Portorož

6.2.4 Kredarica

Na lokaciji Kredarica poda Hargreavesova enačba maksimalne vrednosti samo v poletnih mesecih (junij, julij, avgust, september), saj je takrat vpliv temperature in energije ekstraterestičnega sončnega sevanja najvišji. V januarju, februarju, oktobru, novembru in decembru se maksimalne vrednosti referenčne evapotranspiracije pojavijo pri računu s FAO Penman-Monteith enačbo. Ta enačba je edina, ki zahteva podatek o povprečni relativni vlagi in povprečni hitrosti vetra. Povprečna vrednost relativne vlage je v tem obdobju najnižja, povprečna hitrost vetra pa najvišja. V vseh ostalih mesecih (marec, april, maj in december) maksimumi nastopijo pri računanju s pomočjo Priestley-Taylorjeve enačbe. V marcu, aprilu in maju ima energija neto sončnega sevanja izrazito višje vrednosti. Najvišja vrednost evapotranspiracije nastopi v juliju (141 mm) po Hargreavesovi metodi. Pri rezultatih Turcove enačbe je vidno, da se je na postaji Kredarica največkrat pojavljala negativna povprečna

dnevna temperatura. Pri tej temperaturi enačba ni uporabna, saj poda dnevno vrednost evapotranspiracije negativno. Ta vpliv se pozna pri mesečni vrednosti evapotranspiracije in se nazorno vidi na Sliki 70.



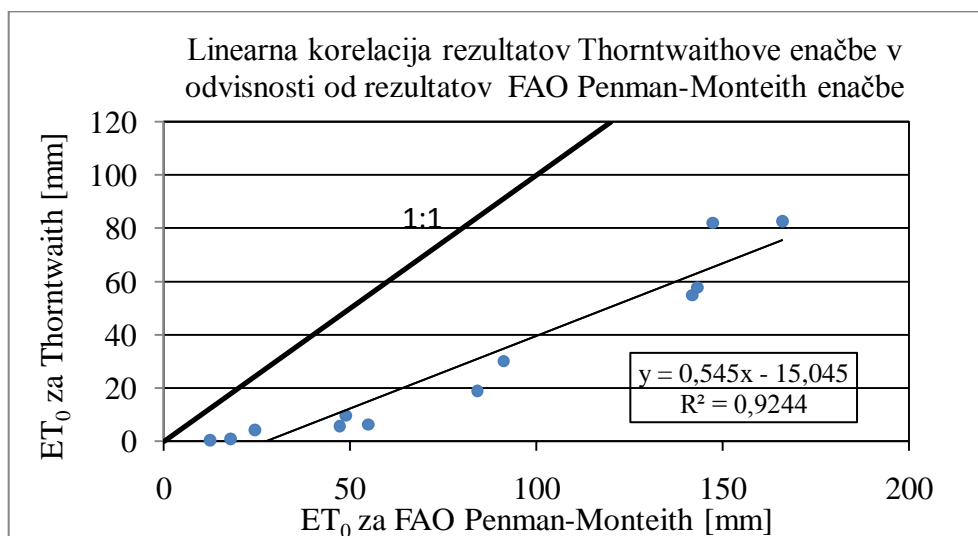
Slika 70: Primerjava rezultatov referenčne evapotranspiracije po različnih metodah za Kredarico

6.3 Statistična analiza in primerjava rezultatov med metodami

Enačba FAO Penman-Monteith je bila predlagana za standardno metodo izračuna evapotranspiracije (Allen in sod., 1998). Zato sem se pri linearni korelaciji odločila za prikaz odvisnosti rezultatov referenčne evapotranspiracije vseh obravnavanih enačb (Thorntwaithovo, Hargreavesovo, Priestley-Taylorjevo, Makkinkovo in Turcovo enačbo) od FAO Penman-Monteithove enačbe. Mesečne vrednosti evapotranspiracije, ki so uporabljene za linearno korelacijo, so izračunane za meteorološko postajo v Ljubljani.

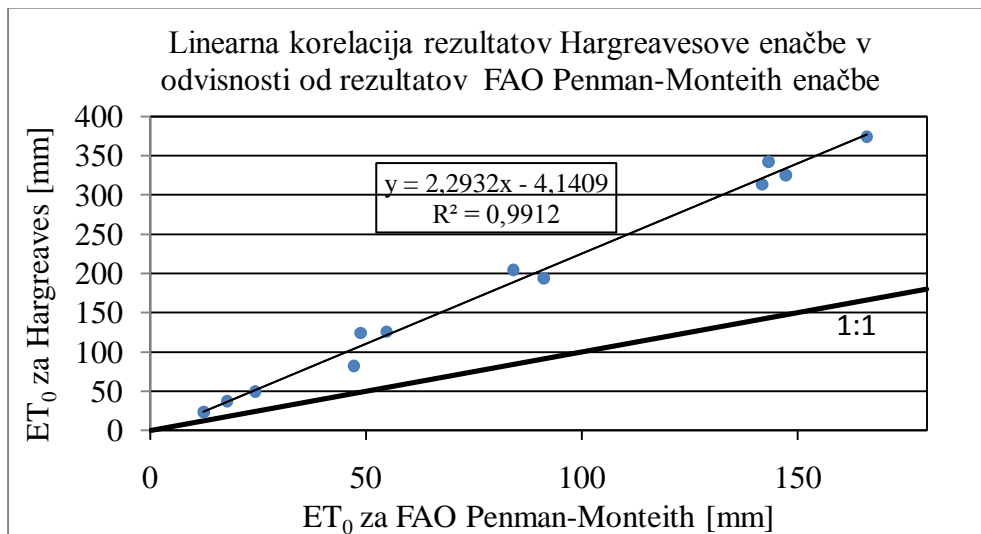
Slika 71 prikazuje linearno korelacijo rezultatov Thorntwaithove enačbe v odvisnosti od rezultatov FAO Penman-Monteithove enačbe. Koeficient korelacije sicer znaša 0,961 in dokazuje zelo močno povezanost, vendar so vrednosti referenčne evapotranspiracije po Thorntwaithovi metodi konstantno za 46 % manjše od vrednosti FAO Penman-Monteithove enačbe. Kot smo ugotovili že v prejšnjem poglavju, Thorntwaithova enačba v večini primerov

močno podcenjuje vrednosti evapotranspiracije. Do podobnih ugotovitev so prišli tudi drugi (Irmak in sod., 2008; Lu in sod., 2005).



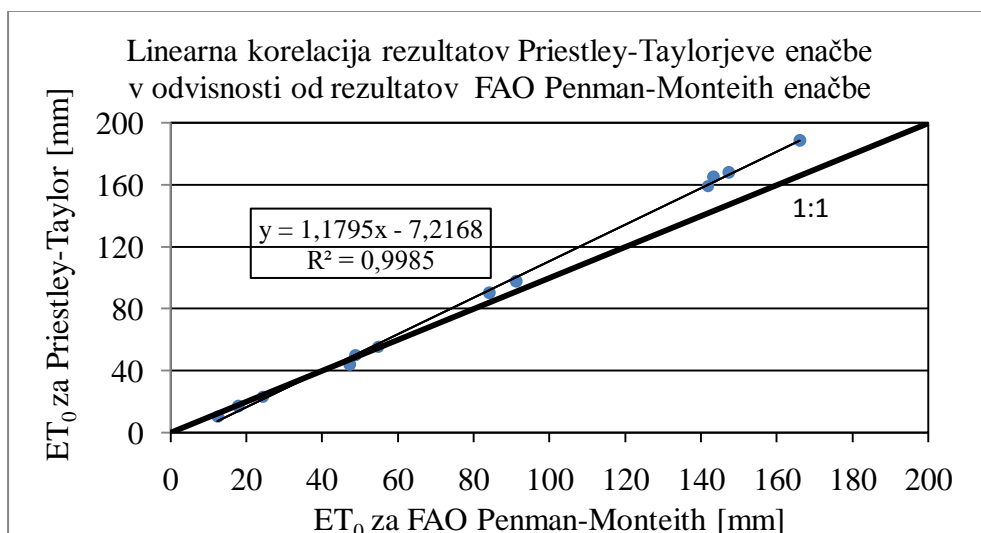
Slika 71: Linearna korelacija rezultatov Thorntwaithove enačbe v odvisnosti od rezultatov FAO Penman-Monteithove enačbe

Korelacijski koeficient $R = 0,996$ kaže zelo močno povezanost med rezultati Hargreavesove in FAO Penman-Monteithove enačbe (Slika 72). Vendar so v tem primeru rezultati Hargreavesove enačbe približno za 130 % višji od rezultatov FAO Penman-Monteithove enačbe. Hargreavesova enačba predvsem zaradi upoštevanja ekstraterestičnega sevanja precenjuje vrednosti evapotranspiracije.



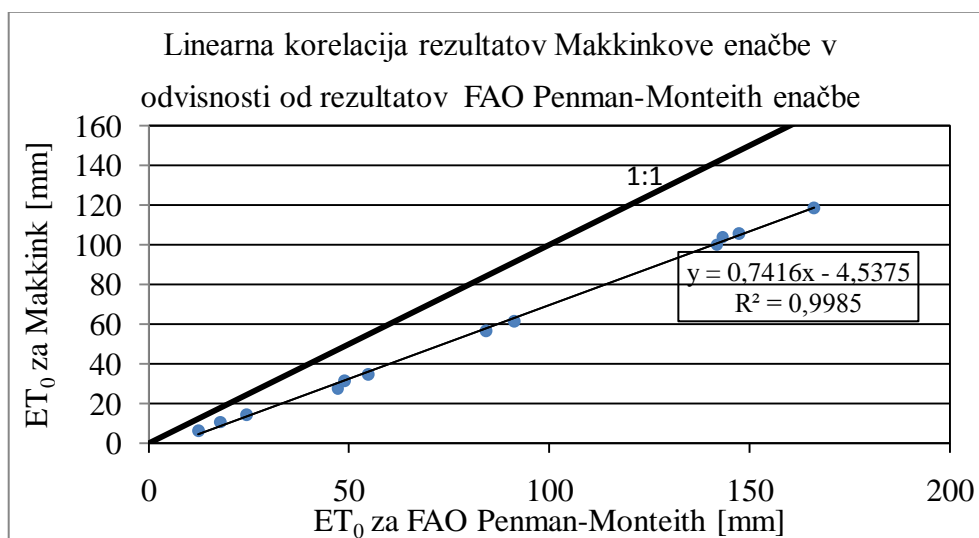
Slika 72: Linearna korelacija rezultatov Hargreavesove enačbe v odvisnosti od rezultatov FAO Penman-Monteithove enačbe

Rezultati evapotranspiracije po Priestley-Taylorjevi enačbi so za približno 18 % višji od rezultatov FAO Penman-Monteith enačbe. Vrednost korelacijskega koeficienta v tem primeru znaša 0,99 in predstavlja zelo močno povezanost (Slika 73). Priestley-Taylorjeva enačba je poleg Turcove enačbe pokazala najboljše ujemanje s FAO Penman-Monteithovo enačbo. Podobno so ugotovili tudi Lu in sodelavci (2005).



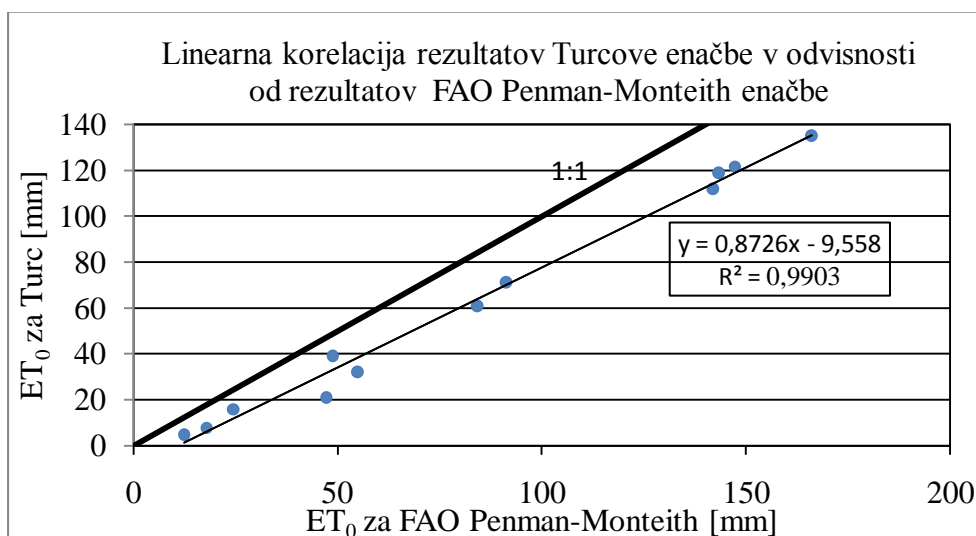
Slika 73: Linearna korelacija rezultatov Priestley-Taylorjeve enačbe v odvisnosti od rezultatov FAO Penman-Monteithove enačbe

Na Sliki 74 je med rezultati Makkinkove in FAO Penman-Monteithove enačbe opaziti močno povezanost ($R = 0,99$). Rezultati evapotranspiracije po Makkinkovi enačbi so za približno 26 % nižji od rezultatov FAO Penman-Monteith enačbe. Podobno ujemanje je ugotovil tudi Alexandris s sodelavci (2008).



Slika 74: Linearna korelacija rezultatov Thorntwaithove enačbe v odvisnosti od rezultatov FAO Penman-Monteithove enačbe

Korelacijski koeficient ($R = 0,99$) nam kaže zelo močno povezanost med rezultati Turcove in FAO Penman-Monteith enačbe (Slika 75). Rezultati izračuna evapotranspiracije po Turcovi enačbi so za približno 13 % nižji od rezultatov po FAO Penman-Monteith enačbi. Turcova metoda se je po rezultatih torej najbolj približala FAO Penman-Monteithovi enačbi.



Slika 75: Linearna korelacija rezultatov Turcove enačbe v odvisnosti od rezultatov FAO Penman-Monteithove enačbe

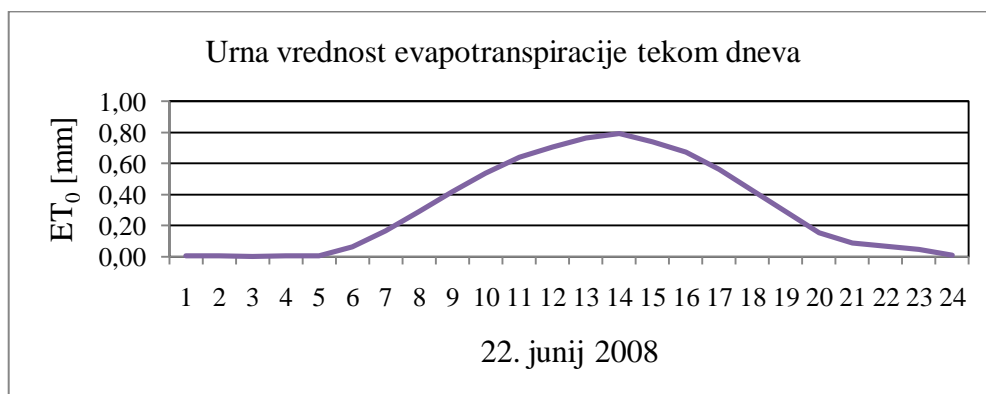
6.4 Analiza vplivov posameznih spremenljivk na evapotranspiracijo

Na količino referenčne evapotranspiracije vplivajo različne spremenljivke, zato je potrebno razumeti, kako se te spremenljivke obnašajo v različnih časovnih obdobjih in kakšen je njihov vpliv na rezultate. V diplomski nalogi sem izračunala količino mesečnih in dnevni vrednosti evapotranspiracije. Prve sem izračunala iz vsote dnevni vrednosti, druge pa iz vsote urnih vrednosti referenčne evapotranspiracije. Za dnevne in mesečne vrednosti sem v izračunu referenčne evapotranspiracije uporabila posamezne spremenljivke (temperatura, veter, energija sončnega sevanja, relativna vlaga), ki so bile merjene na avtomatskih postajah vsake pol ure (ARSO, 2008).

6.4.1 Časovno spreminjanje posameznih spremenljivk

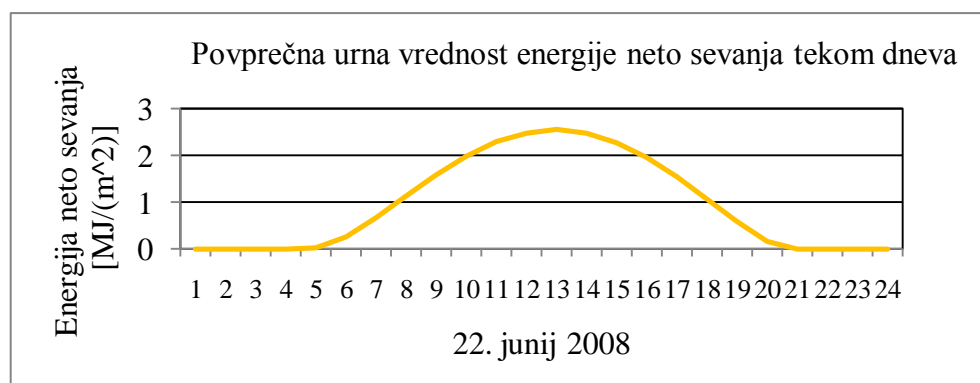
Za prikaz časovnega spreminjanja spremenljivk na urnem koraku sem si izbrala meteorološko postajo Ljubljana. V letu 2008 je bila vrednost evapotranspiracije najvišja 22. junija in prav v tem dnevu bodo v nadaljevanju prikazane urne vrednosti spremenljivk. Na omenjeni dan količina izračunane dnevne vrednosti evapotranspiracije, po enačbi FAO Penman-Monteith znaša 7,8 mm. Vsota urnih vrednosti evapotranspiracije pa znaša 7,6 mm (Slika 76). Količina

evapotranspiracije začne naraščati ob 6.00 uri in narašča vse do 14.00 ure. Po 14.00 začne padati vse do konca dneva.



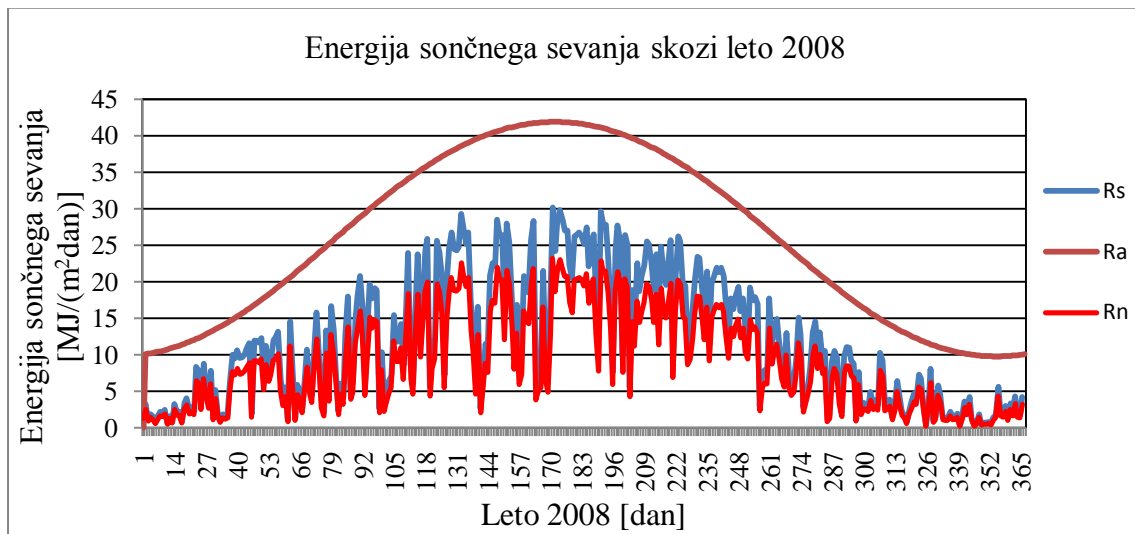
Slika 76: Prikaz evapotranspiracije tekom dneva (22. junij 2008) v Ljubljani

Podobno kot izračunana vrednost referenčne evapotranspiracije ima tudi neto energija sončnega sevanja najvišje vrednosti v opoldanskem času (Slika 77). Neto energija sončnega sevanja je od 21.00 do 4.00 ure zjutraj enaka nič. Ob 5.00 uri začne naraščati in doseže maksimum ob 13.00. Od maksimalne vrednosti potem proti večeru upada.



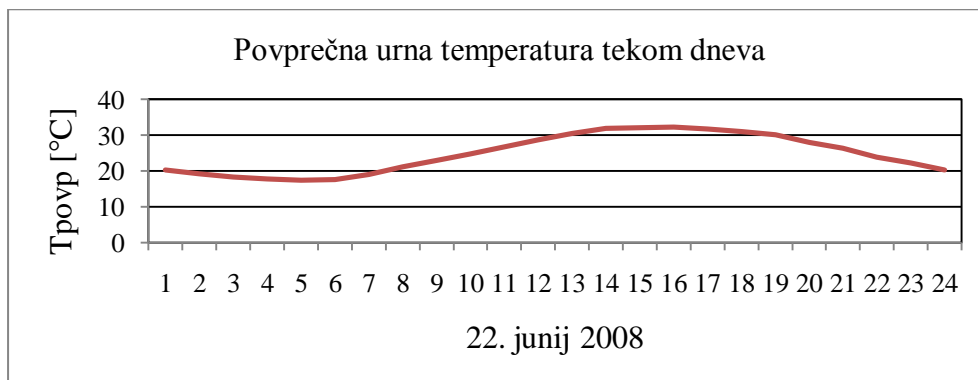
Slika 77: Prikaz spreminjanja energije neto sevanja tekom dneva (22. junij 2008) v Ljubljani

22. junij predstavlja 174. dan v letu. Na ta dan znaša energija neto sončnega sevanja 21,98 MJ/m². Energija neto sončnega sevanja skozi celo leto predstavlja najnižje vrednosti sončnega sevanja (Slika 78). Najvišje vrednosti sončnega sevanja predstavlja ekstraterestično sevanje, takoj za njim pa kratkovalovno sončno sevanje. Vrednosti vseh sončnih sevanj so minimalne pozimi in naraščajo do konca meseca junija, kjer dosežejo vrh. Od konca meseca junija do decembra vrednosti sončnega sevanja padajo.



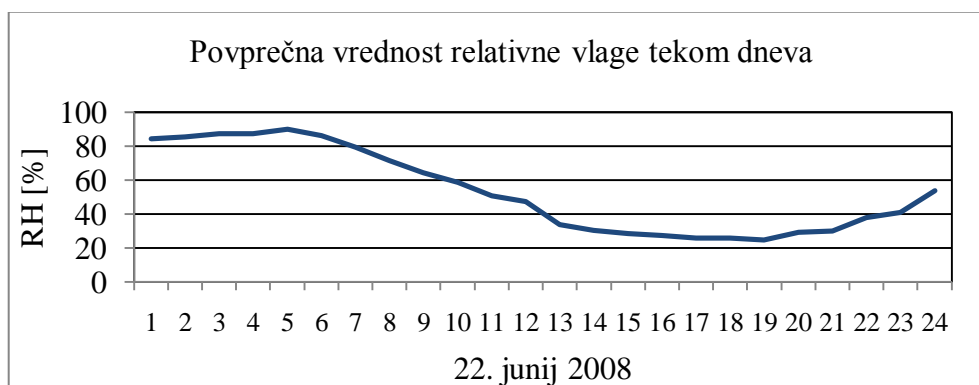
Slika 78: Prikaz spreminjanja različnih energij sončnega sevanja v Ljubljani tekom leta 2008

Povprečna vrednost urne temperature na omenjeni dan doseže maksimum ($32,1\text{ }^{\circ}\text{C}$) ob 15.00 uri, minimum ($17,8\text{ }^{\circ}\text{C}$) pa ob 4.00 uri zjutraj. Temperatura, ki začne naraščati ob 4.00 uri, narašča vse do 16.00 ure, nato njena vrednost pada do konca dneva (Slika 79).



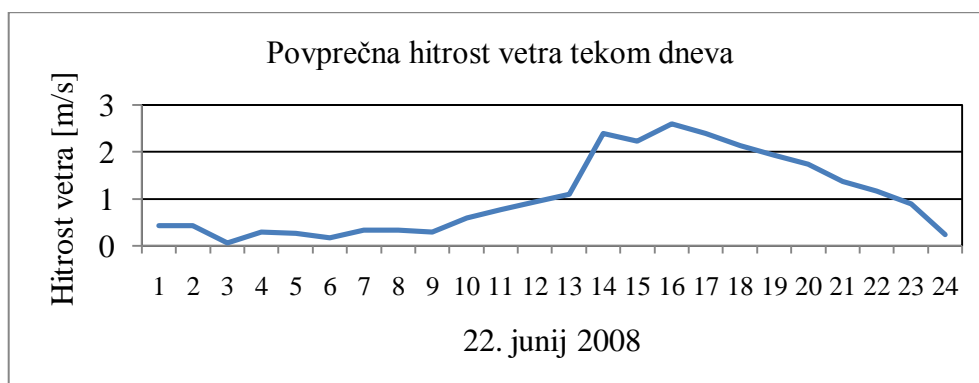
Slika 79: Prikaz temperature tekom dneva (22. Junij 2008) v Ljubljani

Povprečna vrednost urne relativne vlage doseže maksimum (90 %) ob 5.00 uri, minimum (25 %) pa ob 19.00 uri. Ponoči je vrednost relativne vlage najvišja, padati pa začne zjutraj in pada vse do večera (Slika 80).



Slika 80: Prikaz spreminjanja relativne vlage tekom dneva (22. junij 2008) v Ljubljani

Na Sliki 81 je prikazana povprečna urna hitrost vetra za območje Ljubljane. Najnižje vrednosti se pojavijo med 1.00 in 9.00 uro. Po 9.00 uri začne hitrost vetra naraščati in doseže maksimum (2,6 m/s) ob 16.00 uri.



Slika 81: Prikaz spreminjanja hitrosti vetra tekom dneva (22. junij 2008) v Ljubljani

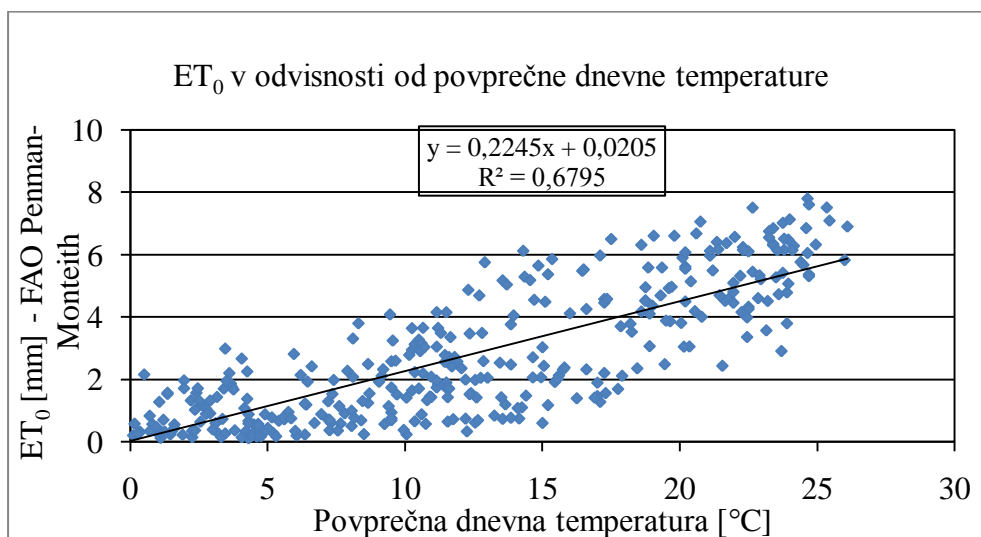
6.4.2 Vpliv posameznih spremenljivk na evapotranspiracijo

Vpliv spremenljivk na količino referenčne evapotranspiracije je v nadaljevanju prikazan s pomočjo linearne korelacije. Za linearno korelacijo so uporabljene dnevne vrednosti spremenljivk skozi celo leto in pripadajoča izračunana dnevna vrednost evapotranspiracije. Količina referenčne evapotranspiracije je izračunana s pomočjo enačbe FAO Penman-Monteith, in sicer za območje Ljubljane, Murske Sobote, Portoroža in Kredarice. Spremenljivke, ki vplivajo na količino referenčne evapotranspiracije, v omenjeni enačbi so: povprečna dnevna temperatura, energija neto sončnega sevanja, hitrost vetra, vrednost zasičenega in dejanskega parnega tlaka. Povezanost med količino evapotranspiracije in

spremenljivkami je na grafih prikazana s pomočjo koeficienta (R^2), ki prestavlja kvadratno vrednost korelacijskega koeficienta (Rovan in sod., 2009). Povezanost med spremenljivkami sem preverila tudi s statistično analizo, ki pokaže statistično značilno odvisnost ali neodvisnost med posameznimi spremenljivkami.

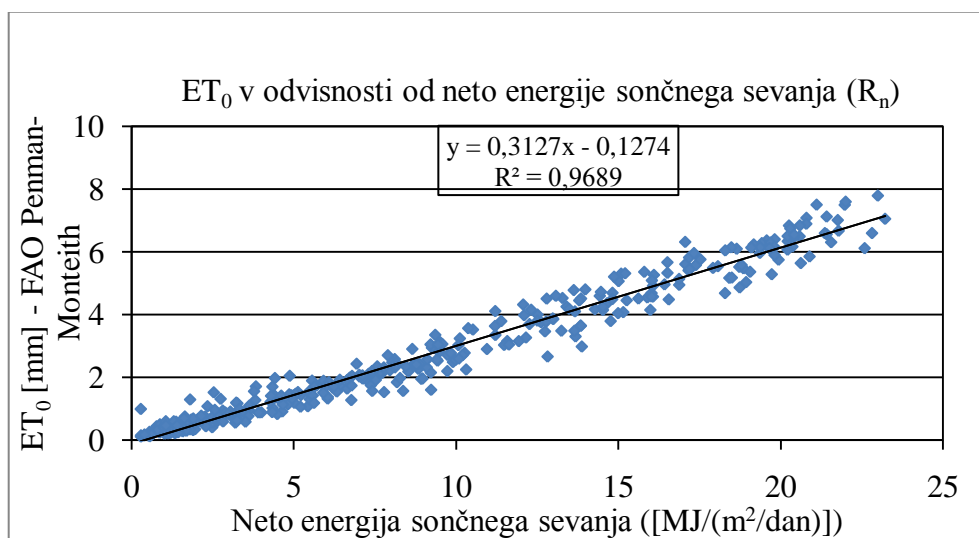
6.4.2.1 Ljubljana

Odvisnost evapotranspiracije od povprečne dnevne temperature v Ljubljani, je prikazana na Sliki 82. Koeficient (R^2) je enak 0,679, kar pomeni da koeficient korelacije R znaša 0,824. Slednji kaže na povezanost med referenčno evapotranspiracijo in povprečno dnevno temperaturo. Statistična analiza je pokazala, da sta spremenljivki med seboj zelo močno statistično značilno odvisni s p-vrednostjo $5,76 \cdot 10^{-92}$.



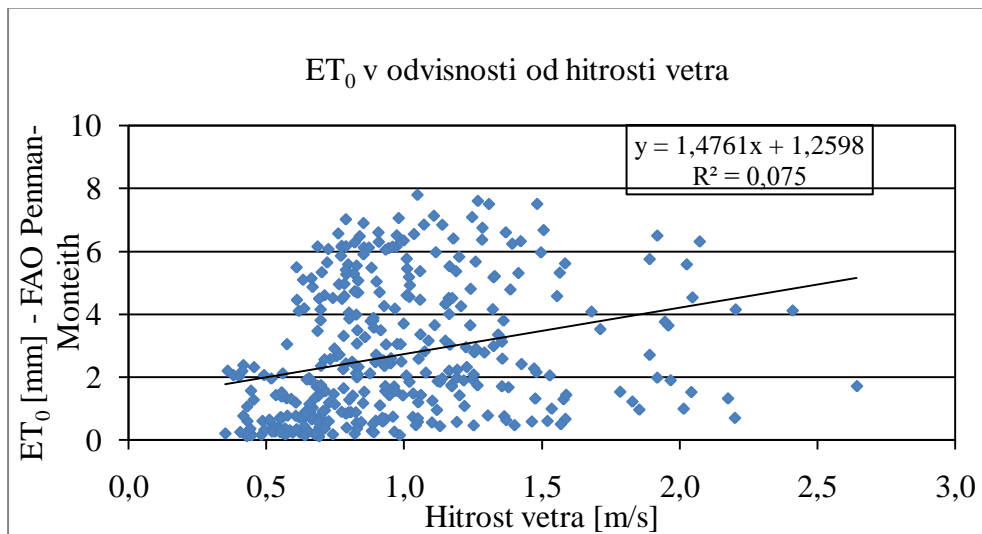
Slika 82: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od povprečne dnevne temperature v Ljubljani

Slika 83 prikazuje vpliv neto energije sončnega sevanja v Ljubljani na vrednost referenčne evapotranspiracije. Korelacijski koeficient ($R = 0,984$) in regresijska enačba kažeta, da je povezanost med njima pozitivna in zelo močna. Tudi statistična analiza je pokazala, da je med njima zelo močna statistično značilna odvisnost ($p = 1,705 \cdot 10^{-276}$).

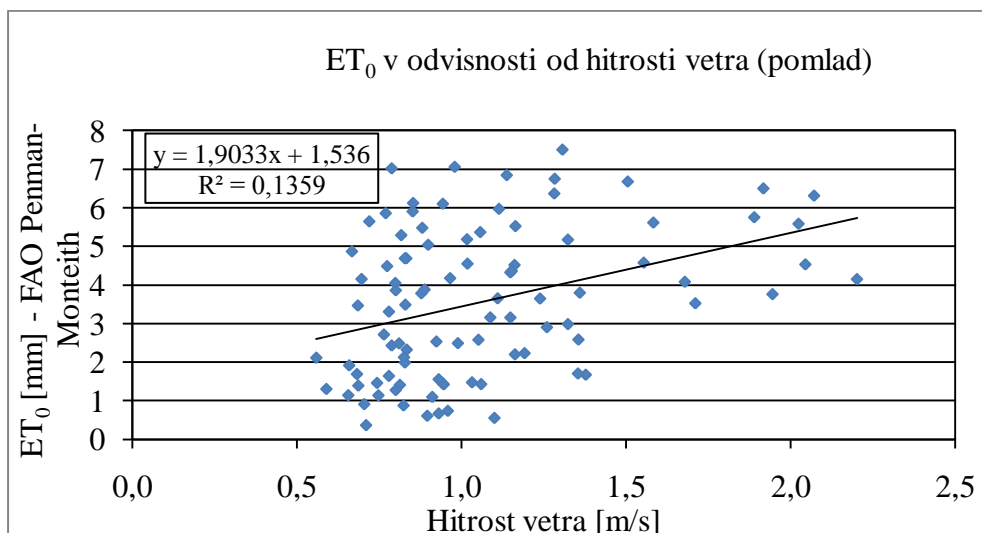


Slika 83: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od neto energije sončnega sevanja v Ljubljani

Korelacijski koeficient med referenčno evapotranspiracijo in hitrostjo vetra v Ljubljani znaša 0,274 – korelacija je zelo šibka in pozitivna (Slika 84). Kljub zelo slabi korelaciji, pa p vrednost kaže, da je med spremenljivkama kljub vsemu še vedno močno statistično značilna odvisnost ($p = 1,024 \cdot 10^{-7}$). Odvisnost evapotranspiracije od vetra sem preverila tudi po letnih časih. V Ljubljani je bila najvišja vrednosti korelacijskega koeficienta spomladi (Slika 85) in pozimi. Spomladi vrednost korelacijskega koeficienta znaša 0,369, pozimi pa 0,352. Obe vrednosti korelacijskega koeficienta predstavljata pozitivno in precej šibko povezanost, ki pa je kljub vsemu močno statistično značilna.

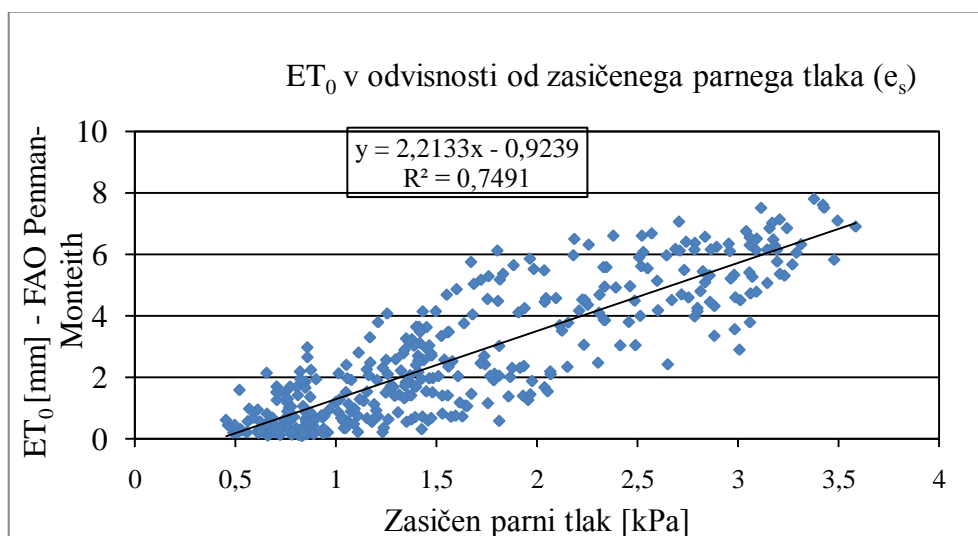


Slika 84: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od hitrosti vetra v Ljubljani



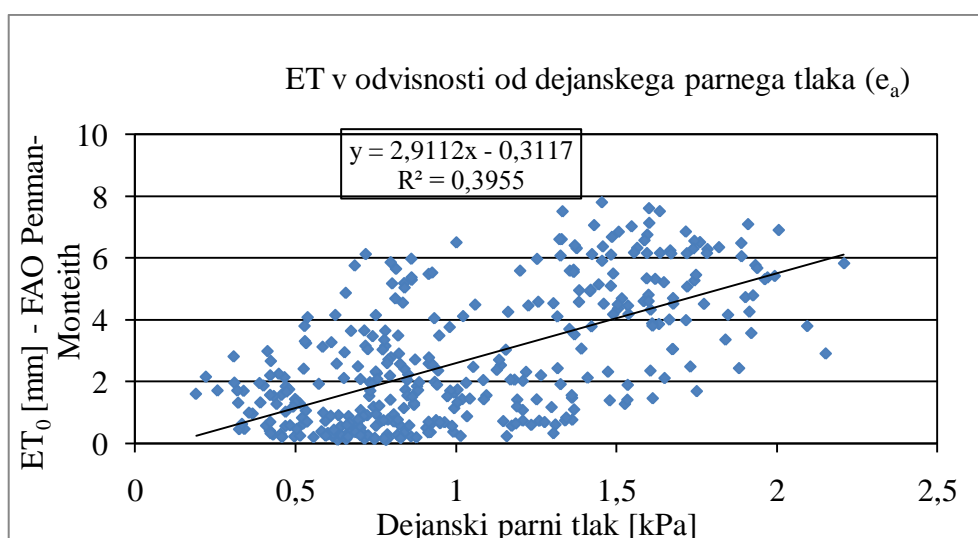
Slika 85: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od hitrosti vetra v Ljubljani za obdobje pomladi

Vrednost korelacijskega koeficienta med evapotranspiracijo in zasičenim parnim tlakom v Ljubljani za leto 2008 znaša 0,865 in predstavlja močno in pozitivno korelacijsko povezanost. Tudi statistična analiza je pokazala zelo močno statistično značilno odvisnost s p-vrednostjo $2,507 \cdot 10^{-111}$. Linearna odvisnost količine evapotranspiracije od zasičenega parnega tlaka je prikazana na Sliki 86.



Slika 86: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od zasičenega parnega tlaka v Ljubljani

Slika 87 prikazuje linearno odvisnost količine evapotranspiracije od dejanskega parnega tlaka. Povezanost med njima je pozitivna in srednje močna, kar nam kaže korelacijski koeficient z vrednostjo 0,628. Kljub srednje močni povezanosti, pa je statistična analiza pokazala, da je odvisnost med njima zelo močno statistično značilna s p-vrednostjo $1,079 \cdot 10^{-41}$.

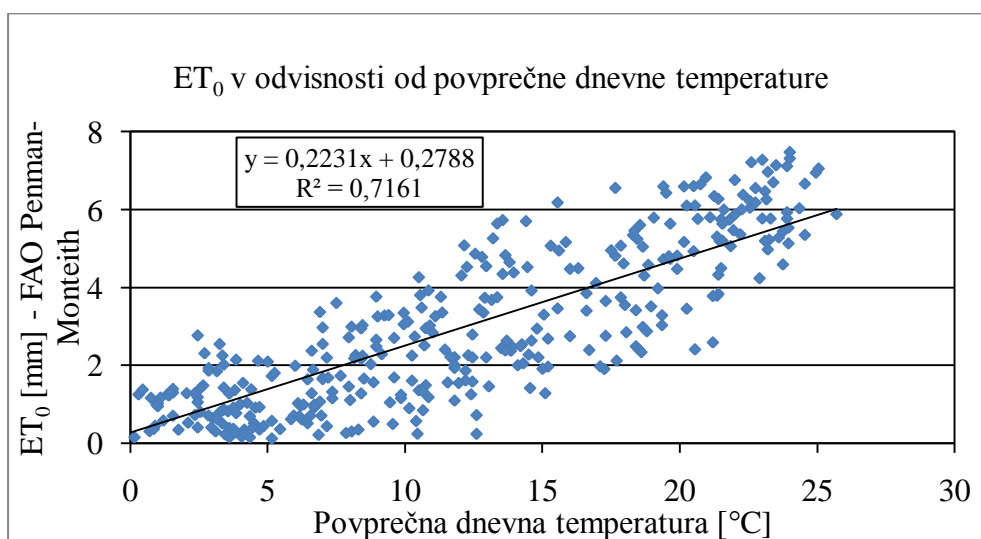


Slika 87: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od dejanskega parnega tlaka v Ljubljani

Iz prikazanega vidimo, da je referenčna evapotranspiracija v Ljubljani v največji meri odvisna od neto energije sončnega sevanja, temperature in zasičenega parnega tlaka, ki pa je tudi odvisen od temperature. Vpliv vetra je sicer statistično značilen, vendar ne v vseh letnih časih.

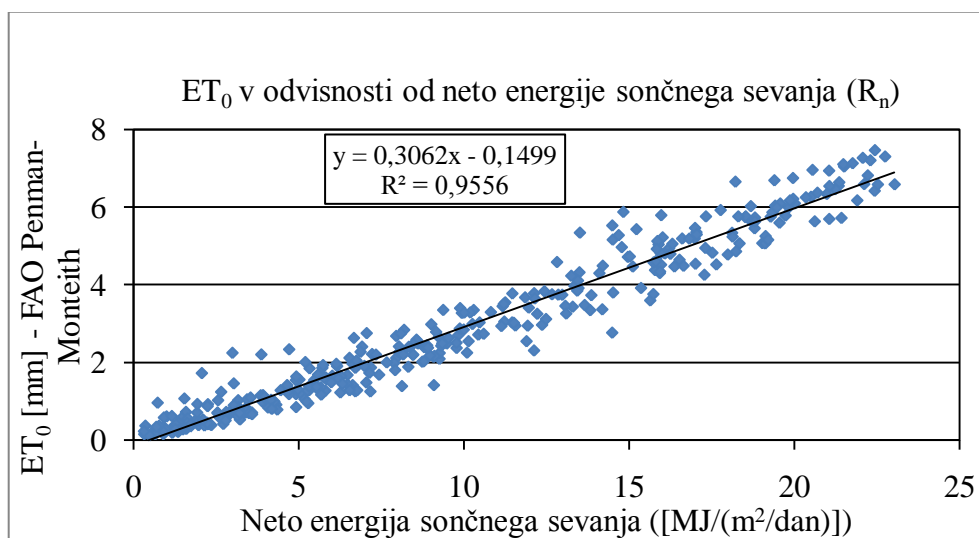
6.4.2.2 Murska Sobota

Koeficient korelacije (R), med referenčno evapotranspiracijo in povprečno dnevno temperaturo znaša 0,846 (Slika 88). Regresijska analiza kaže, da je korelacija med njima pozitivna in močna. Zelo močno značilno odvisnost pa je pokazala tudi statistična analiza s p-vrednostjo $1,52 \cdot 10^{-101}$.



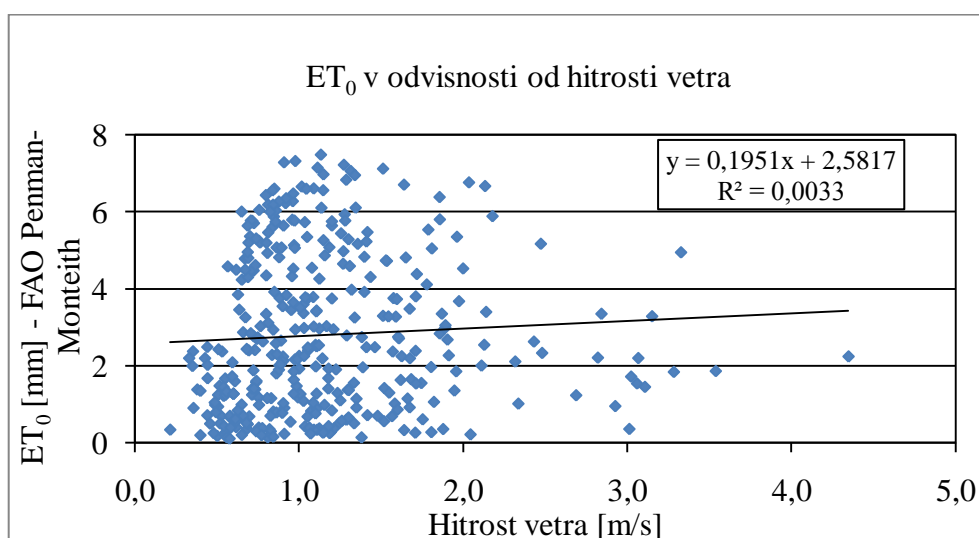
Slika 88: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od povprečne dnevne temperature v Murski Soboti

Odvisnost količine evapotranspiracije od energije neto sončnega sevanja je prikazana na Sliki 89. Korelacijski koeficient v tem primeru znaša 0,977 kar pomeni, da je povezava pozitivna in zelo močna.

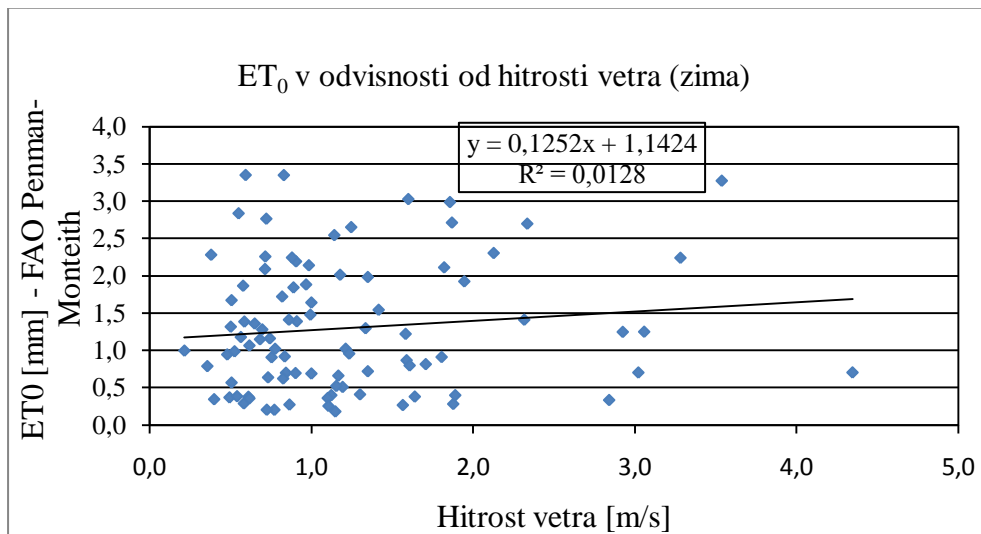


Slika 89: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od neto energije sončnega sevanja v Murski Soboti

Odvisnost količine evapotranspiracije od hitrosti vetra na omenjeni lokaciji nismo mogli pokazati (Slika 90). To dokazuje korelacijski koeficient (R), ki znaša le 0,057. Statistična vrednost p znaša 0,2733, kar pomeni, da statistično značilne povezave med količino evapotranspiracije in hitrostjo vetra ni. Pri pregledu vpliva hitrosti vetra na količino evapotranspiracije po letnih časih, je pozitivna in največja povezanost pozimi in znaša $R = 0,113$ (Slika 91). Tudi ta vrednost ne kaže statistično značilne povezanosti.

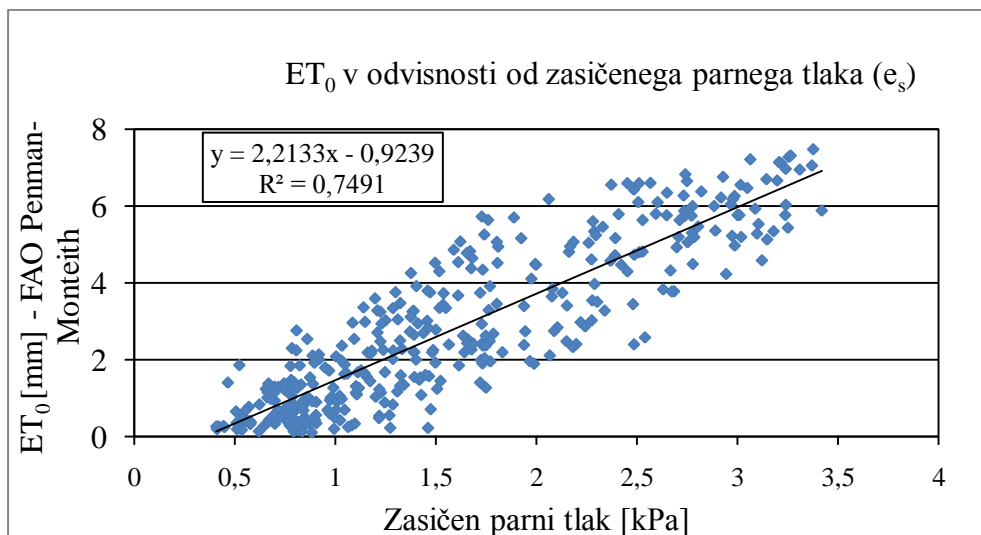


Slika 90: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od hitrosti vetra v Murski Soboti



Slika 91: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od hitrosti vetra v Murski Soboti

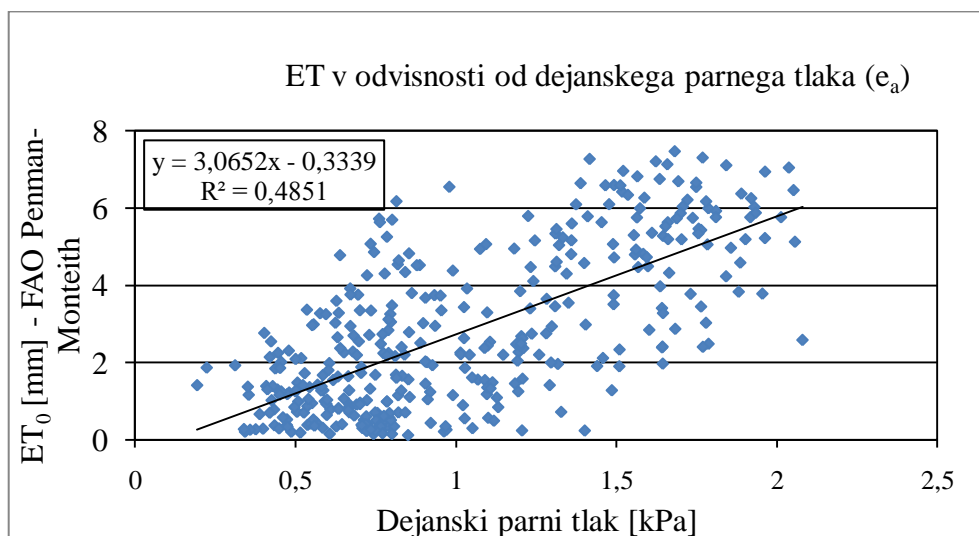
Vpliv zasičenega parnega tlaka na količino evapotranspiracije je prikazana na Sliki 92. Povezanost med njima je močna in pozitivna, kar nam pove vrednost koeficienta korelacije ($R = 0,885$). Tudi statistična analiza je pokazala, da je povezava med njima zelo močno statistično značilna ($p = 3,41 \cdot 10^{-123}$).



Slika 92: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od zasičenega parnega tlaka v Murski Soboti

Povezava med dejanskim parnim tlakom in količino evapotranspiracije je pozitivna in srednje močna (Slika 93), kar nam kaže vrednost korelacijskega koeficienta, ki znaša 0,696. Kljub

srednji močni povezavi, pa je statistična analiza pokazala, da je povezanost med njima zelo močno statistično značilna ($p = 2,41 * 10^{-54}$).

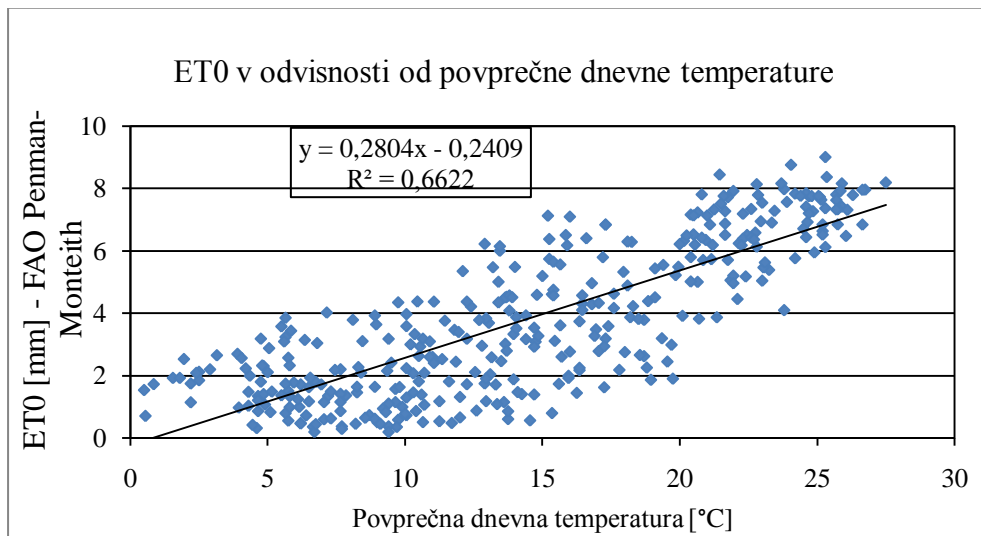


Slika 93: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od dejanskega parnega tlaka v Murski Soboti

Podobno kot za Ljubljano, lahko tudi za Mursko Soboto zaključimo, da je referenčna evapotranspiracija v največji meri odvisna od neto energije sončnega sevanja, temperature in zasičenega parnega tlaka. Neposrednega vpliva vetra na količino evapotranspiracije pa v tem primeru nismo mogli dokazati. Tudi z delitvijo po posameznih letnih časih ne.

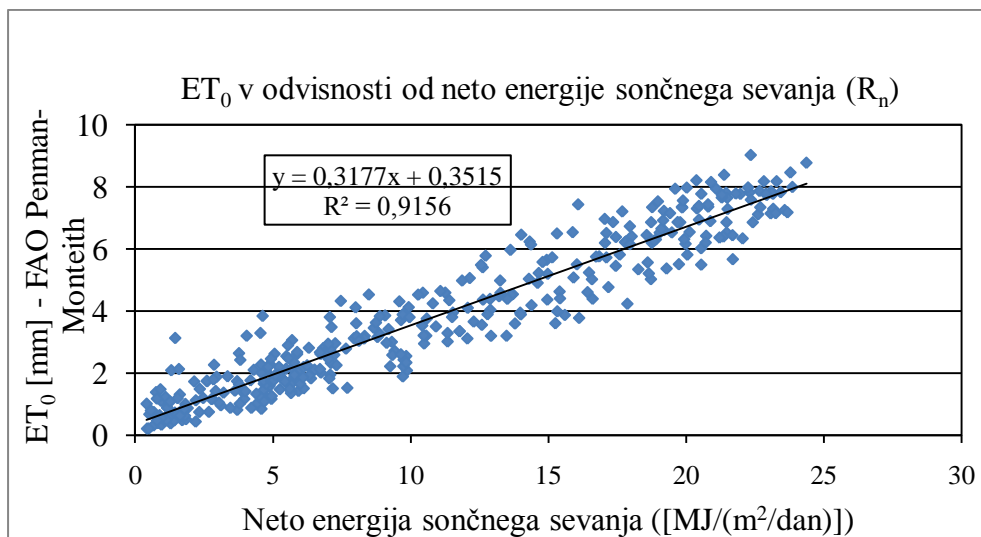
6.4.2.3 Portorož

Količina referenčne evapotranspiracije je v Portorožu močno in pozitivno povezana s povprečno dnevno temperaturo (Slika 94). Korelacijski koeficient znaša 0,841. Pri statistični analizi se je pokazala tudi zelo močna statistično značilna odvisnost s p-vrednostjo $8,58 * 10^{-88}$.



Slika 94: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od povprečne dnevne temperature v Portorožu

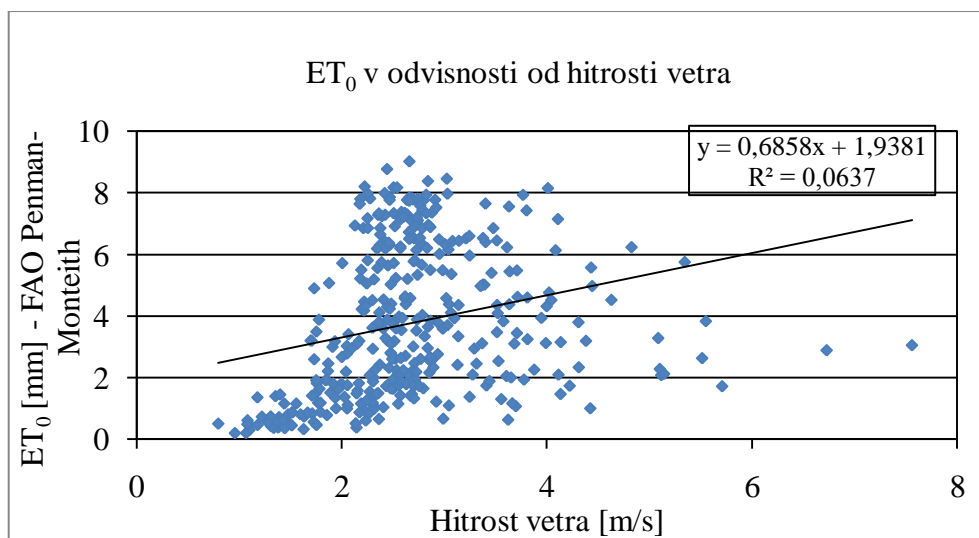
Energija sončnega sevanja v Portorožu najbolj vpliva na količino evapotranspiracije (Slika 95). Povezava med njima je pozitivna in zelo močna ($R = 0,96$), hkrati pa seveda tudi statistično zelo močno značilna s p-vrednostjo $1,61 \cdot 10^{-197}$.



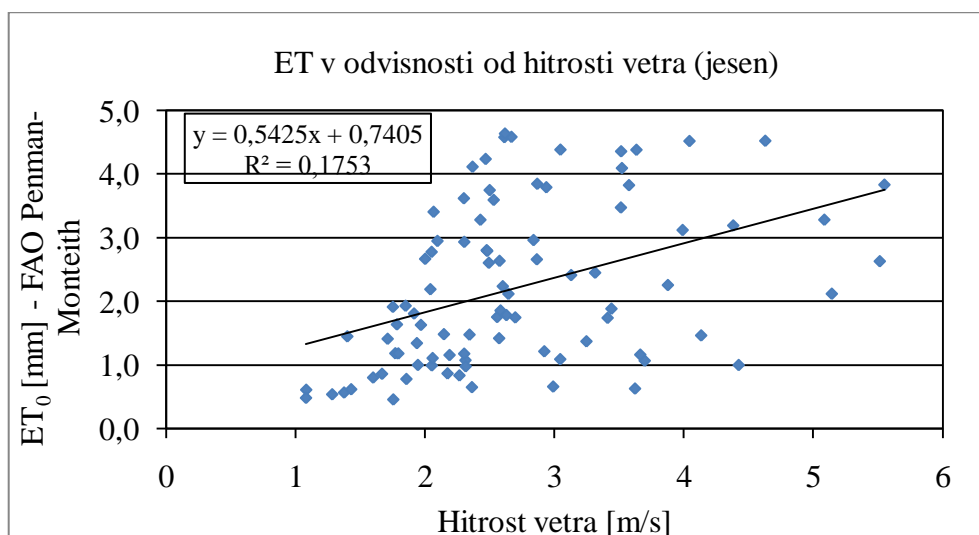
Slika 95: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od neto energije sončnega sevanja v Portorožu

Vpliv hitrosti vetra na količino evapotranspiracije skozi celo leto je prikazan na Sliki 96. Korelacijski koeficient znaša 0,252 in odraža pozitivno in zelo šibko povezanost. Kljub slabi

korelaciji pa je statistična analiza pokazala zelo močno statistično značilno povezanost ($9,98 \cdot 10^{-7}$). Povezanost med hitrostjo vetra in količino evapotranspiracije sem preverila tudi po letnih časih. Na Sliki 97 je prikazana ta odvisnost za jesensko obdobje, kjer je bila vrednost koeficienta korelacije najvišja in je znašala 0,419 (pozitivna in srednje močna povezanost).

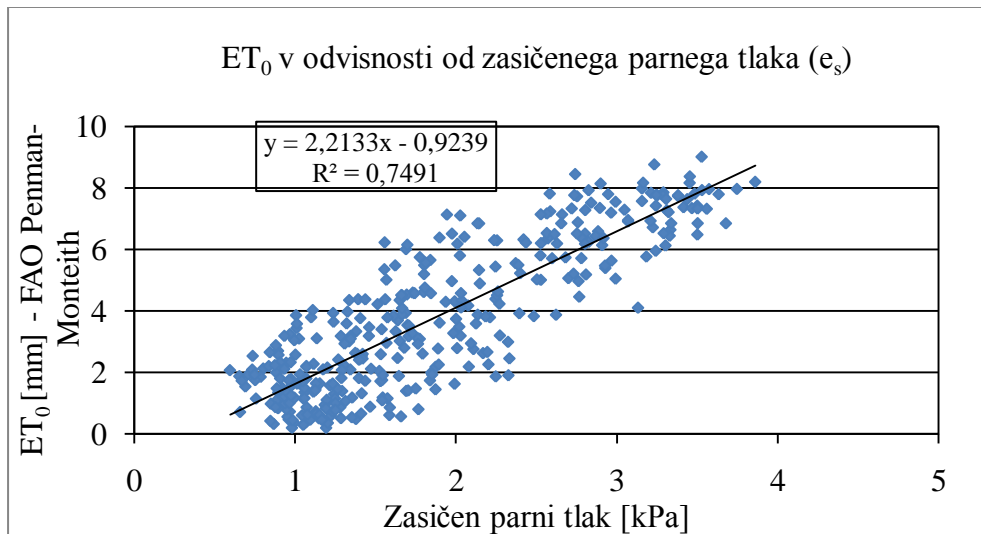


Slika 96: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od hitrosti vetra v Portorožu



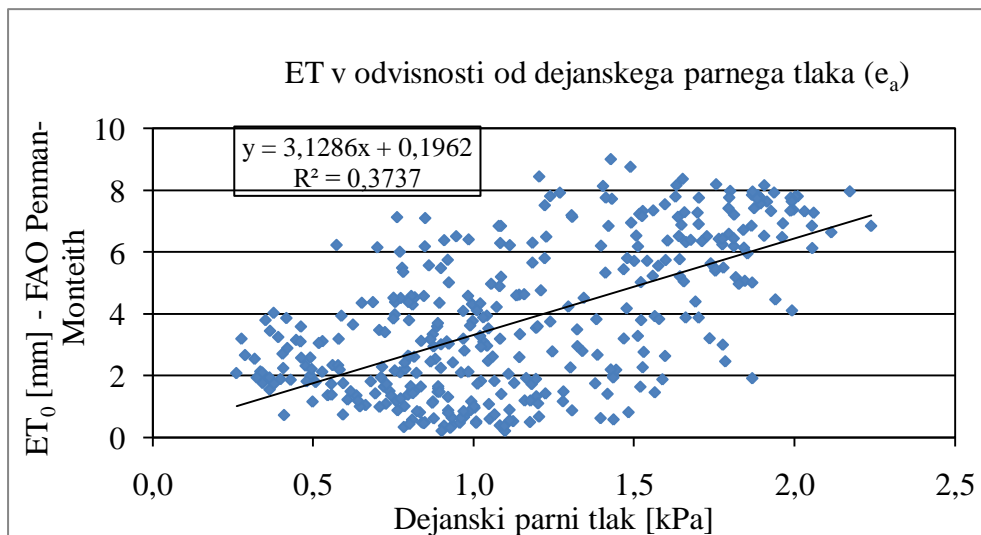
Slika 97: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od hitrosti vetra v Portorožu za obdobje jeseni

Količina referenčne evapotranspiracije se spreminja tudi s spreminjanjem zasičenega parnega pritiska (Slika 98). Njena povezanost je pozitivna in močna ($R = 0,856$).



Slika 98: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od zasičenega parnega tlaka v Portorožu

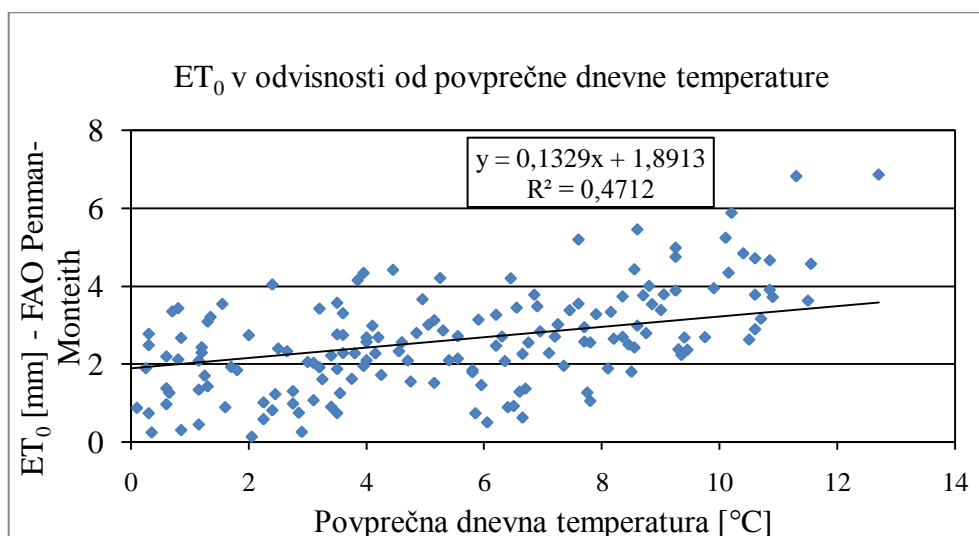
Tudi povezanost dejanskega parnega tlaka in količine evapotranspiracije je pozitivna in srednje močna – korelacijski koeficient (R) znaša 0,61 (Slika 99). Kljub srednji močni povezanosti pa je statistična analiza pokazala, da je povezanost zelo močno statistično značilna s p-vrednostjo $7,11 \cdot 10^{-39}$.



Slika 99: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od dejanskega parnega tlaka v Portorožu
Tudi v Portorožu je referenčna evapotranspiracija v največji meri odvisna od neto energije sončnega sevanja, temperature in zasičenega parnega tlaka. Statistično značilna je tudi odvisnost evapotranspiracije od hitrosti vetra.

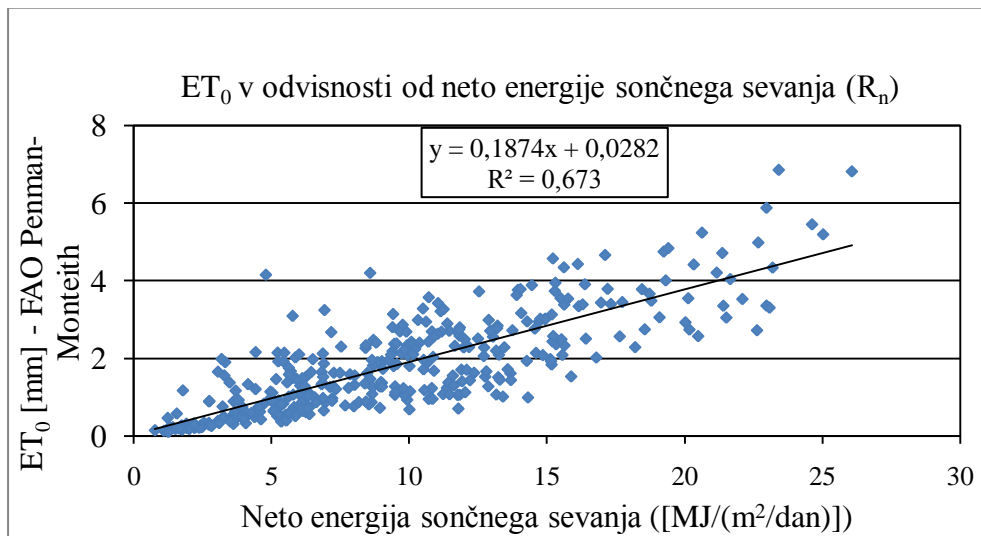
6.4.2.4 Kredarica

Odvisnost količine evapotranspiracije od povprečne dnevne temperature je na Kredarici pozitivna in srednje močna (Slika 100). To trditev dokaže vrednost korelacijskega koeficienta, ki znaša 0,69. Statistična analiza poda p-vrednost $2,64 \cdot 10^{-32}$, kar kaže, da je med njima zelo močna statistično značilna odvisnost.



Slika 100: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od povprečne dnevne temperature na Kredarici

Enako kot pri ostalih postajah, največjo odvisnost referenčne evapotranspiracije od posameznih spremenljivk izkazuje neto energija sončnega sevanja (Slika 101). Koeficient R znaša 0,82 in poda močno in pozitivno povezanost (p-vrednost $2,23 \cdot 10^{-90}$).

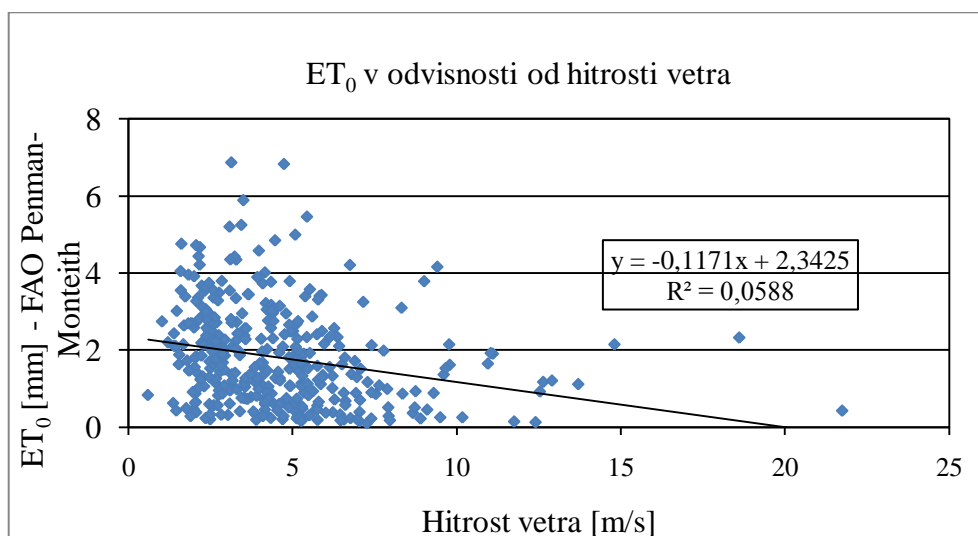


Slika 101: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od neto energije sončnega sevanja na Kredarici

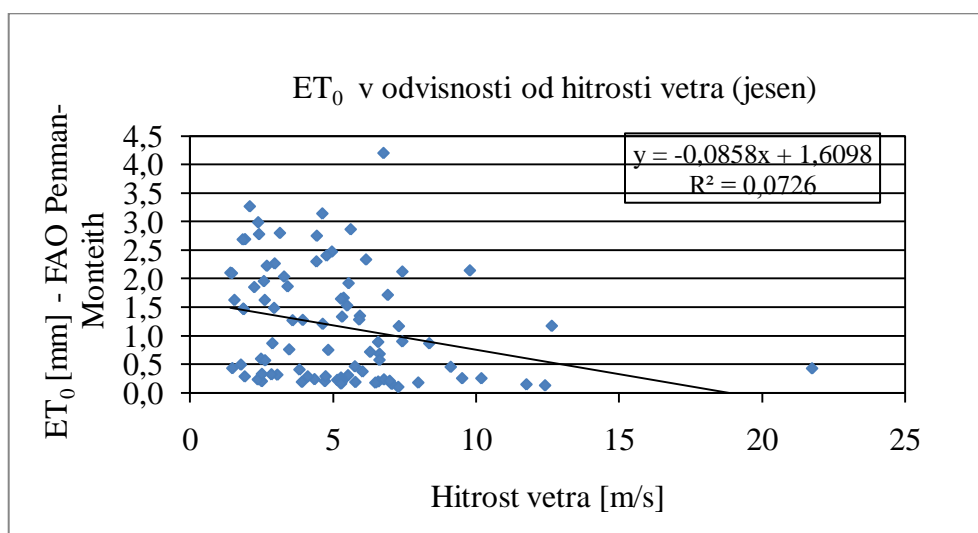
Šibko in negativno povezanost dobimo v primeru odvisnosti količine evapotranspiracije od vetra ($R = 0,242$) (Slika 102). Statistična analiza pa kljub vsemu kaže na zelo močno statistično značilno odvisnost s p -vrednostjo $2,71 \cdot 10^{-6}$. Jeseni, spomladi in poleti je povezanost med vetrom in količino evapotranspiracije negativna, medtem ko je pozimi pozitivna. Na Sliki 103 je prikazana šibka in negativna odvisnost ($R = 0,27$) hitrosti vetra in referenčne evapotranspiracije v jesenskem času.

Na Kredarici so v splošnem najnižje temperature in najvišja relativna vlaga glede na ostale obravnavane lokacije. Negativna korelacija pomeni, da se s hitrostjo vetra količina evapotranspiracije niža, zato je pomembno, da pogledamo kakšne so bile vrednosti omenjenih spremenljivk v dneh, ko je bila hitrost vetra najvišja in najnižja. 12. decembra se na Kredarici pojavi najvišja povprečna dnevna hitrost vetra, ki znaša 21,7 m/s. Na ta dan je vrednost povprečne dnevne temperature $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, povprečna dnevna relativna vlaga znaša 92 %, energija neto sevanja pa $4,6\text{ MJ/m}^2$, količina evapotranspiracije pa znaša 0,4 mm. Slednja je v primerjavi z ostalimi dnevi relativno nizka. Takšna količina evapotranspiracije se pojavi tudi v dnevih, ko je povprečna hitrost vetra precej nižja, ostale spremenljive pa so podobne, kot v omenjenem dnevu. 2. marca se pojavi druga najvišja povprečna dnevna vrednost hitrosti vetra (18,6 m/s). Na ta dan je energija neto sevanja precej višja ($11,7\text{ MJ/m}^2$), povprečna dnevna temperatura znaša $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, relativna vlaga pa 90 %. V tem primeru je količina

evapotranspiracije višja (2,3 mm). 8. marca je povprečna dnevna hitrost vetra najnižja in znaša 0,6 m/s. Na ta dan znaša energija sončnega sevanja 5,4 MJ/m², povprečna dnevna temperatura je -4,3 °C, povprečna dnevna relativna vlaga pa 95 %. Količina evapotranspiracije na ta dan znaša 0,8 mm. Če primerjamo omenjene dneve, lahko opazimo, da je povezanost med vetrom in količino evapotranspiracije precej slaba in ne kaže kakšne logične zakonitosti.

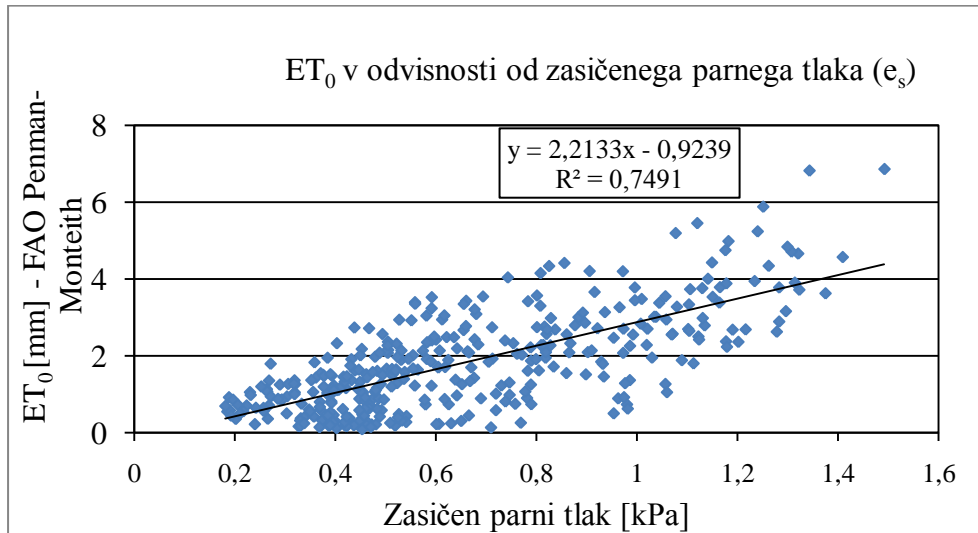


Slika 102: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od hitrosti vetra na Kredarici



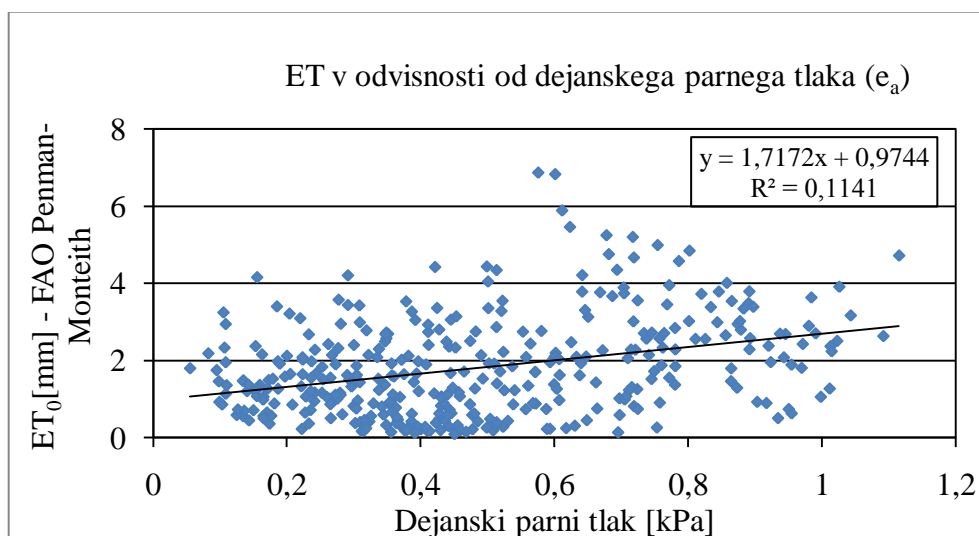
Slika 103: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od hitrosti vetra na Kredarici v jesenskem času

Vrednost zasičenega parnega tlaka in količine referenčne evapotranspiracije sta močno povezana s koeficientom korelacije, ki znaša 0,725 (Slika 104). Tudi statistična analiza je pokazala močno značilno statistično odvisnost s p-vrednostjo $4,3 \cdot 10^{-61}$.



Slika 104: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od zasičenega parnega tlaka na Kredarici

Vpliv dejanskega parnega tlaka na količino referenčne evapotranspiracije je prikazan na Sliki 105. Korelacijski koeficient R znaša 0,337 in predstavlja šibko povezanost. Kljub temu pa je statistična analiza pokazala, da velja med njima pozitivna in zelo močno statistično značilno odvisnost s p-vrednostjo $3,23 \cdot 10^{-11}$.



Slika 105: Referenčna evapotranspiracija v odvisnosti od dejanskega parnega tlaka na Kredarici

Na Kredarici je referenčna evapotranspiracija v največji meri odvisna od neto energije sončnega sevanja, temperature in zasičenega parnega tlaka. Statistično značilna povezanost vendar šibka odvisnost pa velja med evapotranspiracijo in vetrom.

7 ZAKLJUČKI

Vrednosti izračuna evapotranspiracije so odvisne od vključenosti različnih spremenljivk v proces izračuna in seveda njihove natančnosti, kar dokazujejo mnoge enačbe, ki so v praksi uporabljene. Nekatere enačbe vključujejo zgolj eno spremenljivko, druge pa tudi pet in več. Katera enačba bo na določenem območju podala najboljše rezultate je težko zagotovo trditi, lahko pa na podlagi statističnih analiz med posameznimi spremenljivkami v enačbi pokažemo, katere so tiste, ki imajo največji vpliv na količino evapotranspiracije.

V diplomski nalogi sem podrobneje predstavila obstoječe metode in enačbe za izračun referenčne evapotranspiracije, ki se v svetu največ uporabljajo. Za praktičen izračun evapotranspiracije sem uporabila le tiste, ki so bile najpogosteje uporabljene v strokovnih raziskavah: Thorntwaithova, Hargreavesova, Priestley-Taylorjeva, Makkinkova, FAO Penman-Monteithova in Turcova. Vse enačbe sem preizkusila na različnih meteoroloških postajah v Sloveniji, ki se razlikujejo glede na podnebne značilnosti, zemljepisno lego in nadmorsko višino. Tako sem količino evapotranspiracije izračunala za štiri meteorološke postaje za obdobje 2008, in sicer za Ljubljano Bežigrad, Mursko Soboto, Portorož in Kredarico. Vhodni podatki spremenljivk (hitrost vetra, sončno sevanje, relativna vlaga, temperatura in pritisk), ki jih zahtevajo enačbe, so bili izračunani iz 30-minutnih meritev na avtomatskih merilnih postajah (ARSO, 2008). Kadar so bili ti pomanjkljivi, sem za izračun povprečnih dnevni vrednosti spremenljivk uporabila podatke iz meteorološkega letopisa.

V prvem delu praktičnega dela naloge sem izvedla dnevne in mesečne izračune evapotranspiracije za vsako meteorološko postajo po vseh šestih enačbah. Rezultati izračunov so bili, zaradi različnih vhodnih podatkov, zemljepisne lege in podnebja, pričakovano različni. Primerjavo količine evapotranspiracije sem analizirala po meteoroloških postajah in po metodah izračuna. Pri primerjavi količine evapotranspiracije po različnih meteoroloških postajah, sem ugotovila, da je količina evapotranspiracije v splošnem najvišja v poletnih mesecih, najnižja pa v zimskih. Najvišje vrednosti se po vseh enačbah v pojavijo julija v Portorožu, najnižje pa decembra v Ljubljani. Prva izjema se pojavi pri Thorntwaithovi enačbi, kjer je najvišja vrednost evapotranspiracije avgusta v Ljubljani. Druga izjema pa je pri

Hargreavesovi in Turcovi enačbi, kjer so najnižje vrednosti decembra na Kredarici. V Ljubljani in Murski Soboti so vrednosti evapotranspiracije podobne.

Pri primerjavi rezultatov po metodah sem ugotovila, da si v splošnem po količini evapotranspiracije sledijo enačbe od najnižje do najvišje vrednosti po sledečem vrstnem redu: Thorntwaithova, Makkinkova, Turcova, FAO Penman-Monteithova, Priestley-Taylorjeva in Hargreavesova. Do podobnih ugotovitev so prišli tudi avtorji podobnih raziskav po svetu (Alexandris in sod., 2008; Er-Raki in sod., 2004; Irmak in sod., 2008; Lu in sod., 2005). Na vsaki izmed meteoroloških postaj se najvišje vrednosti evapotranspiracije pojavljajo po Hargreavesovi metodi, najnižje pa po Thorntwaithovi metodi. Ti dve enačbi zahtevata najmanj vhodnih podatkov, zato so njuni izračuni le groba ocena. Omeniti velja tudi to, da za Thorntwaithovo enačbo velja, da je njena uporabnost omejena v primeru, kadar so povprečne temperature manjše od 0 °C (Papadopoulou in sod., 2003). Podobno velja tudi za Turcovo enačbo. Najbolj podobni enačbi po zahtevanih vhodnih podatkih sta si Makkinkova in Turcova, kar se kaže tudi v rezultatih referenčne evapotranspiracije. Podobnost v rezultatih opažam tudi pri FAO Penman-Monteithovi in Priestley-Taylorjevi enačbi. Omenjene podobnosti ne veljajo za meteorološko postajo Kredarica, saj je tam značilen vpliv ekstremnih vremenskih pogojev.

Vrednosti enačbe FAO Penman-Monteith sem si izbrala za primerjavo z ostalimi enačbami, ker je bila predlagana za standardno metodo izračuna evapotranspiracije (Allen in sod., 1998). Vse enačbe so pokazale močno statistično povezanost z visokimi korelacijskimi koeficienti. Kljub vsemu, pa so rezultati med metodami zelo različni. Za meteorološko postajo Ljubljana so npr. vrednosti referenčne evapotranspiracije Thorntwaithove enačbe za 46 % , Turcove za 13 % in Makkinkove za 26 % nižje, medtem ko so vrednosti Hargreavesove enačbe za 130 % in Priestley-Taylorjeve za 18 % višje od vrednosti enačbe FAO Penman-Monteith. Podani rezultati pokažejo, da se vrednosti evapotranspiracije po FAO Penman-Monteith na območju Ljubljane najbolj približajo vrednosti, izračunane po Turcovi enačbi.

V zadnjem delu naloge sem analizirala vpliv dnevni vrednosti posameznih spremenljivk na količino dnevne evapotranspiracije, izračunane po FAO Penman-Monteith enačbi za vse meteorološke postaje. Rezultati so pokazali, da je referenčna evapotranspiracija na vseh

meteoroloških postajah v največji meri odvisna od neto energije sončnega sevanja, sledi temperatura in zasičeni parni tlak, najmanj pa je odvisna od hitrosti vetra.

Največji vpliv energije neto sončnega sevanja na količino evapotranspiracije se je pokazal na območju Ljubljane, kjer znaša korelacijski koeficient 0,98. Vpliv temperature na vrednost evapotranspiracije je bil najbolj izrazit v Portorožu in Murski Soboti, s korelacijskim koeficientom 0,84. Za Mursko Soboto je značilna tudi najvišja korelacija med zasičenim parnim tlakom in količino evapotranspiracije ($R = 0,88$). Statistične analize so pokazale, da je vpliv vetra v Ljubljani ($R = 0,27$), Portorožu ($R = 0,25$) in na Kredarici ($R = 0,24$) zelo šibek, vendar statistično značilen, medtem ko v Murski Soboti ($R = 0,05$) statistično značilnega vpliva na količino evapotranspiracije nismo mogli dokazati.

VIRI

Aleksandris, 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.

Alkaeed, O., Flores, C., Jinno, K., Tsutsumi, A. 2006. Comparison of several reference evapotranspiration for Itoshima Peninsula area. *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University*. 66, 1.

<http://ci.nii.ac.jp/naid/110004808450> (22.02.2011).

Allen, R.G., Walter, I.A., Elliot, R.L., Howell, D.I., Jensen, M.E., Snyder, R.L. 2005. The ASCE Standardized reference evapotranspiration equation, *Institute of the American society of Civil Engineers*, str. 2, 11, 29.

Allen, R.G., Pereira, R.S., Raes, D., Smith M. 1998. Crop evapotranspiration- guidelines for computing crop water requirements , *FAO*: 300 str.

<http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm> (23.01.2010).

Allen, R.G., Pereira, R.S., Raes, D., Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration- guidelines for computing crop water requirements , Annex 2; Estimate of evaporation rates with Penman's equation, *FAO*: 24 str.

http://www.newedengroup.org/ANNEX_II_Book_1_Estimate_of_Evaporation_with_Penman%27s_Equation.pdf (22.01.2010).

ARSO 2010. Meteorološki podatki. Message to: Vičar, Z., 23. november 2010. Osebna komunikacija.

ARSO 2009. Meteorološki letopis Slovenije 2008. str. 22,23,59.

http://www.arso.gov.si/vreme/podnebnje/meteorolo%C5%A1ki%20letopis/meteoroloski_letopisi.htm (17.01.2011).

ARSO 2008. Samodejne meteorološke postaje.

http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/image/sl/by_station_type/automatic/slovenia_map_automatic_meteo_stations_2008.png (10.01.2011).

ARSO 2004. Klimatografija Slovenije. Urad za meteorologijo. Ljubljana. str.1

http://www.arso.gov.si/vreme/poro%C4%8Dila%20in%20publikacije/Zgibanka-trajanje_soncnega_obsevanja.pdf (11.01.2011).

ASCE. 1996. Hydrology Handbook 2nd. ed. New York. str: 175, 224-227.

Bakhtiari, B., Ghahreman, N., Liaghat, A., Hoogenboom, G. 2011. Evaluation of reference evapotranspiration models for a semiarid environment using lysimeter measurements. Journal of agriculture. Science and tehnology, 13: 223-227.

Bergant, K., Cegnar, T., Dolinar, M., et.al. 2010. Okolje se spreminja: Podnebna spremenljivost Slovenije in njen vpliv na vodno okolje. Ljubljana. str: 18-28, 154.

<http://www.arso.gov.si/novice/datoteke/025928-Okolje%20se%20spreminja.pdf> (17.01.2011).

Bertalanič, R. 2003. Meteorološke meritve. ARSO, Urad za meteorologijo. Ljubljana. str.1.

http://www.arso.gov.si/vreme/poro%C4%8Dila%20in%20projekti/dr%C5%BEavna%20slu%C5%BEba/Energija_soncnega_obsevanja.pdf (17.01.2011).

Brilly, M., Šraj, M. 2005. Osnove hidrologije. UL FGG. Ljubljana: str. 1-139.

Cegnar, T. 2008. Naše okolje. 15,12 : 1-14.

Er-Raki, S., Chehbouni, G., Guemouria, N., Ezzahar, J., Duchemin, B., Boulet, G., Hadria, R., Lakhal, A., Chehbouni, A., Rodriguez, J. 2004. Measurement of evapotranspiration and development of crop coefficients of olive orchards in semi arid region (Marrakech, Morocco), Project INCO-Wademed.

Frantar, P. 2008. Vodna bilanca Slovenije 1971-2000. V: Frantar, P., Kurnik, B., Ožura, V. Členi vodne bilance – Izhlapenja. Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija Republike Slovenije za okolje, pogl. 4.2, str. 39-42.

Gautier, K. 2008. Oil, Water and Climate – An introduction, Cabride University Press, str. 177, 180.

Gleick, P.H. 1993. Water in Crisis, Oxford University, str.16.

Grismer, M.E., Orang, M., Snyder, R., Matayc, R. 2002. Pan evaporation to reference evapotranspiration conversion methods. Irrigation and drainage engineering. 128,3: 180-184.

Irmak, A., Irmak, S., Martin, D. L. 2008. Reference and crop evapotranspiration in south central Nebraska. Journal of irrigation and drainage engineering: str. 690-699.

Irmak, S., Haman, D.Z. 2003. Evapotranspiration: Potential or reference. Agricultural and Biological Engineering Department, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.

<http://edis.ifas.ufl.edu/ae256> (10.02.2010).

Kastelec, D., Rakovec, J., Zakšen, K. 2007. Sončna energija v Sloveniji. ZRC SAZU. Ljubljana. str. 28.

Lu, J., Sun, G., McNulty, S. G., Amataya, D., M. 2005. A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeasteren united states. Journal of the American water resources association, 24, 3: 621-633.

Martinez, C. J., Thepadia, M., 2010. Estimating reference evapotranspiration with minimum data in Florida. Journal of irrigation and drainage engineering: 494-501.

Martinez-Cob, A., Tejero-Juste, M. 2004. A wind based qualitative calibration of the Hargreaves ET₀ estimation equation in semiarid regions. Agricultural Water Management 64: 251-264.

Matičič, B. 1977. Evapotranspiration studies on different crops and irrigation water requirements. Ljubljana, Agricultural Engineering Department: 221 str.

Mikoš, M., Kranjc, A., Matičič, B., Muller, J., Rakovec, J., Roš, M., Brilly, M. 2002. Hidrološko izrazje = Terminology in hydrology. Acta hydrotehnica 20,32., Ljubljana, str. 14,149, 198, 212, 215.

ftp://ksh.fgg.uni-lj.si/acta/a32_1.pdf (10.02.2010).

Nadbath, M. 2010. Opis meteoroloških postaj. Message to: Nadbath, M., 4. januar 2011. Osebna komunikacija.

Oliver, J.E. 2005. Encyclopedia of world climatology. Cornwall, MPG Books, str. 372.

Papadopoulou, E., Varanou, E., Baltas, E., Dassaklis, A., Mimikou, M. 2003. Estimating potential evapotranspiration and its spatial distribution in Greece using empirical methods. Proceedings of the 8th International Conference on Environmental Science and Technology, B: 650-658.

http://www.gnest.org/cest8/8cest_papers/abstracts_pdf_names/posters_abs/p198_Papadopoulou.pdf (06.02.2011).

Prohaska, S.J. 2003. Hidrologija 1.deo (hidro-meteorologija, hidrometrija i vodni režim), Rudarsko-geološki fakultet, Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi, Republiški hidrometeorološki zavod Srbije: str. 204-244.

Rakovec, J., Vrhovec, T. 2007. Osnove meteorologije za naravoslovce in tehnike. Ljubljana, Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije: str. 59.

Raspor, K. 2007. Meritve in analiza transpiracije listnatega gozda na povodju Dragonje. Diplomaska naloga. Ljubljana, UL FGG, Smer Vodarstvo in komunalno inženirstvo: 88 str.

Raspor, K. 2006. Gozdni hidrološki krog s poudarkom na transpiraciji. Seminarska naloga, Ljubljana, UL FGG, Smer Vodarstvo in komunalno inženirstvo: 99 str.

Rovan, J., Korenjak, S., Pfajfar, L. 2009. Statistični obrazci in tabele. Ljubljana, Ekonomska fakulteta : str 41.

Sau, F., Lopez - Cedron, F.X., Minguez, M.I. Reference evapotranspiration: Choice of method, Univerza de Santiago de Compostela, Madrid.

<http://agromet-cost.bo.ibimet.cnr.it/fileadmin/cost718/repository/sau1.pdf> (22.01.2010).

Savič, V. 2010. Meteorološka postaja Murska Sobota. Message to: Savič, V., 9. januar 2011. Osebna komunikacija.

Shuttleworth, W. J. Evaporation. 1993 V: Maidment, D.R. Handbook of hydrology. New York, McGraw-hill, Inc.: pogl. 4.

Trajković, S., Stojnić, V. 2007. Effect of wind speed on accuracy of Turc method in a humid climate, Architecture and Civil Engineering. 5, 2: 107-113.

Tyree, M.T. 2000. Water relation of plants. V: Baird A.J. Eco-hydrology: Plants and water in Terrestrial and aquatic Environments. Wilby R.L. (Eds.). Routledge, London: 2, 11-38.

Vičar, Z. 2010. Meritve meteoroloških spremenljivk. Message to: Vičar, Z., 12. januar 2011. Osebna komunikacija.

Ward, A.D., Trimble, S.W. 2004. Environmental Hydrology- second edition, Florida, CLC Press LLC: str.1-7, 83-117.

Watson, I., Burnett, A.D. 1995. Hydrology an environmental approach, Florida, CLC Press LLC: str. 433.

Xu, C., Y., Singh, V., P. 2002. Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. Water resources Management 16: str. 179-219.

Yoshida, S. 1981. Fundamentals of rice crop science. Manila, The international rice research institute, str. 102-103.

Young, G.J., Dooge, J.C.I., Rodda, J.C. 1994. Global water resource issues. Cambridge, Press Syndicate of the University of Cambridge: str. 90.

SEZNAM OSTALE LITERATURE

Arhiv agencije Republike Slovenije za okolje, Ljubljana.

Estimating crop evapotranspiration from reference evapotranspiration and crop coefficients. Prikaz koeficienta rastline v odvisnosti od faze rasti rastline.
<http://elkhorn.unl.edu/epublic/pages/publicationD.jsp?publicationId=1237>, (11.05.2010).

Evaporation EA Evapotranspiration. Pichejev evaporimeter.
<http://medhycos.mpl.ird.fr/en/data/hyd/Drobot/2C.htm> (11.05.2010).

Kipp&Zonnen. Piranometer CMP6.
<http://www.kippzonen.com/?product/1251/CMP+6.aspx> (17.01.2011).

Kurnik, B. 2002. Primerjava različnih metod za izračun referenčne evapotranspiracije v Sloveniji. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko, Oddelek za meteorologijo: 66 f.

K3JAE- Weather Station. Povprečna letna evapotranspiracija po svetu, izražena v milimetrih.
<http://www.k3jae.com/wxevapotranspiration.php> (10.06.2010).

Museum of geostrophysics national observatory of Athens. Wildov evaporimeter.
<http://www.noa.gr/museum/english> (10.03.2010).

Ostaneč, L. 1965. Poročilo o izvajanju naloge; Evaporacija, evapotranspiracija in vlaga v zemljini, 1.del. Hidrometeorološki zavod SRS, Ljubljana: 17 f.

Ostanek, L.1965. Poročilo o izvajanju naloge; Evaporacija, evapotranspiracija in vlaga v zemljini, 2.del. Hidrometeorološki zavod SRS, Ljubljana: 35 f.

Plant hormones. Prikaz stomate.

<http://www.cartage.org.lb/en/themes/sciences/botanicalsciences/PlantHormones/PlantHormones/PlantHormones.htm> (10.06.2010).

Vaisala. Avtomatska postaja, na katero so lahko priključeni različni senzorji.

<http://www.vaisala.com/en/defense/products/automaticweatherstations/Pages/MAWS100.aspx> (16.01.2011).

Vaisala. Anemometer WAA151.

[http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/User%20Guides%20and%20Quick%20Ref%20Guides/WAA151 User Guide in English.pdf](http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/User%20Guides%20and%20Quick%20Ref%20Guides/WAA151%20User%20Guide%20in%20English.pdf), (17.01.2011).

Vaisala. Anemometer WS425.

<http://www.vaisala.com/en/meteorology/products/weatherinstruments/windsensors/Pages/WS425.aspx> (17.01.2011).

Vaisala. Senzor HMP155.

<http://www.vaisala.com/Vaisala%20Documents/User%20Guides%20and%20Quick%20Ref%20Guides/HMP155%20Quick%20Reference%20Guide%20-%20M210913EN-C.pdf> (17.01.2011).