

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*



ANDREJA MEDVED

**OPAZOVANJE SUŠE S SATELITSKIMI
POSNETKI – UPORABNOST INDEKSOV STANJA
VEGETACIJE IN STANDARDIZIRANEGA
PADAVINSKEGA INDEKSA**

MAGISTRSKO DELO

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM DRUGE STOPNJE
GEODEZIJA IN GEOINFORMATIKA**

Ljubljana, 2018

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

**MAGISTRSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM DRUGE
STOPNJE GEODEZIJA IN
GEOINFORMATIKA**

Kandidat/-ka:

ANDREJA MEDVED

**OPAZOVANJE SUŠE S SATELITSKIMI
POSNETKI – UPORABNOST INDEKSOV STANJA
VEGETACIJE IN STANDARDIZIRANEGA
PADAVINSKEGA INDEKSA**

**OBSERVATION OF DROUGHT WITH
SATELLITE IMAGERY – USEFULNESS OF
VEGETATION CONDITION INDEX AND
STANDARDIZED PRECIPITATION INDEX**

Mentor/-ica:

prof. dr. Krištof Oštir

Predsednik komisije:

Somentor/-ica:

doc. dr. Žiga Kokalj

Član komisije:

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

» Ta stran je namenoma prazna«.

BIBLIOGRAFSKO–DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVELČEK

UDK:	551.577.38:528.7(497.4)(043.3)
Avtor:	Andreja Medved, dipl. inž. geod. (UN)
Mentor:	prof. dr. Krištof Oštir
Somentor:	doc. dr. Žiga Kokalj
Naslov:	Opazovanje suše s satelitskimi posnetki – uporabnost indeksov stanja vegetacije in standardiziranega padavinskega indeksa
Tip dokumenta:	magistrsko delo
Obseg in oprema:	70 str., 22 pregl., 19 sl., 27 graf., 16 en., 1 pril.
Ključne besede:	normirani diferencialni vegetacijski indeks, standardizirani padavinski indeks, stanje vegetacije, suša, korelacija

Izvleček

Namen magistrske naloge je bil preučiti uporabnost indeksa stanja vegetacije in standardiziranega padavinskega indeksa za opazovanje suše s satelitskimi posnetki. Uporabnost indeksov smo preverjali na območju meteoroloških postaj Lendava, Ljubljana Bežigrad, Novo mesto in Postojna, na podlagi izbranih točk, za katere imamo podatke o dejanski rabi tal (listnati gozd, mešana raba, polja, travniki, vinogradi, iglasti gozd in nasadi). Za izbrane točke smo pridobili podatke o časovnih serijah produkta MODIS MOD13Q1 in izračunali indeks stanja vegetacije. Izračunane vrednosti standardiziranega padavinskega indeksa (SPI1, SPI2, SPI3, SPI4, SPI6, SPI9, SPI12) smo primerjali z indeksom stanja vegetacije. Primerjavo smo naredili z namenom, da bi ugotovili kako sta indeksa med seboj koreliranega oz. s tem bi pridobili podatek, po kolikšnem času se vegetacija odzove na primanjkljaj padavin. Na podlagi rezultatov smo komentirali uporabnost indeksov in podali bistvene ugotovitve.

» Ta stran je namenoma prazna«.

BIBLIOGRAPHIC–DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 551.577.38:528.7(497.4)(043.3)

Author: Andreja Medved, B. Sc.

Supervisor: Prof. Krištof Oštir, Ph. D.

Co-supervisor: Assist. Prof. Žiga Kokalj, Ph. D.

Title: Observation of drought with satellite imagery – usefulness of Vegetation Condition Index and Standardized Precipitation Index

Document type: Master's Thesis

Scope and tools: 70 p., 22 tab., 19 fig., 27 graph., 16 eq., 1 ann.

Keywords: Normalized Difference Vegetation Index, Standardized Precipitation Index, Vegetation Condition Index, drought, correlation

Abstract

The purpose of the Master's Thesis was to study the usefulness of Vegetation Condition Index and Standardized Precipitation Index, for observing droughts with satellite imagery. The usefulness of the indices was checked in the area of meteorological stations Lendava, Ljubljana Bežigrad, Novo mesto and Postojna, for which we have information on actual land use (deciduous forest, mixed land-use, fields, meadows, vineyards, coniferous forest and plantations). For selected points, we obtained data on time series MODIS MOD13Q1 and calculated Vegetation Condition Index. The calculated values of the Standardized Precipitation Index (SPI1, SPI2, SPI3, SPI4, SPI6, SPI9, SPI12) we compared with Vegetation Condition Index. A comparison was made in the order to find out, how the indices were correlated with each other. This would provide information on the extent, to which the vegetation response to the precipitation deficit. Based on the results, we commented on the usefulness of the indices and made important findings.

» Ta stran je namenoma prazna«.

ZAHVALA

Posebna zahvala gre mentorju prof. dr. Krištofu Oštirju in somentorju doc. dr. Žigu Kokalju za strokovno vodenje, vsestransko pomoč in koristne nasvete med nastajanjem magistrske naloge.

Zahvaljujem se tudi univ. dipl. inž. Petru Pehaniju za pridobitev podatkov, ki smo jih potrebovali za magistrsko nalogo.

Nazadnje se zahvaljujem tudi moji družini, ki me je v času študija spodbujala in mi stala ob strani.

» Ta stran je namenoma prazna«.

KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO–DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVELČEK	V
BIBLIOGRAPHIC–DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	VII
ZAHVALA.....	IX
KAZALO VSEBINE.....	XI
OKRAJŠAVE	XVII
1 UVOD	1
1.1 Motiv za izbiro tematike magistrskega dela	2
1.2 Namen in cilj magistrske naloge	3
1.3 Delovne hipoteze.....	4
1.4 Struktura naloge.....	4
2 TEORETIČNA IZHODIŠČA	5
2.1 Suša in podnebne spremembe	5
2.2 Indeks stanja vegetacije (VCI).....	7
2.3 Standardizirani padavinski indeks (SPI)	10
2.4 MODIS	16
3 ŠTUDIJSKO OBMOČJE IN UPORABLJENI PODATKI	18
3.1 Produkt MODIS MOD13Q1	19
3.2 Meteoroloških postaje	19
3.2.1 Meteorološka postaja Lendava	20
3.2.2 Meteorološka postaja Ljubljana Bežigrad	20
3.2.3 Meteorološka postaja Novo mesto	21
3.2.4 Meteorološka postaja Postojna	22
3.3 Podatki dejanske rabe za izbrane točke	23
4 OBDELAVA PODATKOV IN REZULTATI	27
4.1 Izračun standardiziranega padavinskega indeksa (SPI)	27
4.1.1 SPI za postajo Lendava	30
4.1.2 SPI za postajo Ljubljana Bežigrad	32
4.1.3 SPI za postajo Novo mesto	34
4.1.4 SPI za postajo Postojna.....	35
4.2 Izračun indeksa stanja vegetacije (VCI)	40
4.2.1 VCI Lendava	40
4.2.2 VCI Ljubljana Bežigrad	43

4.2.3	VCI Novo mesto	45
4.2.4	VCI Postojna.....	47
4.3	Korelacija med indeksom stanja vegetacije (VCI) in standardiziranega padavinskega indeksa (SPI)	53
4.4	Korelacija med indeksom stanja vegetacije (VCI) in indeksom vlažnosti tal (SWI).....	58
5	IZDELAVA MODELA–STROJNO UČENJE	60
6	ZAKLJUČEK	64
	VIRI	66

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Klasifikacija VCI (Zambrano in sod., 2016).....	9
Preglednica 2: Klasifikacija indeksa SPI s pripadajočimi verjetnost za pojav suše (Ceglar in Kajfež-Bogataj, 2008).....	14
Preglednica 3: Značilnosti senzorja MODIS (MODIS, 2018b).	17
Preglednica 4: Prikaz števila točk, glede na dejansko rabo po meteoroloških postajah.....	23
Preglednica 5: Najnižje vrednosti indeksa SPI s pripadajočimi količinami padavin določenimi za obdobje 1987–2017 na meteorološki postaji Lendava.	32
Preglednica 6: Najnižje vrednosti indeksa SPI s pripadajočimi količinami padavin določenimi za obdobje 1987–2017 na meteorološki postaji Ljubljana Bežigrad.	34
Preglednica 7: Najnižje vrednosti indeksa SPI s pripadajočimi količinami padavin določenimi za obdobje 1987–2017 na meteorološki postaji Novo mesto.	35
Preglednica 8: Najnižje vrednosti indeksa SPI s pripadajočimi količinami padavin določenimi za obdobje 1987–2017 na meteorološki postaji Postojna.	37
Preglednica 9: Korelacija med indeksom VCI in SPI za Lendavo v obdobju od leta 2001 do 2017, izračunana s Pearsonovim koeficientom korelacije.	54
Preglednica 10: Korelacija med indeksom VCI in SPI za Lendavo v obdobju od leta 2001 do 2017, z odstranitvijo trenda.....	55
Preglednica 11: Korelacija med indeksom VCI in SPI za Ljubljana Bežigrad v obdobju od leta 2001 do 2017, izračunana s Pearsonovim koeficientom korelacije.	55
Preglednica 12: Korelacija med indeksom VCI in SPI za Ljubljana Bežigrad v obdobju od leta 2001 do 2017, z odstranitvijo trenda.	55
Preglednica 13: Korelacija med indeksom VCI in SPI za Novo mesto v obdobju od leta 2001 do 2017, izračunana s Pearsonovim koeficientom korelacije.	55
Preglednica 14: Korelacija med indeksom VCI in SPI za Novo mesto v obdobju od leta 2001 do 2017, z odstranitvijo trenda.....	56
Preglednica 15: Korelacija med indeksom VCI in SPI za Postojno v obdobju od leta 2001 do 2017, izračunana s Pearsonovim koeficientom korelacije.	56
Preglednica 16: Korelacija med indeksom VCI in SPI za Postojno v obdobju od leta 2001 do 2017, z odstranitvijo trenda.....	56
Preglednica 17: Korelacije med letnim povprečjem SPI in VCI v obdobju od leta 2001 do 2017.	56
Preglednica 18: Korelacije med VCI in SWI v obdobju od leta 2007 do 2017, izračunana s Pearsonovim koeficientom korelacije.	59
Preglednica 19: Korelacije med VCI in SWI v obdobju od leta 2007 do 2017, z odstranitvijo trenda.	59
Preglednica 20: Preglednica izdelanih modelov a) mešana raba, b) polja, c) travniki, č) vinogradi, d) gozd, e) nasadi.....	61

Preglednica 21: Skupna natančnost modelov.	63
Preglednica 22: Natančnost modelov ločeno za določanje suše in ne suše.	63

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Prikaz zastopanost dejanske rabe izražene v odstotkih za izbran vzorec točk	26
Grafikon 2: Letna količina padavin za meteorološko postajo Lendava v obdobju 1987–2017.....	28
Grafikon 3: Letna količina padavin za meteorološko postajo Ljubljana Bežigrad v obdobju 1987–2017.	29
Grafikon 4: Letna količina padavin za meteorološko postajo Novo mesto v obdobju 1987–2017.....	29
Grafikon 5: Letna količina padavin za meteorološko postajo Postojna v obdobju 1987–2017.....	30
Grafikon 6: SPI1 v obdobje 1987–2017 za meteorološko postajo Lendava.....	31
Grafikon 7: SPI12 v obdobje 1987–2017 za meteorološko postajo Lendava.....	32
Grafikon 8: SPI1 v obdobje 1987–2017 za meteorološko postajo Ljubljana Bežigrad.....	33
Grafikon 9: SPI12 v obdobje 1987–2017 za meteorološko postajo Ljubljana Bežigrad.....	33
Grafikon 10: SPI1 v obdobje 1987–2017 za meteorološko postajo Novo mesto.....	34
Grafikon 11: SPI12 v obdobje 1987–2017 za meteorološko postajo Novo mesto.....	35
Grafikon 12: SPI1 v obdobje 1987–2017 za meteorološko postajo Postojna.....	36
Grafikon 13: SPI12 v obdobje 1987–2017 za meteorološko postajo Postojna.....	36
Grafikon 14: Prikaz indeksa SPI1 za meteorološko postajo Lendava, Ljubljana Bežigrad, Novo mesto in Postojna v obdobju 1987–2017.	38
Grafikon 15: Prikaz indeksa SPI12 za meteorološko postajo Lendava, Ljubljana Bežigrad, Novo mesto in Postojna v obdobju 1987–2017.	39
Grafikon 16: Časovna vrsta interpoliranega in zglajenega indeksa NDVI za izbrano točko.	40
Grafikon 17: Prikaz intenzitete VCI za Lendavo po dejanskih rabah.	42
Grafikon 18: Prikaz intenzitete VCI za Ljubljana Bežigrad po dejanskih rabah.....	44
Grafikon 19: Prikaz intenzitete VCI za Novo mesto po dejanskih rabah.	46
Grafikon 20: Prikaz intenzitete VCI za Postojno po dejanskih rabah.	48
Grafikon 21: Prikaz intenzitete VCI (ob upoštevanju vseh rab) po izbranih meteoroloških postajah... 50	
Grafikon 22: Graf kvartilov VCI za Lendavo.	51
Grafikon 23: Graf kvartilov VCI Ljubljana Bežigrad.	51
Grafikon 24: Graf kvartilov VCI Novo mesto.....	52
Grafikon 25: Graf kvartilov VCI Postojna.	52
Grafikon 26: Prikaz suše v odstotkih glede na vrednosti VCI za vse štiri meteorološke postaje.....	53
Grafikon 27: Primerjava povprečne vrednosti VCI in SPI2 po letih a) Lendava, b) Ljubljana Bežigrad, c) Novo mesto, č) Postojna.....	58

KAZALO SLIK

Slika 1: Suša v Evropi v obdobju 2002–2012 (European Environment Agency, 2018).....	3
Slika 2: Diagram poteka magistrske naloge.	3
Slika 3: Prikaz povzročene škode zaradi naravnih nesreč po regijah (Hozjan, 2015).....	5
Slika 4: Razvoj suše skozi čas (Kobold in Sušnik, 2003)	6
Slika 5: Prikaz odstopanj globalnih temperatur od povprečja za leto (a) 1885, (b) 1950, (c) 1990, (č) 2007 (NASA, 2018).	7
Slika 6: Porazdelitev poletnih količin padavin za Ljubljano za obdobje 1961–2000 (Gregorič in Ceglar, 2007).....	11
Slika 7: Pretvorba poletnih padavin za obdobje 1961–2000 v indeks SPI (Gregorič in Ceglar, 2007). 12	
Slika 8: Prikaz povprečja indeksa SPI3 izračunanega 15. junija, po katastrskih občinah za obdobje 2000–2013 (ARSO, 2018a).....	15
Slika 9: Prikaz povprečja indeksa SPI4 izračunanega 1. septembra, po katastrskih občinah za obdobje 2000–2012 (ARSO, 2018a).....	15
Slika 10: Senzor MODIS (Wikimedia, 2018)	17
Slika 11: Prikaz izbranih meteoroloških postaj in točk, za katere imamo podatke o dejanski rabi in časovni seriji MODIS produktov.	18
Slika 12: Meteorološka postaja Ljubljana Bežigrad (Nadbath, 2008).	21
Slika 13: Meteorološki postaji Novo mesto (Lokalno.si, 2009).....	22
Slika 14: Meteorološka postaja Postojna (Nadbath, 2007).	22
Slika 15: Izbrane točke za opazovanje suše na vplivnem območju meteorološke postaje Lendava.	24
Slika 16: Izbrane točke za opazovanje suše na vplivnem območju meteorološke postaje Ljubljana Bežigrad.	24
Slika 17: Izbrane točke za opazovanje suše na vplivnem območju meteorološke postaje Novo mesto.	25
Slika 18: Izbrane točke za opazovanje suše na vplivnem območju meteorološke postaje Postojne.	25
Slika 19: Diagram poteka izračuna indeksa VCI in SPI ter njune korelacije.....	27

» Ta stran je namenoma prazna«.

OKRAJŠAVE

AIRS	Atmospheric Infrared Sounder
AMSR-E	Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System
ARSO	Agencija Republike Slovenije za okolje
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CERES	Clouds and the Earth's Radiant Energy System
EVI	Enhanced Vegetation Index (izboljšani vegetacijski indeks)
fAPAR	Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation (frakcija absorbiranega aktivnega fotosintetskega sevanja)
LAI	Leaf area index (indeks listne površine)
MISR	Multi-angle Imaging SpectroRadiometer
MKGP	Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MOPITT	Measurement of Pollution in the Troposphere
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index (normirani diferencialni vegetacijski indeks)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (Nacionalna uprava za oceane in atmosfero)
SPI	Standardized Precipitation Index (standardizirani padavinski indeks)
SWI	Soil Water Index (indeks vlažnosti tal)
VCI	Vegetation Condition Index (indeks stanja vegetacije)
VI	Vegetation Index (vegetacijski indeks)
ZRC SAZU	Znanstvenoraziskovalni center Slovenske akademije znanosti in umetnosti

» Ta stran je namenoma prazna«.

1 UVOD

Suša je stanje v naravi, ki nastane zaradi dolgotrajnega pomanjkanja padavin na nekem območju, povišane temperature ... Ko si zastavimo vprašanje, kaj je pomanjkanje padavin na nekem območju, naletimo na veliko problemov. Tako kmalu ugotovimo, da univerzalne definicije suše ne poznamo. Lahko pa rečemo, da je suša ena izmed najbolj kompleksnih naravnih nesreč, saj je njen začetek počasen in težko določljiv v prostoru in času ter njen vpliv običajno dolgotrajen (Brenčič, 2017; Zambrano in sod., 2016).

V splošnem obstajata dve definiciji suše, in sicer operativna in pojmovna. Pojemovna suša opredeli pojem suše. Mi smo se osredotočili na operativno sušo. Ta pomaga določiti začetek, konec, trajanje, intenziteto in pogostost suše. Začetek in konec suše sta težko določljiva, zaznamo jih lahko z zamikom. Začetek suše lahko običajno zaznamo šele kasneje, ko se je ta že začela (ko se število sušnih dni nadaljuje in se ne konča). Za konec sušne dobe velja podobno, saj ga lahko zaznamo šele po tem, ko si po nekaj padavinskih dneh rastline opomorejo. Določanje operativne suše se ponavadi določa na osnovi odstopanj količin padavin, temperature itd. od dolgoletnega povprečja (Brenčič, 2017; Ceglar in Kajfež-Bogataj, 2008; Zambrano in sod., 2016).

Sušo Zambrano in sod. (2016) delijo v štiri kategorije:

- meteorološka suša,
- hidrološka suša,
- kmetijska suša in
- socialno-ekonomska suša.

Meteorološka suša je odvisna predvsem od odstopanja količine padavin od dolgoletnega povprečja in dolžine časovnega obdobja, v katerem ni bilo padavin. Samo s podatkom o količini padavin ni mogoče kakovostno določiti suše, uporabimo jih tam, kjer drugih podatkov na podlagi katerih bi lahko določili sušo ni.

Hidrološka suša se pojavi po daljšem obdobju brez padavin, kar se odraža v pomanjkanju podtalnih in površinskih zalog vode.

Kmetijska suša nastopi, ko rastlinam primanjkuje vode za normalno rast, odvisna pa je tudi od količine zalog vode v tleh. Poleg tega je količina vode, ki jo potrebuje posamezna rastlinska vrsta za rast, odvisna tudi od vlažnosti in temperature ozračja, sestave tal, razvojen faze rastline in njene biološke sestave.

O socialno-ekonomski suši govorimo, ko pomanjkanje količine padavin vpliva na ljudi. Meteorološko, kmetijsko in hidrološko sušo lahko opazujemo na podlagi izračunanih sušnih indeksov (Ceglar in Kajfež-Bogataj, 2008).

Za spremljanje suše je bilo razvitih in uporabljenih veliko število različnih indeksov. Poznamo več kot 100 indeksov za spremljanje suše, ki pri svojem izračunu uporabljajo podatke o temperaturi ozračja, padavinah (Zambrano in sod., 2016) ...

V praksi se največkrat uporabljajo indeksi suše, pri katerih potrebujemo za izračun le količino padavin, saj se ti podatki o padavinah najbolj pogosto beležijo. Najbolj preprost indeks za opazovanje suše je standardizirani padavinski indeks (v nadaljevanju SPI, ang. Standardized Precipitation Index), ki se uporablja za določanje meteorološke suše.

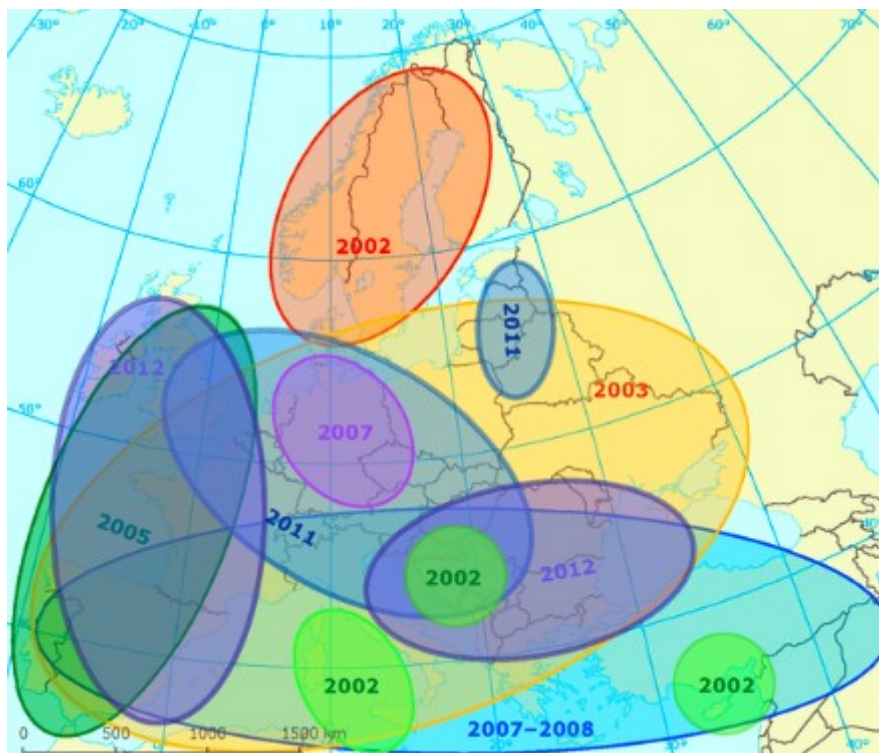
Uporaba daljinskega zaznavanja za opazovanje suše ima več prednosti še posebej v državah v razvoju z omejenimi zgodovinskimi meteorološkimi zapisi in manjšim številom meteoroloških postaj. Pomanjkanje meteoroloških podatkov iz preteklosti je lahko tudi posledica ekonomskih problemov in političnih konfliktov. Pogosto meteorološki zapisi niso popolni in niso na voljo v realnem času. Določanje suše na podlagi daljinskega zaznavanja omogoča boljše časovno in prostorsko določitev indeksa, kot določitev indeksa, ki se nanaša zgolj na podatke pridobljene na podlagi meteoroloških postaj. Omogoča tudi spremljanje suše na večjih območjih. Z indeksom pridobljenim na podlagi daljinskega zaznavanja lahko določimo začetek suše, konec suše, trajanje suše, intenziteto in prostorski obseg suše. Zaradi zapletenosti suše poteka stalen razvoj in izboljšave indeksov, ki jih uporabljajo pri daljinskem zaznavanju za zaznavanje suše (Zambrano in sod., 2016).

1.1 Motiv za izbiro tematike magistrskega dela

Pogosto suša pušča velike negativne posledice, saj prizadene ljudi in povzroča veliko materialno škodo. Ljudje se njenega pojava zavemo prepozno, da bi lahko pravočasno in ustrezno odreagirali. V magistrski nalogi smo poizkušali ugotoviti uporabnost indeksov stanja vegetacije indeks (v nadaljevanju VCI, ang. Vegetation Condition Index) in standardiziranega padavinskega indeksa, za spremljane suše na podlagi satelitskih posnetkov.

Suša je v Evropi v zadnjih 30 letih povzročila za okrog 100 milijard evrov škode. Povprečna letna škoda povzročena zaradi posledic suše od leta 1991 je 5,3 milijarde evrov. Najhujša suša je bila leta 2003 (slika 1), ki je zajela tretjino ozemlja Evropske unije in na njem prizadela več kot 100 milijonov ljudi. Med letoma 1967 in 2006 se je število območji in število ljudi, ki jih je prizadela suša povečalo za skoraj 20 %. Ocenjuje se, da je možnost zmanjšanja pridelka zaradi suše 50 % do leta 2050 (Sušnik, 2014).

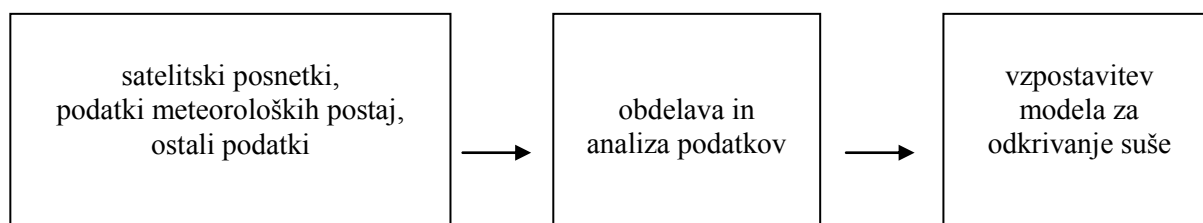
Slika 1 prikazuje glavne sušne dogodke v obdobju 2002–2012 v Evropi. Vidimo, da je najbolj obsežna suša Evropo v tem obdobju zajela leta 2003.



Slika 1: Suša v Evropi v obdobju 2002–2012 (European Environment Agency, 2018).

1.2 Namen in cilj magistrske naloge

V magistrski nalogi smo preučili uporabnost indeksov stanja vegetacije (VCI) in standardiziranega padavinskega indeksa (SPI) za opazovanje suše s satelitskimi posnetki na slovenskem ozemlju. Naš namen je bil, da na podlagi izbranih točkah ugotovimo ali sta indeksa med seboj korelirana. Izbrane točke smo razdeli glede na njihovo dejansko rabo tal (listnati gozd, mešana raba, polja, travniki, vinogradi, iglasti gozd in nasadi) in izračunali korelacije med indeksoma. Ker indeksa VCI in SPI omogočata pridobivanje podatkov o stanju suše, se postavi vprašanje ali lahko z njima postavimo model za opazovanje suše, ki je primerljiv s strojnim učenjem iz projekta SatDroughtMon, ki ga je financirala Evropska vesoljska agencija. Ideja je bila razviti sistem obdelave, ki generira indekse in jih analizira. Potek dela magistrske naloge prikazuje slika 2.



Slika 2: Diagram poteka magistrske naloge.

1.3 Delovne hipoteze

Prva delovna hipoteza je, da se na slovenskem ozemlju vegetacija hitro odzove na primanjkljaj padavin in temu posledično sledi, da je največja korelacija med indeksom VCI in SPI za krajša časovna obdobja, torej SPI1, SPI2, SPI3. SPI1, SPI2, SPI3 ... povejo, kakšno obdobje količine padavin se je pri izračunu upoštevalo. Na primer, SPI3 izračunan za maj 2017 pri svojem izračunu upošteva padavine, ki so padle v marcu, aprilu in maju leta 2017.

Druga hipoteza je, da se na primanjkljaj vode različne kmetijske kulture, odzovejo različno hitro.

1.4 Struktura naloge

Magistrska naloga je sestavljena iz šestih poglavji. V uvodu na kratko opišemo vsebino obravnavane teme, delovne hipoteze, motiv za izbiro tematike in strukturo naloge.

Sledi poglavje s teoretičnimi vsebinami za lažje razumevanje magistrske naloge. Najprej namenimo nekaj besed suši in podnebnim spremembam. Opisana sta indeks stanja vegetacije (VCI) in standardizirani padavinski indeks (SPI) ter satelitski senzor MODIS, katerega podatke uporabimo za izračun VCI.

V tretjem poglavju opišemo študijsko območje in uporabljene podatke. Nekaj pozornosti namenimo tudi izbranim meteorološkim postajam.

V četrtem poglavju opišemo statistično obdelavo podatkov in analiziramo rezultate.

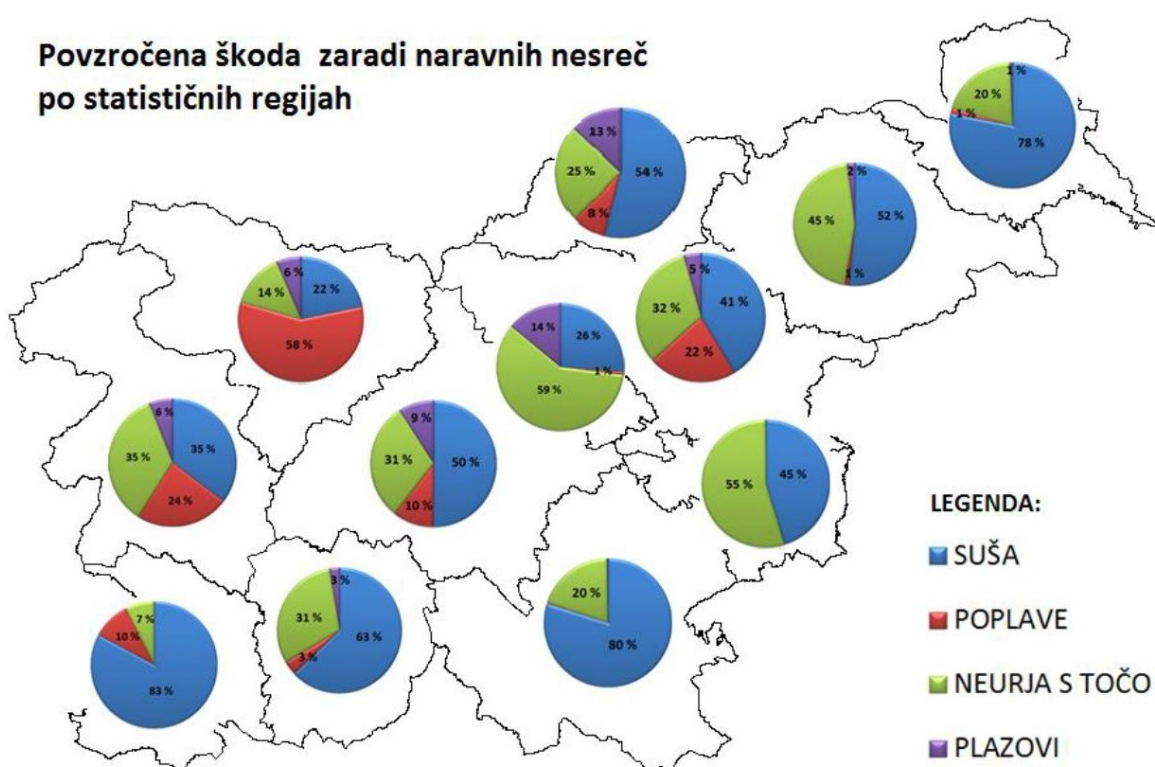
V petem poglavju namenimo nekaj besed strojnemu učenju, prikažemo pridobljene rezultate na podlagi izdelanih modelov in analiziramo rezultate.

V zadnjem poglavju povzamemo bistvene ugotovitve.

2 TEORETIČNA IZHODIŠČA

2.1 Suša in podnebne spremembe

Na sliki 3 so v odstotkih po statističnih regijah predstavljene štiri naravne nesreče (suša, poplave, neurja s točo in plazovi), ki v Sloveniji povzročajo največ škode. Suša v največji meri povzroča škodo v obalno-kraški regiji, jugovzhodni Sloveniji, prekmurski regiji, notranjsko-kraški regiji, koroški regiji, podravski regiji in osrednjeslovenski regiji. V vseh naštetih statističnih regijah suša povzroči vsaj polovico škode, ki jo povzročijo naravne nesreče. Izmed vseh statističnih regij suša najmanj škode povzroči v gorenjski regiji.

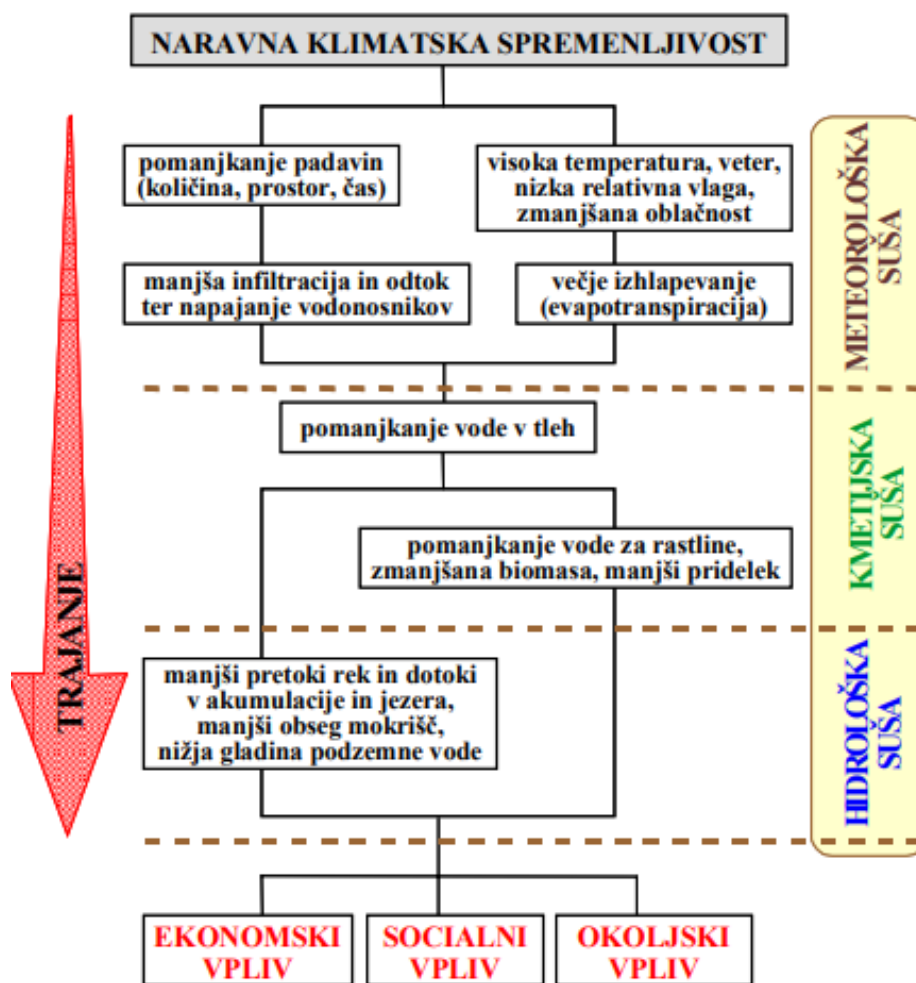


Slika 3: Prikaz povzročene škode zaradi naravnih nesreč po regijah (Hozjan, 2015).

Dejstvo, da skoraj v vseh regijah, največ škode povzroči suša, sporoča, da se je treba nanjo karseda dobro pripraviti in ustrezno ukrepati.

Izmed vseh štirih kategorij suše (meteorološka suša, hidrološka suša, kmetijska suša in socialno-ekonomska suša) v Sloveniji največ pozornosti posvečamo kmetijski suši.

Slika 4 prikazuje kako se ob pomanjkanju padavin najprej pojavi meteorološka suša, nato se ob nezadostni količini padavin za ustrezno rast rastlin pojavi kmetijska suša in ob daljšem časovnem obdobju brez padavin nastopi hidrološka suša.

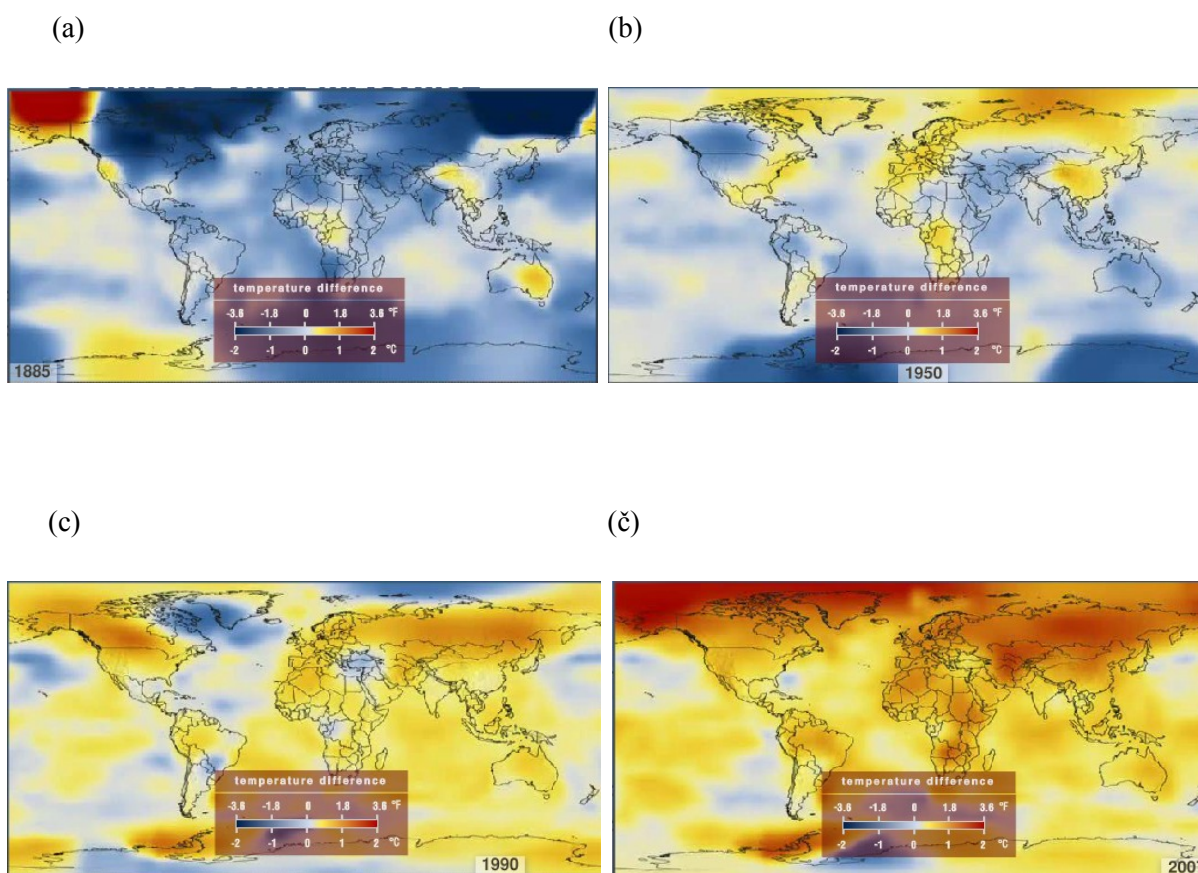


Slika 4: Razvoj suše skozi čas (Kobold in Sušnik, 2003)

Sušnik in Gregorič (2017) sta ugotovila, da se je značilnost suš po letu 1990 spremenila, saj se suše pojavljajo pogostejše in z večjo jakostjo. Že v spomladanskem času, ko rastline potrebujejo zadostno količino vode za rast se pojavljajo težave pri oskrbi z vodo. S tem se v preteklosti nismo soočali. Tveganja za sušo se povečujejo po celotni Sloveniji. Najhujše kmetijske suše na območju Slovenije je bilo zaznati v letu 2003 (povzroči 130 milijonov evrov škode), 2013 in 2017. V obdobju od 1967 do 2017 je bilo zaznati kmetijsko sušo leta: 1967, 1971, 1976, 1983, 1984, 1992, 1993, 1994, 2000, 2001, 2003, 2006, 2007, 2009, 2011, 2012, 2013 in 2017. Suše v omenjenih letih so bile lokalne oz. regionalne.

Velikost škode, ki jo povzroči suša, je odvisna predvsem od časovnega trajanja in od količine vodnega primanjkljaja padavin. Upoštevati je treba, da na sušo vplivajo tudi veter, sončno obsevanje, temperatura in vlaga zraka, vodno zadrževalne lastnosti tal in fenološki razvoj rastline. Pogosto je težko določiti ali je rastlina podlegla sušnemu stresu ali je zaradi visokih temperatur utrpela ožig, bolezen oz. napad škodljivcev (Sušnik in Gregorič, 2017).

V zadnjih dveh desetletjih se na ozemlju Slovenije vsako leto srečujemo s sušo (Brenčič, 2017). K temu pripomore tudi vsakoletno globalno segrevanje ozračja, ki pospešuje izhlapevanje vode iz rastlin. Na spodnjih slikah (slika 5) je prikaz odstopanja globalnih temperatur od povprečja za leto 1885, 1950, 1990 in 2007. Na karti sveta modra barva označuje temperature nižje od povprečja, bolj kot je modra barva temna, višje je bilo odstopanje od povprečja. Rdeča barva pa označuje temperature višje od povprečja, bolj kot je rdeča barva temna, višje je bilo odstopanje od povprečja. Animacija, ki je dostopna na spletu (Climate Time Machine) pokaže, da so bile temperature na Zemeljskem površju od leta 1990 pa vse do danes po večini višje od povprečja (NASA, 2018).



Slika 5: Prikaz odstopanj globalnih temperatur od povprečja za leto (a) 1885, (b) 1950, (c) 1990, (č) 2007 (NASA, 2018).

2.2 Indeks stanja vegetacije (VCI)

VCI vegetacijski indeks stanja vegetacije izhaja iz normiranega diferencialnega vegetacijskega indeksa (v nadaljevanju NDVI, ang. Normalized Difference Vegetation Index) in se uporablja za spremljanje kmetijske suše.

NDVI je indeks, ki ga najpogosteje uporabimo za opazovanje vegetacije. Razvit je bil za določanje stanja vegetacije na širših območjih. NDVI zavzame vrednosti od -1 do 1 . Pozitivne vrednosti pomenijo vegetacijo; višji kot je indeks, bolj zdrava oz. bujna je vegetacija.

NDVI izračunamo po enačbi (1):

$$NDVI = \frac{IR-R}{IR+R} \quad (1),$$

kjer je:

- IR-vrednost v infrardečem spektru,
- R-vrednost v rdečem spektru.

Zdrava vegetacija močno odbija svetlobo v bližnjem infrardečem delu elektromagnetnega spektra, rdečo svetlobo pa absorbira. Ostale površine, kot so prst, voda, pozidano pa imajo podobno odbojnost v IR in R delu spektra. Razmerje med IR in R spektru določa vegetacijski indeks (VI) enačba (2) (Oštir, 2006):

$$VI = \frac{IR}{R} \quad (2)$$

Zdrava vegetacija ima 20 % ali manj odboja v valovnih dolžinah od 0,5 μm do 0,7 μm elektromagnetnega spektra (zelene do rdeče) in okoli 60 % v valovnih dolžinah od 0,7 μm do 1,3 μm (bližnja infrardeča) elektromagnetnega spektra (Sahoo in sod., 2015).

VCI indeks se nanaša na vegetacijo in primerja trenutni NDVI z obsegom vrednosti (minimalnimi in maksimalnimi vrednostmi), ugotovljenimi v istem obdobju izmed vseh opazovanih let. VCI se podaja v odstotkih in pove, kje se opazovana vrednost nahaja v primerjavi med skrajnimi vrednostmi (najvišjimi in najnižjimi) izmed vseh opazovanih let. VCI zavzame vrednosti od 0 % do 100 %, kjer nižje vrednosti predstavljajo slabo vegetacijo, višje vrednosti pa zdravo vegetacijo (Copernicus Global Land Service, 2018).

Vegetacijske indekse so že v začetku leta 1980 pridobivali na podlagi satelitskih posnetkov, saj so želeli pridobiti pogostejše in boljše informacije o stanju vegetacije na regionalni in svetovni ravni, kot pa jih podajajo indeksi pridobljeni na podlagi meteoroloških podatkov (Kogan, 1995).

Prednosti indeksa VCI so zagotavljanje celovitejših, pravočasnih in natančnejših podatkov o suši v primerjavi z indeksi, katere podatke za izračun pridobivamo s talnimi senzorji.

VCI omogoča:

- določiti časovno in prostorsko spremembo vegetacije, kot posledice stresa rastline zaradi padavin;
- oceno vpliva vremena na vegetacijo in vegetacijsko stanje;
- določitev začetka, trajanja in intenzitete suše;

- zagotoviti informacije o suši ne samo na večjih območjih, ampak tudi na manjših lokalnih območjih;
- določitev indeksa v realnem času z visoko prostorsko ločljivostjo, v primerjavi z indeksom SPI, ki ga pridobimo na podlagi podatkov pridobljenih iz meteoroloških postaj.

Indeks VCI je priporočljiv za spremljanje suše na podlagi satelitskih posnetkov, vendar uporaba samo enega indeksa ne zadostuje za natančno določanje suše (Sholihah in sod., 2016).

Enačba (3) za izračun indeksa VCI:

$$VCI_{(i,p,j)} = \frac{NDVI_{(i,p,j)} - NDVI_{min(i,p)}}{NDVI_{max(i,p)} - NDVI_{min(i,p)}} \quad (3),$$

kjer je:

- $NDVI_{(i,p,j)}$ zglajen NDVI za piksel i, v obdobju p in letu j
- $NDVI_{max(i,p)}$ in $NDVI_{min(i,p)}$ sta maksimalni in minimalni indeks izračunana za vsak piksel i v obdobju p.

Preglednica 1 prikazuje klasifikacijo VCI glede na njegovo intenziteto. Zambrano in sod. (2016) so sušo razdelili v 5 razredov glede na jakost, in sicer v ekstrema sušo, hudo sušo, zmerno sušo, blago sušo in ni suše. V praktičnem delu smo tudi mi sušo klasificirali, na podlagi preglednice 1.

Preglednica 1: Klasifikacija VCI (Zambrano in sod., 2016).

VCI vrednosti	Klasifikacija
$0 \% \leq VCI < 10 \%$	ekstremna suša
$10 \% \leq VCI < 20 \%$	huda suša
$20 \% \leq VCI \leq 30 \%$	zmerna suša
$30 \% \leq VCI \leq 40 \%$	blaga suša
$40 \% < VCI \leq 100 \%$	ni suše

Satelitske meritve vsebujejo šum, ki je posledica oblakov, senzorskih in geometrijskih napak ... Napake lahko nastanejo v opazovanju, komunikaciji ali pa izvirajo iz naključnih preprostih napak. Indeks NDVI vsebuje šum, zato je potrebno vsa nihanja odpraviti preden NDVI uporabimo za določanje suše (Kogan, 1995).

V študiji je bil izbran indeks VCI, zaradi številnih pozitivnih prednosti in zato, ker ne odraža samo prostorske in časovne spremenljivosti, ampak omogoča tudi določitev vpliva vremena na vegetacijo.

2.3 Standardizirani padavinski indeks (SPI)

SPI – standardizirani padavinski indeks pove koliko padavin je za izbrano časovno obdobje padlo na nekem območju, glede na pričakovano količino padavin za to obdobje. Torej z indeksom SPI določamo meteorološko sušo, ki je ocenjena na podlagi dolgotrajnih evidenc padavin. Pozitivne vrednosti SPI pomenijo, da je vrednost padavin višja od povprečja, medtem ko negativne vrednost kažejo, da je vrednost padavin nižja od povprečja. McKee in sod. (1993) so zapisali, da se sušno obdobje izračunano na podlagi SPI indeksa začne, ko je njegova vrednost neprekinjeno negativna in pade pod -1 ali več in traja toliko časa, dokler se ne dvigne nad 0. Intenziteta suše je določena z najnižjo vrednostjo indeksa SPI v tem obdobju (po Ceglar in Kajfež-Bogataj, 2008).

Na kratko lahko SPI definiramo kot standardni odmik količine padavin od povprečja v določenem časovnem obdobju za izbrano časovno skalo (Gregorič in Ceglar, 2007).

Akinremi s sod. (1996) so ugotovili, da je za dobro določitev indeksa suše potrebno padavinska odstopanja časovno in prostorsko normalizirati. Z indeksom SPI dosežemo oboje, saj je normaliziran časovno (izračunamo ga lahko za katerokoli časovno obdobje) in prostorsko, glede na lokacijo meteorološke postaje (Ceglar in Kajfež-Bogataj, 2008).

Thom (1966) je ugotovil, da se gama porazdelitev, ki ni definirana pri vrednosti 0, dobro prilega padavinam. Zato smo se odločili, da jo za izračun indeksa SPI uporabimo tudi mi.

Za izračun indeksa SPI je treba določiti gostoto verjetnosti, ki jo prikazuje enačba (4), nato se izračuna porazdelitvena funkcija, ki se potem pretvori v normalno porazdelitev.

Izračun indeksa SPI za porazdelitev gama določajo enačbe od (4) do (15).

Gostote verjetnosti izračunamo po enačbi (4)

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \cdot x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}; x > 0, \alpha > 0, \beta > 0 \quad (4),$$

kjer so:

- x -količina padavin,
- α -oblika porazdelitve,
- β -časovna skala,
- $\Gamma(\alpha)$ funkcija gama.

Funkcija gama je definirana z enačbo (5):

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (5).$$

Padavine običajno niso normalno porazdeljene, zato je potrebno poiskati parametra α in β , da se bo verjetnostna porazdelitev gama najbolj prilegala s porazdelitvijo padavin. To storimo s sledečimi formulami (6, 7, 8) (Thom, 1966):

$$A = \overline{x_{\ln}} - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad (6),$$

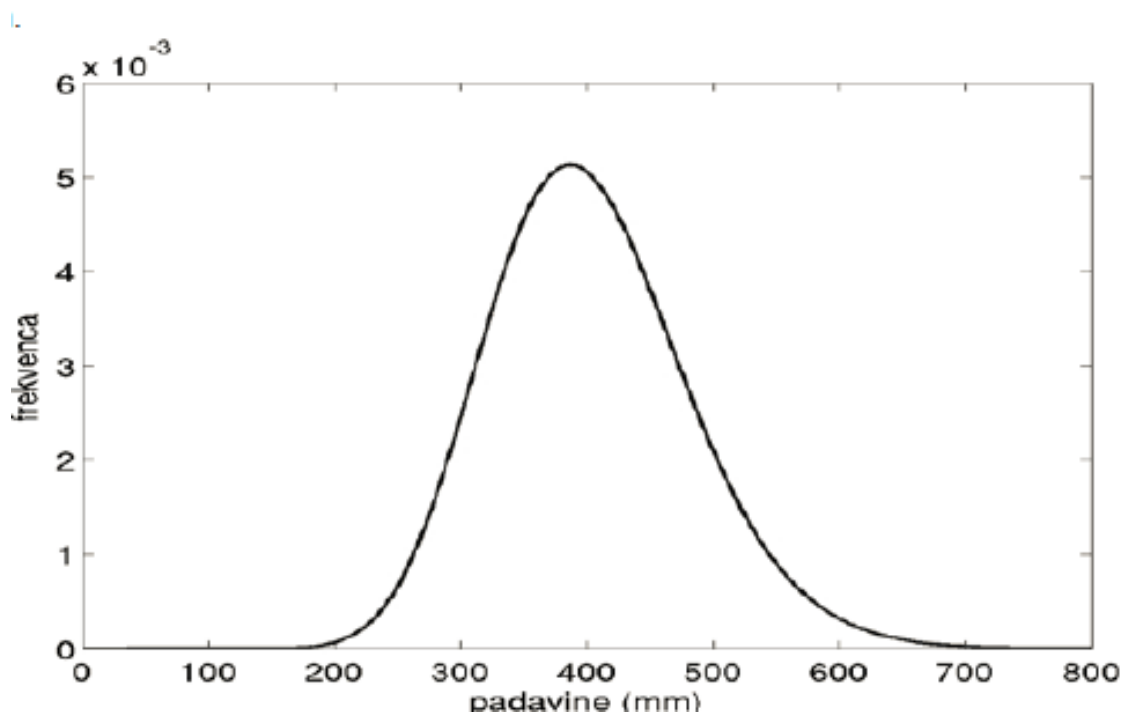
kjer je:

$$\alpha = \frac{1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}}}{4A} \quad (7),$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (8).$$

Po enačbi (7) pridobimo vrednost α , ki predstavlja obliko porazdelitve in vrednost β po enačbi (8). Ta predstavlja časovno skalo, kjer se gostota verjetnosti najbolj prilega danim padavinam. α , β se izračunata za vsak mesec in časovno skalo posebej.

Na sliki 6 je prikazana poletna porazdelitev količine padavin za obdobje 1961 do 2000, kjer je $\alpha = 26$ in parameter $\beta = 16$. Poletna količina padavin, v tem primeru odraža trimesečno vsoto padavin, ki je padala v mesecih junij, julij in avgust.



Slika 6: Porazdelitev poletnih količin padavin za Ljubljano za obdobje 1961–2000 (Gregorič in Ceglar, 2007).

Kumulativno verjetnost za izbrano časovno skalo in leto izračunamo po enačbi (9):

$$G(x) = \int_0^x g(x)dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} dx \quad (9).$$

Gama porazdelitev ni definirana za $x=0$, kar se zgodi v našem primeru, če v nekem izbranem mesecu ni bilo padavin. V tem primeru kumulativno verjetnost preoblikujemo z enačbo (10):

$$H(x) = q + (1 - q) G(x) \quad (10),$$

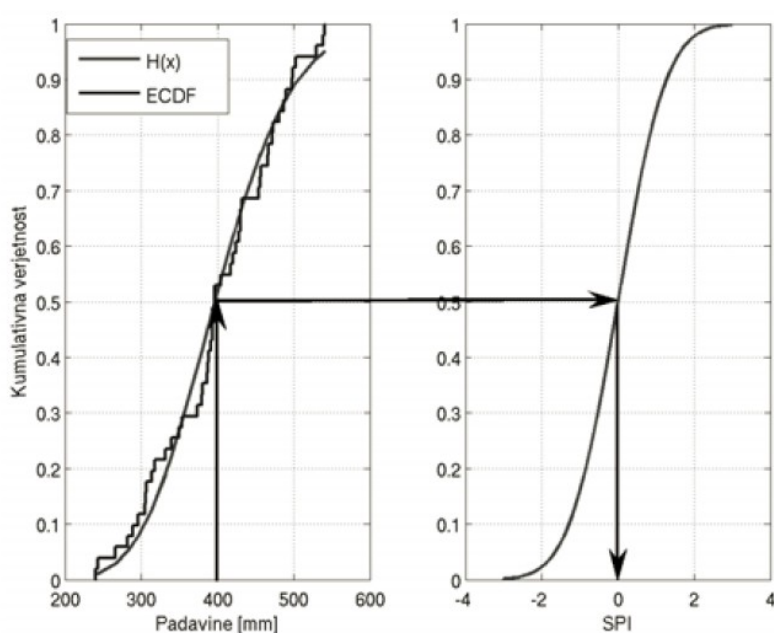
kjer je q verjetnost, da ni padavin ($x=0$) in jo zapišemo z enačbo (11):

$$q = \frac{M}{n} \quad (11),$$

kjer M predstavlja število dogodkov brez padavin ($x=0$).

Verjetnost $H(x)$ transformiramo v standardizirano normalno naključno spremenljivko Z s povprečjem 0 in varianco 1, kar predstavlja vrednost indeksa SPI.

Na sliki 7 je prikazana pretvorba poletnih padavin po zgoraj opisanem postopku za obdobje 1961–2000 v indeks SPI. Gladka krivulja $H(x)$ na levem grafu predstavlja kumulativno verjetnostno porazdelitev poletnih padavin. Lomljena črta na levem grafu predstavlja empirično kumulativno verjetnostno porazdelitev. Na desni sliki pa je prikazana krivulja kumulativne verjetnostne porazdelitev standardizirane normalne naključne spremenljivke Z . Na desni sliki je razvidno, da SPI indeks predstavlja število standardnih odklonov od povprečja, ki v tem primeru predstavlja 400 mm (Gregorič in Ceglar, 2007).



Slika 7: Pretvorba poletnih padavin za obdobje 1961–2000 v indeks SPI (Gregorič in Ceglar, 2007).

Pretvorba kumulativne verjetnostne porazdelitve v standardizirano slučajno normalno porazdelitev Z je po zgoraj opisanem postopku dokaj zamuden. Zato smo transformacijo kumulativne verjetnostne porazdelitve v standardizirano slučajno normalno porazdelitev Z določili po formulah, ki jih v članku »On the use of Standardized Precipitation Index (SPI) for drought intensity assessment. Meteorological applications« podajo Kumar in sod. (2009).

SPI indeks oz. Z smo izračunali na podlagi sledečih formul (12, 13):

$$Z = SPI = - \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (12),$$

$$Z = SPI = + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \quad 0.5 < H(x) \leq 1 \quad (13),$$

kjer je t izračunamo na podlagi enačbe (14, 15):

$$t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{H(x)^2} \right)} \quad 0 < H(x) \leq 0.5 \quad (14),$$

$$t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(1-H(x))^2} \right)} \quad 0.5 < H(x) \leq 1 \quad (15),$$

$$c_0 = 2.515517,$$

$$c_1 = 0.802583,$$

$$c_2 = 0.010328,$$

$$d_1 = 1.432788,$$

$$d_2 = 0.189269,$$

$$d_3 = 0.001308.$$

Vrednosti c_0 , c_1 , c_2 , d_1 , d_2 , d_3 so konstante, ki se uporabljajo za izračun indeksa SPI (Kumar in sod., 2009).

Po izvedenem izračunu klasificiramo sušo na podlagi vrednosti indeksa SPI. V večini literature smo zasledila lestvico klasifikacije, ki jo podaja preglednica 2.

Preglednica 2: Klasifikacija indeksa SPI s pripadajočimi verjetnost za pojav suše (Ceglar in Kajfež-Bogataj, 2008).

SPI vrednost	Klasifikacija	Verjetnost (%)
od 2 ali več	ekstremno mokro	2,3
od 1,5 do 1,99	zelo mokro	4,4
od 1 do 1,49	zmerno mokro	9,2
od 0 do 0,99	normalno	34,1
od 0 do -0,99	normalno	34,1
od -1 do -1,49	zmerna suša	9,2
od -1,5 do -1,99	huda suša	4,4
od -2,00 ali manj	ekstremna suša	2,3

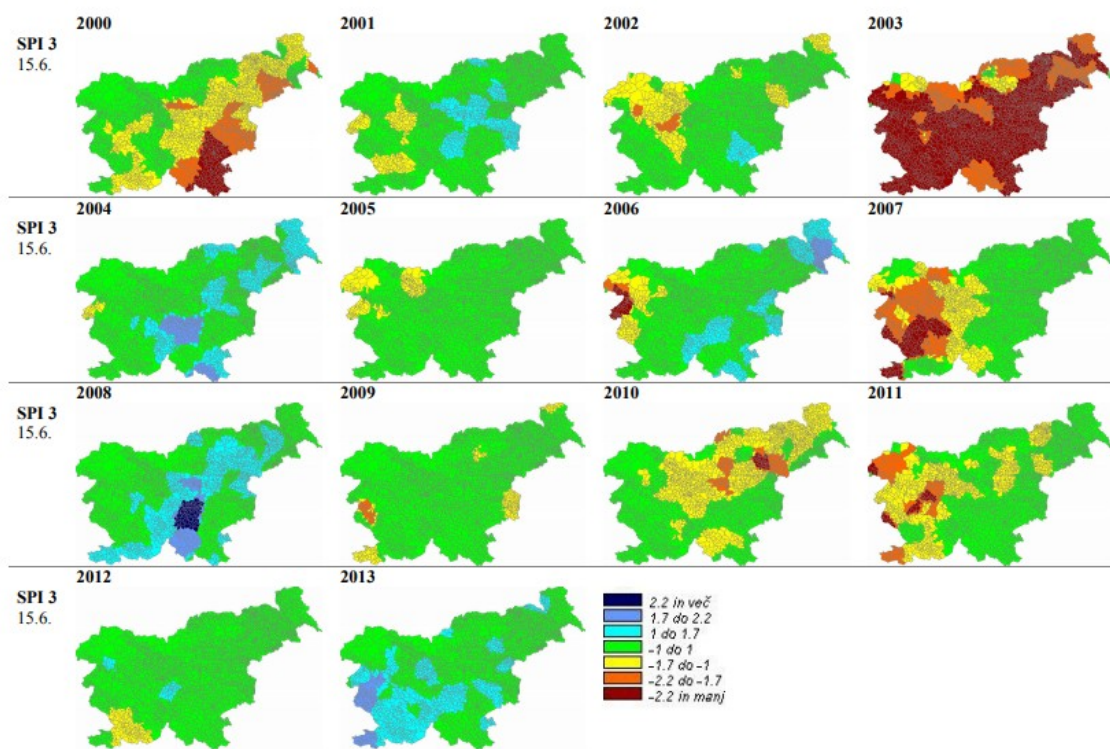
Indeks suše se lahko izračuna za različna obdobja (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 ... mesecev). Krajša obdobja (od 1 do 6 mesecev) so povezana s kratkoročnim primanjkljajem, povezanim z vsebnostjo vode v tleh (odziv vegetacije). Daljša časovna obdobja (od 12 do 36 mesecev) pa so povezana z dolgoročnim primanjkljajem, ki je na splošno povezan s podzemno vodo in rezervoarji (Zambrano in sod., 2016).

Če vrednost indeksa SPI v enomesečnem obdobju pade pod -1, lahko govorimo o začetku meteorološke suše (SPI1). Večja škoda za okolje se ponavadi začne takrat, ko je pomanjkanje padavin daljše od enega meseca. Pomanjkanje padavin na rast in razvoj rastlin zaznamo v obdobju med dvema in štirimi meseci. Ni nujno, da pomanjkanje padavin v večmesečnem obdobju pojasni nastanek suše, potrebno je pri tem upoštevati tudi sestavo tal, razvojno fazo rastline, izhlapevanje in druge dejavnike. Hidrološko sušo je zaznati, ko je pomanjkanje padavin daljše od šestih mesecev (ARSO, 2018a).

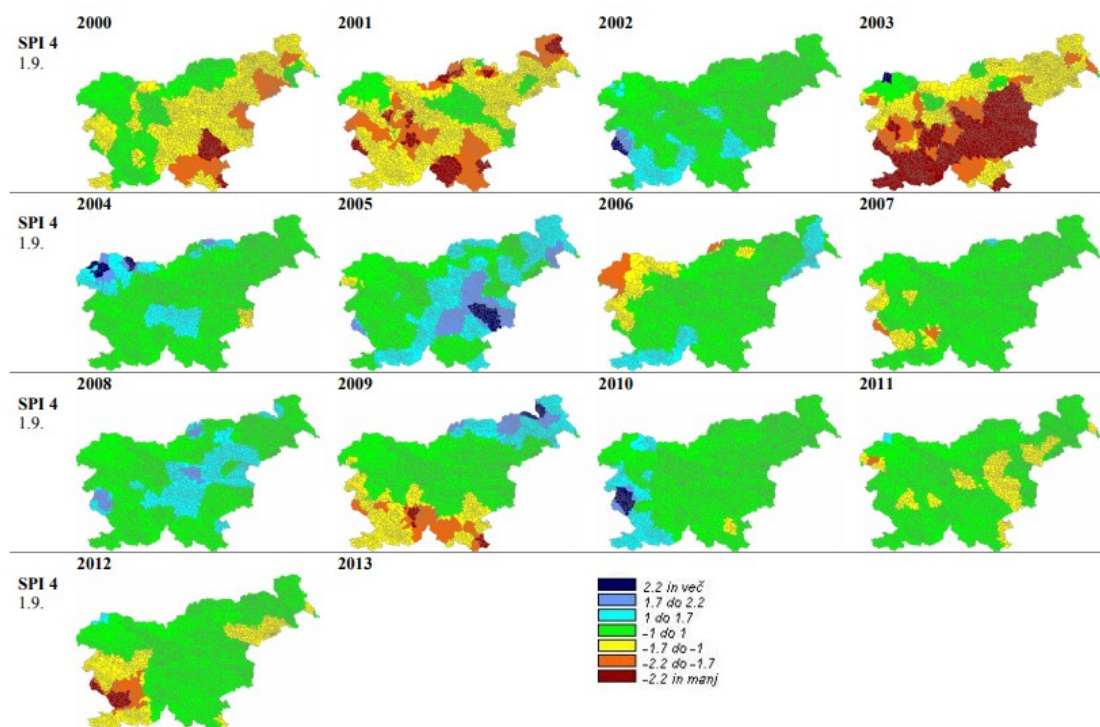
Na Agenciji Republike Slovenije za okolje indeks SPI izračunavajo za meteorološke postaje, za katere vodijo dovolj dolgo evidenco o količini padavin (vsaj od leta 1971). Podatke z interpolacijsko metodo najbližjega sosedu preračunajo v pravilno mrežo točk in povprečijo v prostorske enote. Vrednosti SPI se torej vodijo po katastrskih občinah, podatki so na voljo v podatkovnih tabelah, ki se nahajajo na njihovi spletni strani. Indeks se izračunava od aprila do septembra, za obdobje 1, 2, 3, 4 in 6 mesecev (ARSO, 2018a).

Ugotovili so, da je pri obravnavi suše za spomladansko poljščino pomemben SPI3, izračunan 15. junija in za poletno poljščino SPI4 izračunan 1. septembra (ARSO, 2018a).

Prikaz povprečij indeksa SPI3 in indeksa SPI4 po katastrskih občinah od leta 2000 do 2013 je prikazan na slikah 8 in 9. Sliki prikazujeta, da je najhujšo sušo Slovenija doživela leta 2003, ko je skoraj po vseh katastrskih občinah padlo manj padavin od povprečja.



Slika 8: Prikaz povprečja indeksa SPI3 izračunanega 15. junija, po katastrskih občinah za obdobje 2000–2013 (ARSO, 2018a).



Slika 9: Prikaz povprečja indeksa SPI4 izračunanega 1. septembra, po katastrskih občinah za obdobje 2000–2012 (ARSO, 2018a).

Prednosti indeksa SPI (Hayes in sod, 1999):

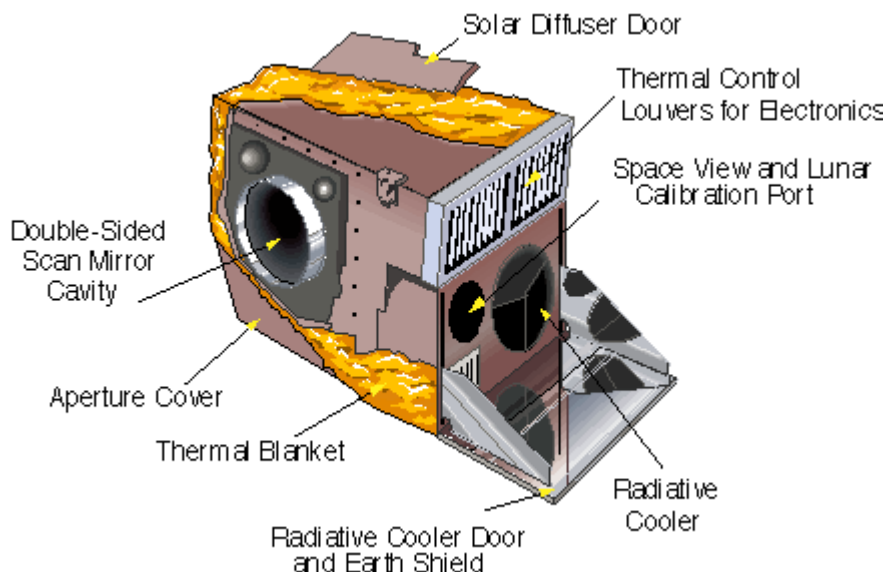
- standardizirana narava (frekvence sušnih dogodkov so za katerokoli lokacijo in časovno obdobje primerljive);
- enostaven izračun, saj temelji le na padavinah;
- možnost izračuna za različna časovna obdobja omogoča sposobnost določitve vseh vrst suš (lahko opredelimo začetek, intenziteto in trajanje suše);
- ker je odvisen le od padavin in ne tudi od vlažnosti tal, je primeren za izračun v poletnem in tudi zimskem času;
- na izračun indeksa SPI topografija nima neugodnega vpliva.

Slabosti indeksa SPI, na katere je treba paziti (Ceglar in Kajfež-Bogataj, 2008; Sušnik in Gregorič, 2017):

- stopnja standardizacije je zelo velika, kar onemogoča določiti območja, ki so bolj nagnjena k suši (stopnje verjetnosti za pojav izbrane jakosti suše so povsod enake);
- vključevanje podatka le o količini padavin je lahko zavajajoče, kot se je izkazalo v letu 2017, ko je padla dovoljšnja količina padavin, vendar so rastline utrpale sušo zaradi povišane stopnje evapotranspiracije in vročinskih valov. Le podatek o količini padavin lahko poda zavajajoče informacije o suši, vendar služi, kot rešitev, kjer za zaznavanje suše nimamo drugih podatkov;
- za krajša časovna obdobja enega, dveh in treh mesecev, kjer je sezonska količina padavin manjša je SPI indeks manj uporaben, saj se lahko pojavijo zavajajoče nizke oz. visoke vrednosti indeksa;
- zahteva dolgoročno vodenje zapisov o padavinah (tudi več kot 30 let), ki jih nato uporabimo za kategorizacijo meteorološke suše z ustrezno izbrano porazdelitveno verjetnostjo.

2.4 MODIS

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) je instrument, ki se nahaja na satelitih Terra (EOS AM-1) in Aqua (EOS PM-1), vesoljske agencije NASA (ang. National Aeronautics and Space Administration). Tirnica satelit Terra je določena tako, da poteka od severa proti jugu in zjutraj prečka ekvator. Tirnica satelita Aqua pa poteka od juga proti severu in prečka ekvator popoldne. Satelita Terra in Aqua obkrožita Zemljo vsakih 90 minut. Senzor MODIS, prikazan na sliki 10, pridobiva podatke v 36 spektralnih pasovih (MODIS, 2018a).



Slika 10: Senzor MODIS (Wikimedia, 2018)

Poleg senzorja MODIS so na satelitu Terra še senzorji ASTER, CERES, MISR in MOPITT. Na satelitu Aqua pa poleg naštetih še AIRS, AMSR-E in CERES.

Preglednica 3 prikazuje značilnosti senzorja MODIS.

Preglednica 3: Značilnosti senzorja MODIS (MODIS, 2018b).

Tirnica	705 km, 10:30 spuščajoča tirnica (Terra), 13:30 dvigajoča tirnica (Aqua), sončno sinhrona, skoraj polarna, krožna
Območje skeniranja	2230 km (prečno) x 10 km (vzdolžno v nadirju)
Teleskop	17,78 cm premer
Dimenzija	1,0 m x 1,6 m x 1,0 m
Teža	228,7 kg
Moč	162,5 W (povprečje ene orbite)
Prenos podatkov	10,6 Mbps (največji dnevni prenos); 6,1 Mbps (orbitalno povprečje)
Radiometrična ločljivost	12 bitna
Spektralna ločljivost	250 m (1.-2. kanal) 500 m (3.-7. kanal) 1000 m (8.-36. kanal)
Življenjska doba	6 let

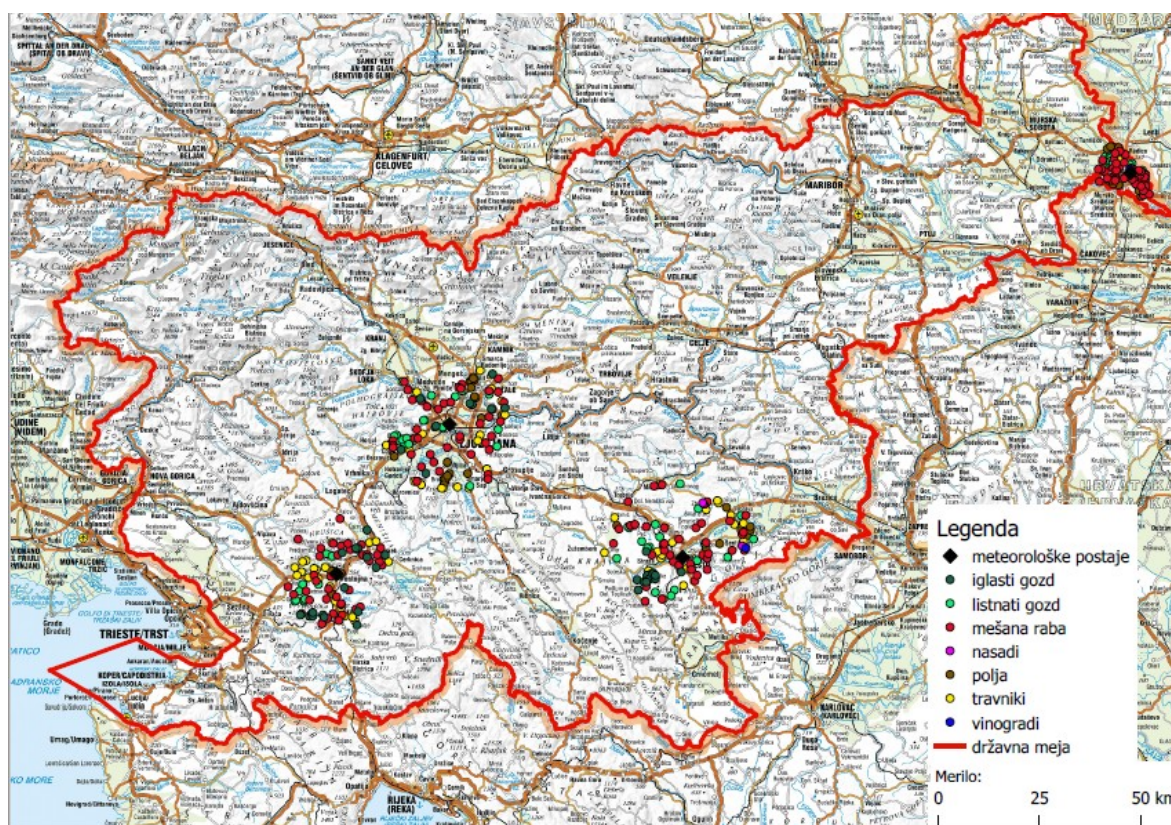
3 ŠTUDIJSKO OBMOČJE IN UPORABLJENI PODATKI

Območje študije je Slovenija, bolj rečeno vplivna območja (izbranih) meteoroloških postaj Lendava, Ljubljana Bežigrad, Postojna in Novo mesto.

Podatki, ki smo jih pri magistrski nalogi uporabili so:

- produkt MODIS MOD13Q1 s prostorsko ločljivostjo 250 m,
- produkt MODIS MCD15A3 s prostorsko ločljivostjo 1 km,
- mesečne količine padavin meteoroloških postaj Lendava, Ljubljana Bežigrad, Postojna in Novo mesto,
- podatki dejanske rabe tal, ki se nahajajo na vplivnem območju izbranih meteoroloških postaj: Postojna, Lendava, Ljubljana Bežigrad in Novo mesto,
- časovne serije indeksa vlažnosti tal (ang. Soil Water Index – v nadaljevanju SWI) in
- podatki o prisotnosti suše.

Slika 10 prikazuje meterološke postaje in točke, na podlagi katerih smo določali sušo.



Slika 11: Prikaz izbranih meteoroloških postaj in točk, za katere imamo podatke o dejanski rabi in časovni seriji MODIS produktov.

3.1 Produkt MODIS MOD13Q1

MOD13Q1 je produkt senzorja MODIS, ki se nahaja na satelitu Terra. Je torej 16-dnevni kompozit indeksa NDVI in izboljšanega vegetacijskega indeksa (v nadaljevanju EVI, ang. Enhanced Vegetation Index) s prostorsko ločljivostjo 250 m.

Podoben produkt daje senzor MODIS nameščen na satelitu Aqua, to je MYD13Q1. Tako kot MOD13Q1, je tudi MYD13Q1 16-dnevni kompozit vegetacijskega indeksa NDVI in EVI s prostorsko ločljivostjo 250 m. Razlikuje se le v času zajema. MYD produkti so združeni v intervalih, ki so glede na MOD zamaknjeni za 8 dni.

Rastrska mreža je sestavljena iz 4800 vrstic in 4800 stolpcev, algoritem izbere najboljšo razpoložljivo vrednost piksla v 16-dnevnem obdobju. Merilo za izbiro najboljše vrednosti piksla so nizki oblaki, manjši kot gledanja in najvišje vrednosti indeksa NDVI in EVI (LP DAAC, 2018).

Na primer, da ima MYD kompozit datumsko oznako 20180101, ima naslednji podatek za isti piksel oznako 20180117. To ne pomeni, da je bil prvi podatek zajet na dan oznake. Datum označuje prvi možni dan zajema podatka v intervalu od 20180101 do 20180116. Na primer, da je bil MOD zajet 8 dni za MYD, je to 20180109. Iz prej opisanega se lahko zgodi, da je bil lahko dejansko MOD zajet pred MYD produktom (npr. MOD zajet 20180109 in MYD zajet 20180116).

Poleg tega lahko rečemo, da je datum zajema v splošnem za vsak piksel drugačen, neodvisno od sosednjih pikslov. Podatke na katere dneve je bil določen piksel zajet, je možno pridobiti v pomožnih slojih.

Indeksa NDVI in EVI zavzemata vrednosti od -1 do 1 , vrednost -2 pa pomeni, da ni bilo podatka.

Podatke produktov MODIS smo pridobili na Znanstvenoraziskovalnem centru Slovenske akademije znanosti in umetnosti (ZRC SAZU), in sicer za obdobje od leta 2001 do 2017. Vsi pridobljeni podatki so bili dodatno obdelani.

3.2 Meteoroloških postaje

Standardizirani padavinski indeks smo izračunali za štiri izbrane meteorološke postaje, in sicer Lendavo, Ljubljano Bežigrad, Novo mesto in Postojno. Za izračun indeksa SPI potrebujemo le podatke o mesečni količini padavin, pridobili smo jih iz arhiva Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO), in sicer za obdobje 1987–2017. Za kakovosten izračun indeksa SPI, potrebujemo neprekinjen niz o zapisu padavin vsaj za obdobje 30 let. Pogosto se zgodi, da so meteorološki podatki nepopolni, zato nismo imeli na izbiro veliko meteoroloških postaj. Pri izbiri smo se osredotočili, da so postaje enakomerno porazdeljene po celotni državi.

Višino padavin merijo na meteoroloških postajah enkrat dnevno, ob 7h zjutraj. Te meritve predstavljajo količino padavin v zadnjih 24 urah. Mesečna in letna povprečja padavin so pridobljena na podlagi dnevnih padavin. Na količino padavin vplivajo številni dejavniki, glavna sta orografske ovire in veter, poleg tega pa vplivajo še nadmorska višina, orientacija orografske pregrade Na zavetnih straneh orografskih ovir pade običajno manj padavin, kot na privetrnih straneh. Veter je odvisen tudi od orientacije in tipa reliefa. Močni vetrovi so pogostejši na izpostavljenih legah in na višjih nadmorskih višinah, to vpliva na večjo količino izmerjenih padavin. Orientacija in tip reliefa določata prostorsko porazdelitev orografskih padavin, ki so v Sloveniji najbolj pogoste (ARSO, 2018b).

3.2.1 Meteorološka postaja Lendava

Meteorološka postaja Lendava se nahaja na nadmorski višini 190 m, geografski širini $46^{\circ}33'25''$ in geografski dolžini $16^{\circ}28'20''$. Uvrščamo jo med klimatološke postaje. Meritve na klimatoloških postajah izvajajo trikrat dnevno, in sicer ob 7., 14. in 21. uri. Merijo smer in hitrost vetra, temperaturo zraka, najvišjo in najnižjo temperaturo zraka, temperaturo zemljišča, vlažnost zraka, višino padavin in višino snežne odeje. Opazujejo pa atmosferske pojave, količino oblačnosti, vidnost, vrsto padavin, čas začetka in konca vseh vrst padavin, fenološka opazovanja in stanja posevkov (po potrebi). Višino padavin, snežne odeje merijo enkrat dnevno ob 7. uri (ARSO, 2018c).

3.2.2 Meteorološka postaja Ljubljana Bežigrad

V Ljubljani za Bežigradom so pričeli z merjenjem meteoroloških parametrov in spremljanjem vremena že 28. decembra leta 1947. Meteorološka postaja je na nadmorski višini 299 m, geografski širini $46^{\circ}03'56''$ in geografski dolžini $14^{\circ}30'45''$.

Meteorološka postaja Ljubljana Bežigrad je danes osrednjeslovenski meteorološki observatorij, združen s sinoptično, fenološko in okoljevarstveno postajo, na kateri merijo: zračni pritisk, temperaturo in vlažnost zraka na 2 m, temperaturo zraka 5 cm nad tlemi, temperaturo tal na različnih globinah (2, 5, 10, 20, 30, 50, 100 cm), smer in hitrost vetra, stanje tal, vidnost, trajanje sončnega obsevanja, oblačnost, padavine, snežno odejo, meteorološke pojave (npr. meglo, žled, poledico, dež, sneženje, nevihte ...), globalno in difuzno sončno obsevanje, UVB-sevanje, eritemalno uteženo UV-sevanje in radioaktivnost.

Velikost opazovalnega prostora je 50 m x 70 m in se nahaja sredi mesta na travniku. Za določanje podnebnih sprememb nekega kraja je pomembno, da so meteorološki parametri merjeni na isti lokaciji, ob dnevno istem času opazovanja, z istimi instrumenti, na enak način in da se okolica meteorološke postaje bistveno ne spreminja. Ob nastali spremembi se zgodi, da podatki niso več homogeni in niso več odraz dejanskega stanja.

Potrebno je omeniti, da se je okolica meteorološke postaje Ljubljana Bežigrad bistveno spremenila, predvsem zaradi izgradnje višjih stavb. Tako širjenje in sprememba mestnega prostora vpliva na vrednost meteoroloških spremenljivk in velja omeniti, da te niso le sprememba splošnih podnebnih sprememb.

Postaja Ljubljana Bežigrad (slika 12) se torej nahaja v mestu in je tako primerna za spremljanje mestnih vplivov na vreme (Nadbath, 2008).



Slika 12: Meteorološka postaja Ljubljana Bežigrad (Nadbath, 2008).

3.2.3 Meteorološka postaja Novo mesto

Meteorološka postaja Novo mesto (slika 13) se nahaja na nadmorski višini 220 m, geografski širini $45^{\circ}48'07''$ in geografski dolžini $15^{\circ}10'38''$. Skozi zgodovino lokacija meteorološke postaje v Novem mestu ni bila stalna, od leta 1972 se nahaja na Recljevem hribu, na vzhodnem delu Novega mesta in je nekoliko višje od samega mesta. Tu merijo temperaturo, relativno zračno vlago, hitrost in smer vetra. Opazujejo pa tudi vremenske pojave (oblačno, delno oblačno, jasno ...) (Lokalno.si, 2009).



Slika 13: Meteorološki postaji Novo mesto (Lokalno.si, 2009).

3.2.4 Meteorološka postaja Postojna

Meteorološka postaja Postojna (slika 14) se nahaja na jugozahodnem delu naselja na nadmorski višini 533 m, geografski širini $45^{\circ}45'58''$ in geografski dolžini $14^{\circ}11'36''$. Instrumenti za merjene meteoroloških parametrov so postavljeni na travniku, v okolici pa se nahajajo enodružinske hiše. Prvi zapisi o meritvah segajo že v leto 1850, nato so se meritve nekajkrat vmes prekinile, tudi zaradi dejstva, da je nekaj časa Postojna pripadala Italiji. Od leta 1950 pa meritve v Postojni potekajo brez prekinitve. Postojna spada med klimatološke postaje.

Od leta 1994 je v Postojni še avtomatska meteorološka postaja, poleg klasične na podlagi katere se podatki o temperaturi zrak, vlagi, smeri, hitrosti vetra in višini padavin sprotno objavljajo na straneh ARSO (Nadbath, 2007). Avtomatske meteorološke postaje se nahajajo tudi v Lendavi, Ljubljani in Novem mestu.



Slika 14: Meteorološka postaja Postojna (Nadbath, 2007).

3.3 Podatki dejanske rabe za izbrane točke

Za določanje suše smo imeli na razpolago 399 točk, ki se nahajajo na vplivnem območju izbranih štirih meteoroloških postaj. Vplivno območje je bilo določeno na podlagi različnih kriterijev, med katerimi je tudi nadmorska višina posamezne točke glede na nadmorsko višino meteorološke postaje. Vsaka izmed točko ima podane koordinate v D48/GK, predpisano dejansko rabo tal (polje, travnik, nasadi, vinogradi, listnati gozd, iglasti gozd in mešana raba) in tudi določeno homogenost rabe okoliških pikslov.

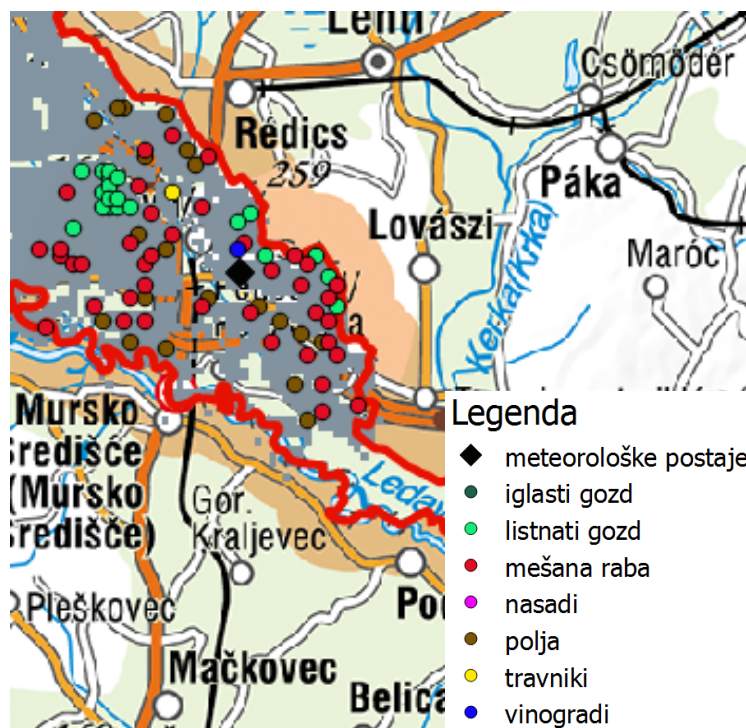
Podatki o dejanski rabi so bili pridobljeni iz Ministrstva za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano (MKGP).

Preglednica 4 prikazuje število točk, ki smo jih imeli na voljo, glede na njihovo homogeno dejansko rabo, razdeljenih po meteoroloških postajah.

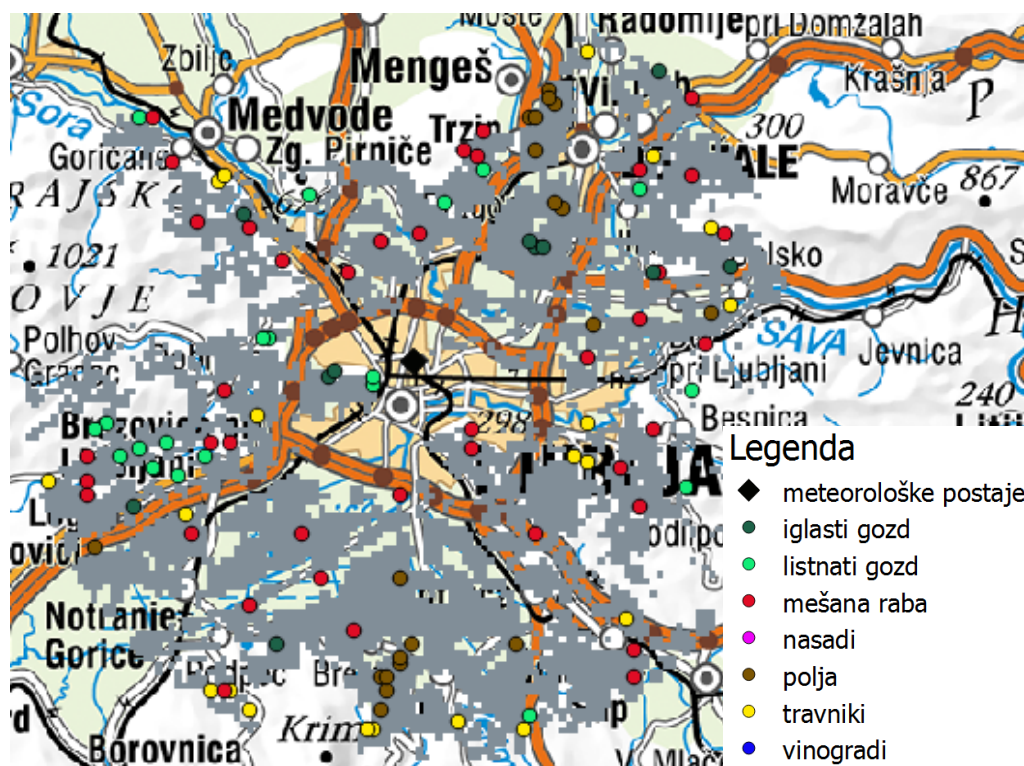
Preglednica 4: Prikaz števila točk, glede na dejansko rabo po meteoroloških postajah.

Dejanska raba	Lendava	Ljubljana Bežigrad	Novo mesto	Postojna
iglasti gozd	/	11	15	20
listnati gozd	20	20	18	12
mešana raba	40	40	40	40
nasadi	/	/	3	/
polja	20	20	12	6
travniki	1	20	19	20
vinogradi	1	/	1	/
Skupno število točk	82	111	108	98

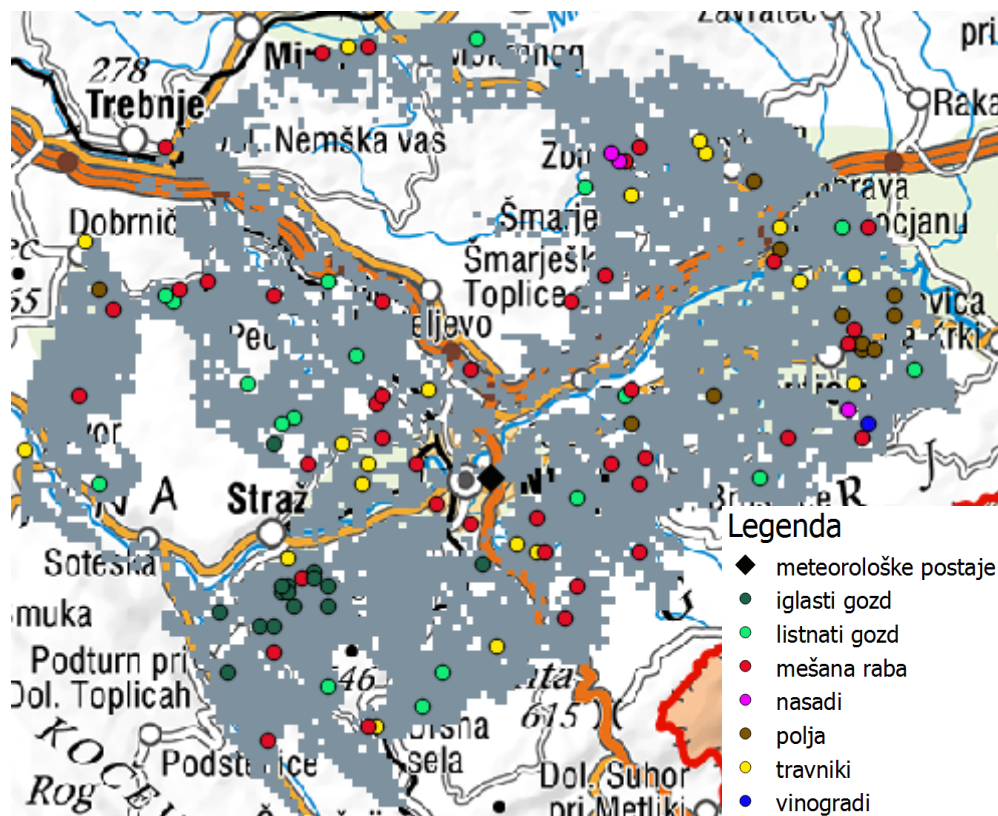
Na slikah 15 do 18 so prikazane točke, ki smo jih uporabili za določanje suše na vplivnem območju postaj Lendava, Ljubljana Bežigrad, Novo mesto in Postojna. S sivo barvo so na slikah označena vplivna območja posameznih meteoroloških postaj.



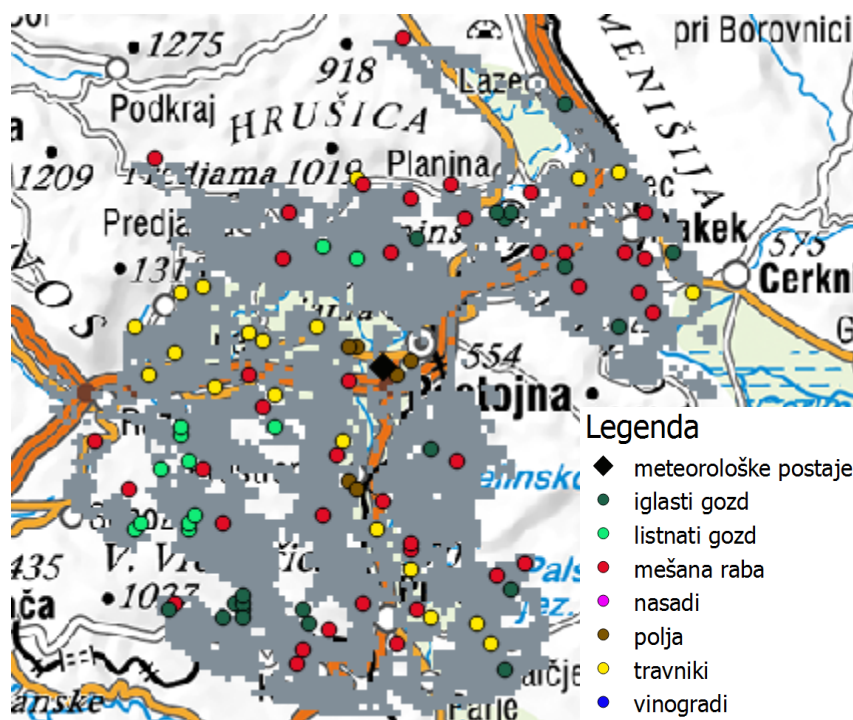
Slika 15: Izbrane točke za opazovanje suše na vplivnem območju meteorološke postaje Lendava.



Slika 16: Izbrane točke za opazovanje suše na vplivnem območju meteorološke postaje Ljubljana Bežigrad.

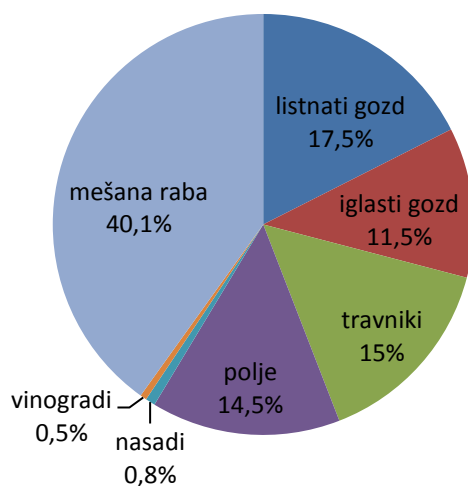


Slika 17: Izbrane točke za opazovanje suše na vplivnem območju meteorološke postaje Novo mesto.



Slika 18: Izbrane točke za opazovanje suše na vplivnem območju meteorološke postaje Postojna.

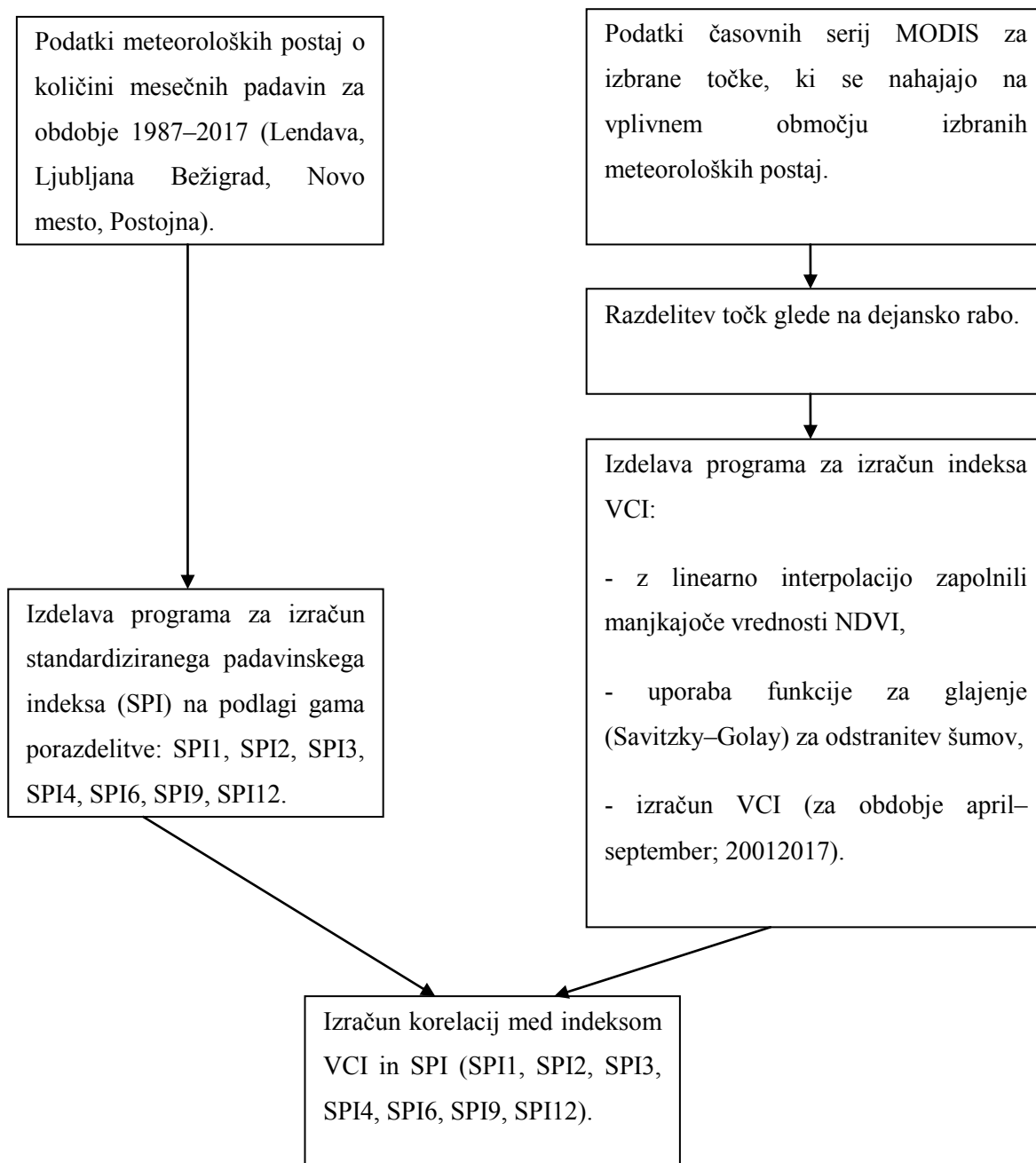
Grafikon 1 prikazuje zastopanost posameznih dejanskih rab, ki smo jih v magistrski nalogi uporabili za določanje suše. Kar 40,1 % je točk z mešano rabo, nato sledijo listnati gozd, travniki, polja in iglasti gozd. V najmanjši meri sta zastopani dejanski rabi nasadi (0,8 %) in vinogradi (0,5 %).



Grafikon 1: Prikaz zastopanost dejanske rabe izražene v odstotkih za izbran vzorec točk .

4 OBDELAVA PODATKOV IN REZULTATI

Diagram 2 prikazuje postopek in potrebne podatke za izračun indeksov VCI in SPI.



Slika 19: Diagram poteka izračuna indeksa VCI in SPI ter njune korelacije.

Za izračun indeksov smo napisali program v jeziku Python.

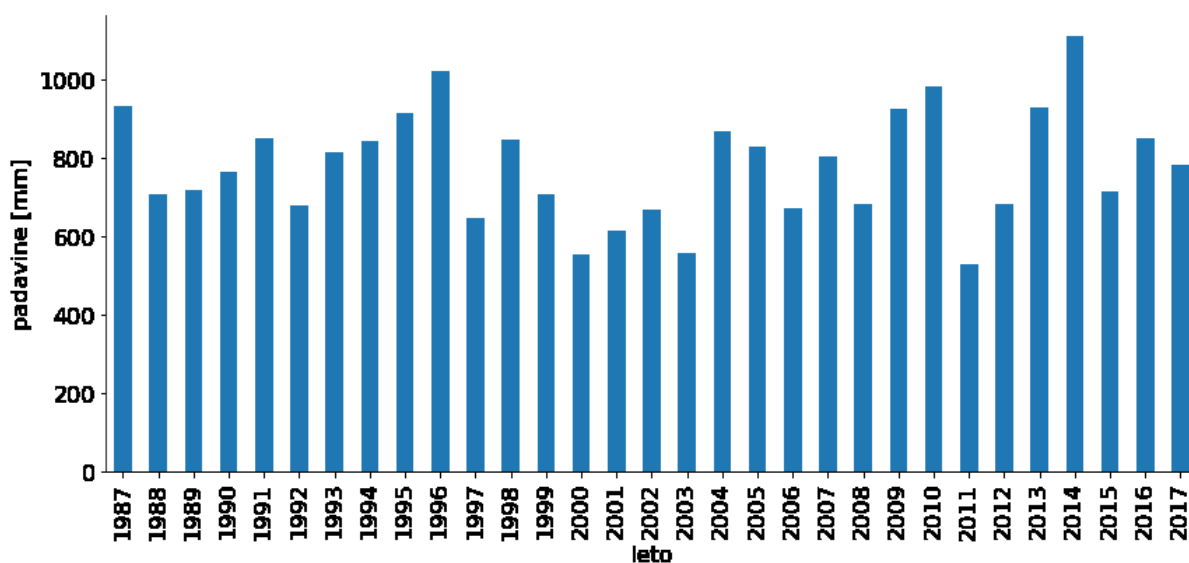
4.1 Izračun standardiziranega padavinskega indeksa (SPI)

Za izračun indeksa SPI smo napisali program na podlagi gama porazdelitve. Vhodni podatek v program so mesečne količine padavin v obliki *.txt datoteke. Prvi stolpec datoteke (*.txt) predstavlja

leto, drugi stolpec mesec in tretji stolpec mesečno količino padavin v mm. Program izračuna SPI za obdobje 1, 2, 3, 4, 6, 9 in 12 mesecev.

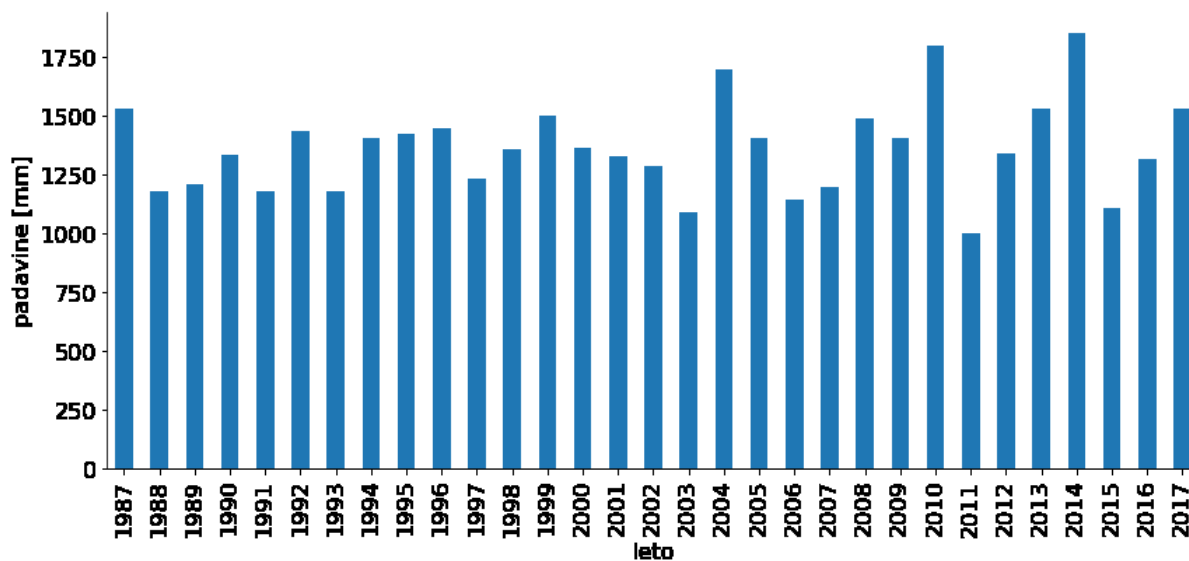
Na spletni strani National Drought Mitigation Center (Univerza Nebraska-Lincoln) je prosto dostopen program za izračun indeksa SPI. Vhodni podatek v program je prav tako datoteka v obliki *.txt, s prvim stolpcem, ki predstavlja leto, drugi mesec in tretji padavine (vsaj za obdobje 30 let, priporočljivo več kot za 60 let), ki morajo biti obvezno celo število. Naš program lahko indeks SPI izračuna tudi v primeru, če padavine podamo z decimalnimi števili. Program iz spleta izračuna vrednost indeksa SPI, na podlagi gama porazdelitve za največ šest izbranih časovnih skal, ki ne smejo biti daljše od 12 mesecev (National Drought Mitigation Center, 2018). Omenjen spletni program smo uporabili za kontrolo. Z obema programoma smo izračunali indeks SPI (padavine celo število) in izračunali razlike. Največje razlike znašajo 0,01. Indeks SPI smo nato izračunali s padavinami, podanimi z decimalnimi števili.

Grafikon 2 prikazuje, da je bilo na letni ravni v obdobju od leta 1987 do leta 2017 za meteorološko postajo Lendava najmanj padavin zaznati za leto 2000, 2003, 2011, in sicer manj kot 600 mm.



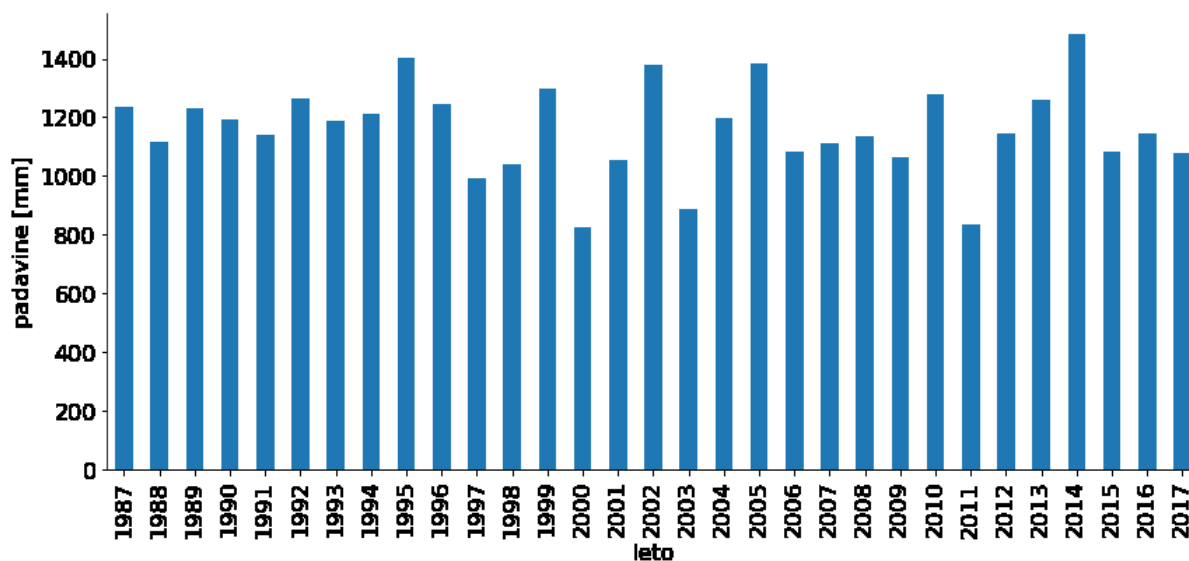
Grafikon 2: Letna količina padavin za meteorološko postajo Lendava v obdobju 1987–2017.

Grafikon 3 prikazuje, da sta bili najmanjši izmerjena količina padavin na letni ravni za meteorološko postajo Ljubljana Bežigrad leta 2003 in 2011.



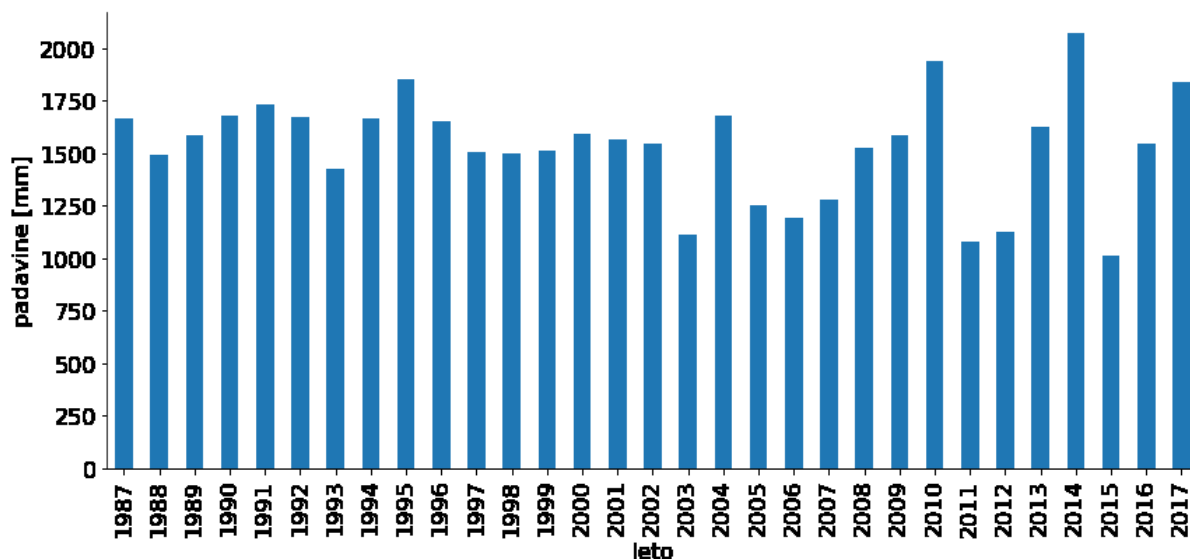
Grafikon 3: Letna količina padavin za meteorološko postajo Ljubljana Bežigrad v obdobju 1987–2017.

Grafikon 4 prikazuje, da je najmanj padavin za meteorološko postajo Novo mesto padlo v letih 2000, 2004 in 2011.



Grafikon 4: Letna količina padavin za meteorološko postajo Novo mesto v obdobju 1987–2017.

Iz grafikona 5 opazimo, da je na letni ravni v Postojni najmanj padavin padlo v letih 2003, 2005, 2006, 2007, 2011, 2012 in 2015.



Grafikon 5: Letna količina padavin za meteorološko postajo Postojna v obdobju 1987–2017.

Če primerjamo grafikone 2–5, ki prikazujejo letne količine padavin za meteorološke postaje Lendava, Ljubljana Bežigrad, Novo Mesto in Postojna, lahko rečemo, da je bilo najmanj padavin v obdobju 1987–2017 izmerjenih v Lendavi, Novem mestu, Ljubljani Bežigrad, največ v Postojni.

Rezultate izračunih indeksov SPI1, SPI2, SPI3, SPI4, SPI6, SPI9 in SPI12 smo grafično prikazali v poglavju 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3, 4.1.4 in prilogi A. Vsi izračuni, za vse meteorološke postaje se nanašajo na obdobje od 1987 do 2017.

V splošnem velja, da za normalne razmere štejemo, ko je vrednost indeksa med -1 in 1 . Izredno sušna obdobja nastopijo, ko vrednost indeksa pade pod -1 , izrazito mokra obdobja nastopijo, ko se indeks dvigne nad 1 (ARSO, 2018a). V osrednjem delu magistrske naloge smo prikazali indeks SPI1 in SPI12 za vse meteorološke postaje, preostali izračunani indeksi so v prilogi A. Na grafikonih indeksa SPI smo označili sušna obdobja z rdečo barvo, z zeleno barvo so označena obdobja brez suše, pri tem smo uporabili klasifikacijo suše, ki smo jo podali v poglavju 2.3.

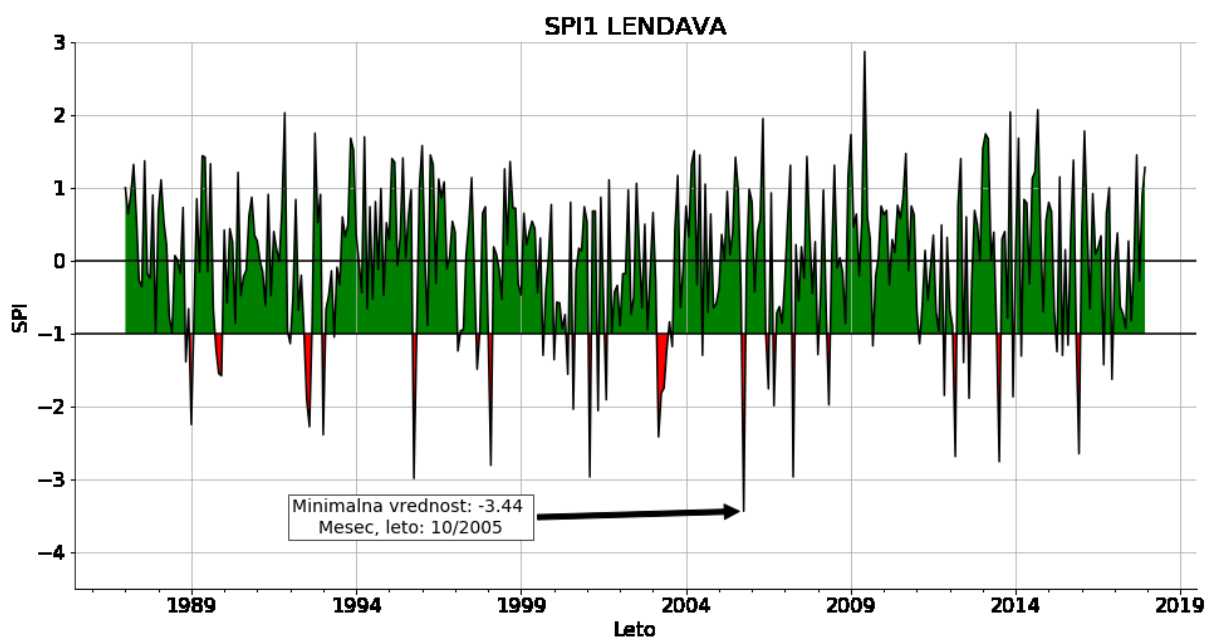
4.1.1 SPI za postajo Lendava

Grafikona 6 in 7 prikazujeta vrednosti indeksa SPI1 in SPI12 za meteorološko postajo Lendava (ostali grafi so v prilogi A. 1).

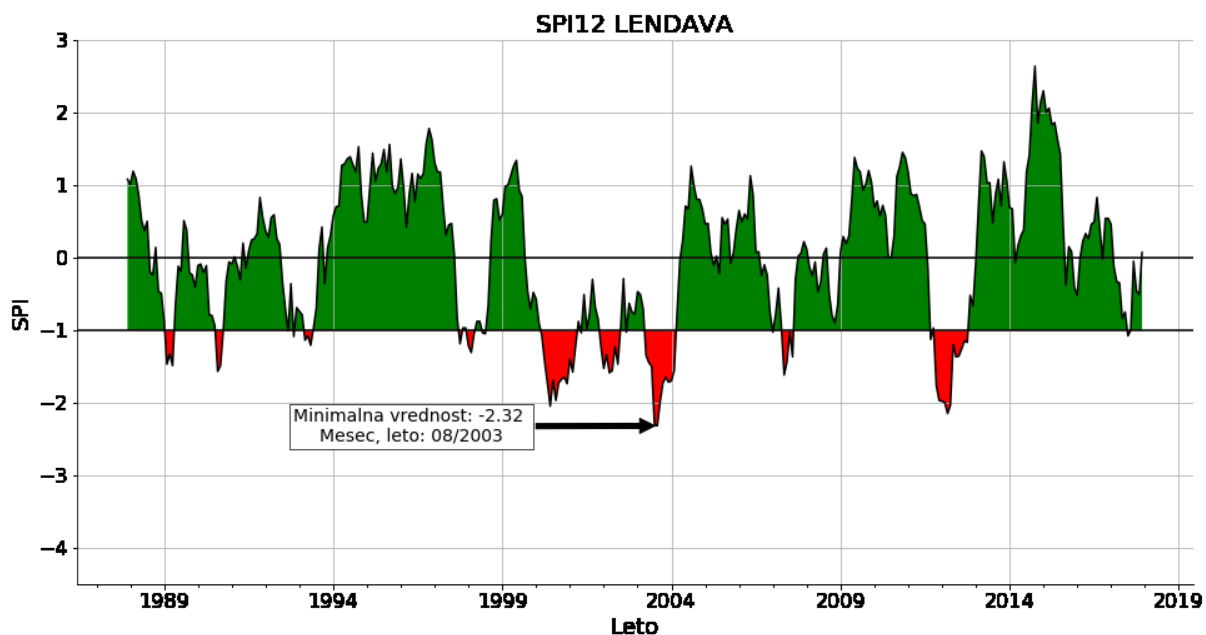
Ko primerjamo med seboj grafikon 6 in 7 ter grafikone iz priloge A. 1 ugotovimo, da je na krajših časovnih skalah (enega, dveh, treh mesecev) zaznati več sušnih dogodkov, ki trajajo manj časa. Grafikoni indeksov izračunani za daljše časovne skale (šestih, devetih in dvanajstih mesecev), pa prikazujejo številčno manj sušnih dogodkov, vendar ti trajajo dlje čas. S tem je tudi povezano dejstvo, da grafikoni s krajšimi časovnimi skalami prikazuje večjo spremenljivost. Kmetijsko sušo, kot smo že

omenili, je zaznati v obdobju od dveh do štirih mesecev. Hidrološka suša pa nastane, ko je pomanjkanje padavin daljše od šestih mesecev.

Grafikon 7 prikazuje, da je najhujša suša Lendavo prizadela leta 2003, ko doseže svojo najvišjo vrednost avgusta ($-2,32$) in junija ($-2,31$). Iz grafikona 7 vidimo, da v oktobru leta 1999 vrednost SPI pade pod 0 in ne doseže pozitivne vrednosti do maja leta 2004. Če to primerjamo s SPI1, ki v tem obdobju večkrat preseže pozitivno vrednost, kar odraža, da suša v nekem času na izbrano območje ni bila prisotna. Običajno indeksi izračunani za krajše časovne skale doseže ekstremnejše vrednosti, v primerjavi z indeksi izračunanim za daljše časovne skale. Nenadne spremembe indeksa SPI1, SPI2, SPI3 v času pojasnijo dejstvo, da so ti indeksi izračunani na podlagi (enega, dveh, treh mesecev) in zato bolj variirajo. Če to primerjamo z indeksom SPI12, ki je izračunan na podlagi 12 mesecev, lahko pričakujemo manjša nihanja skozi čas, kljub temu, da je bil npr. eden izmed mesecev bolj sušen. Preglednica 5 prikazuje, da je bila najhujša suša za obdobje 1987–2017 v Lendavi določena na podlagi SPI3, SPI4, SPI6, SPI9 in SPI12 za leto 2003.



Grafikon 6: SPI1 v obdobje 1987–2017 za meteorološko postajo Lendava.



Grafikon 7: SPI12 v obdobje 1987–2017 za meteorološko postajo Lendava.

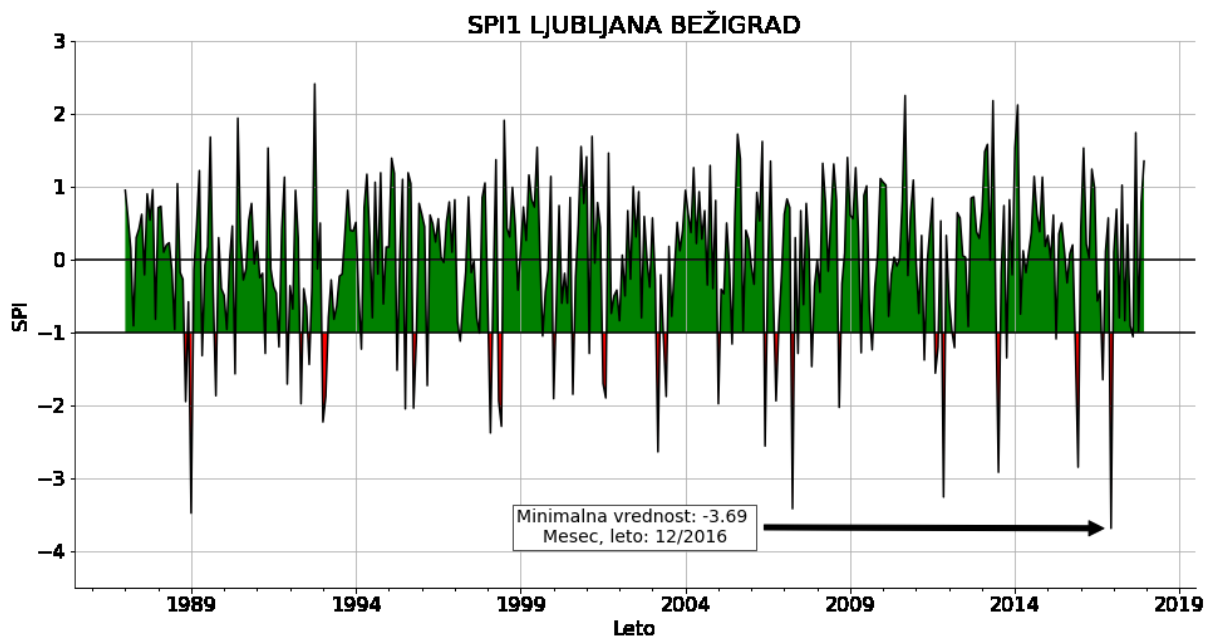
Preglednica 5: Najnižje vrednosti indeksa SPI s pripadajočimi količinami padavin določenimi za obdobje 1987–2017 na meteorološki postaji Lendava.

Lendava	mesec, leto	najnižja vrednost	padavine [mm]
SPI1	oktober, 2005	–3,44	0,2
SPI2	avgust, 1992	–3,06	28,8
SPI3	maj, 2003	–3,26	37,0
SPI4	junij, 2003	–3,04	89,2
SPI6	julij, 2003	–3,06	160,0
SPI9	julij, 2003	–2,80	277,1
SPI12	avgusta, 2003	–2,32	440,4

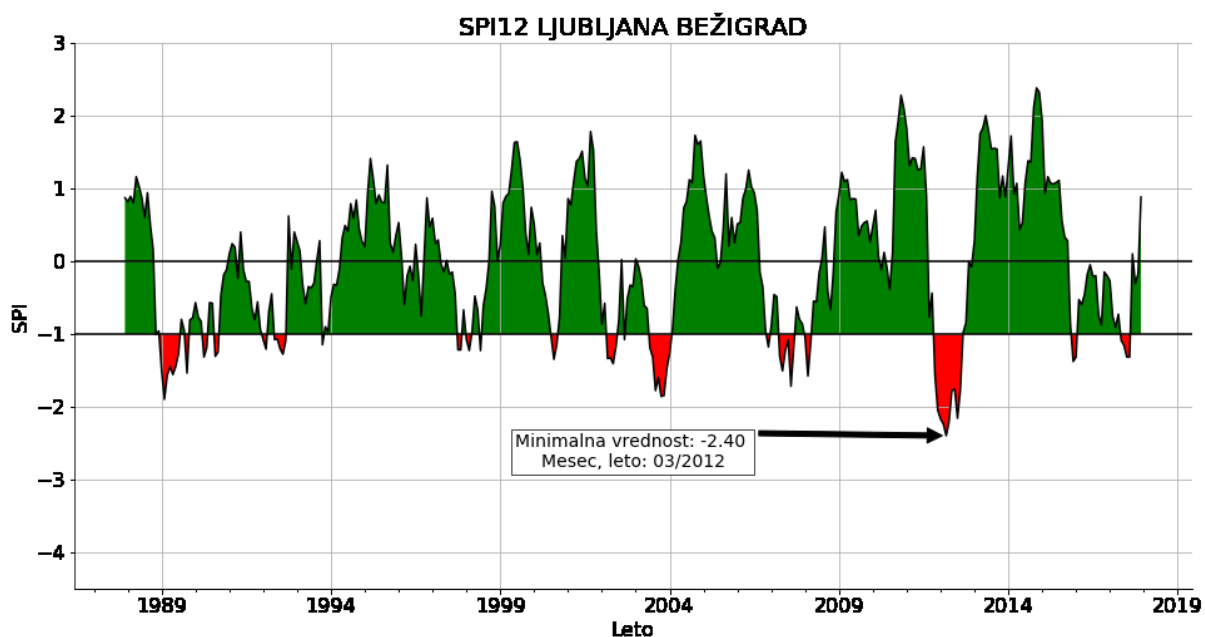
4.1.2 SPI za postajo Ljubljana Bežigrad

Grafikona 8 in 9 prikazujeta vrednosti indeksa SPI1 in SPI12 za meteorološko postajo Ljubljana Bežigrad (ostali grafi so v prilogi A. 2).

SPI12 prikazuje, da je bilo v izbranem obdobju, kar nekaj sušnih let. Najnižjo vrednost pa doseže indeks SPI12, marca 2012, in sicer je njegova vrednost –2,40 (preglednica 6). Časovno najdaljše sušno obdobje izračunano s SPI12 je trajalo dobri dve leti, od novembra 1988 do decembra 1990, v tem obdobju vrednost SPI12 ne doseže vrednosti 0. Leta 2016 indeks SPI1 (–3,69) doseže najnižjo vrednost, ko v mesecu decembru pade le 0,1 mm padavin. Kot prikazuje preglednica 6, indeksa SPI4 in SPI6, oba dosežeta najnižjo vrednost v letu 2003, in sicer po vrsti junija oziroma avgusta.



Grafikon 8: SPI1 v obdobje 1987–2017 za meteorološko postajo Ljubljana Bežigrad.



Grafikon 9: SPI12 v obdobje 1987–2017 za meteorološko postajo Ljubljana Bežigrad.

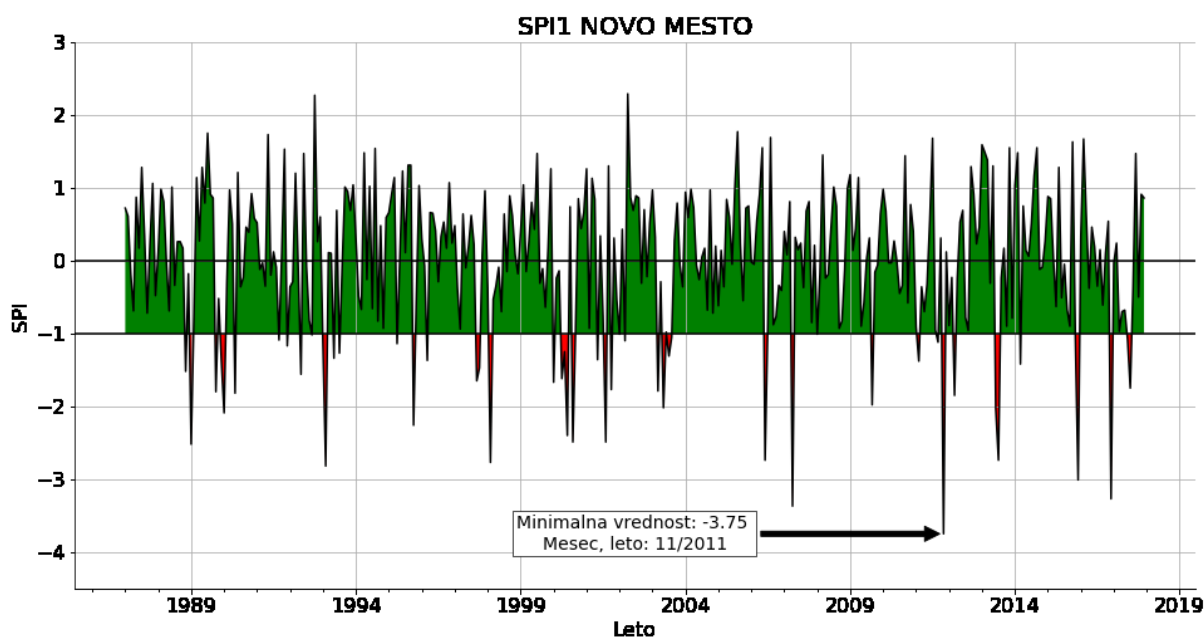
Preglednica 6: Najnižje vrednosti indeksa SPI s pripadajočimi količinami padavin določenimi za obdobje 1987–2017 na meteorološki postaji Ljubljana Bežigrad.

Ljubljana Bežigrad	mesec, leto	najnižja vrednost	padavine [mm]
SPI1	december, 2016	–3,69	0,1
SPI2	junij, 1998	–3,08	95,5
SPI3	januar, 1989	–2,77	59,9
SPI4	junij, 2003	–2,80	213,3
SPI6	avgust, 2003	–2,56	406,2
SPI9	april, 2012	–2,53	594,6
SPI12	marec, 2012	–2,40	905,2

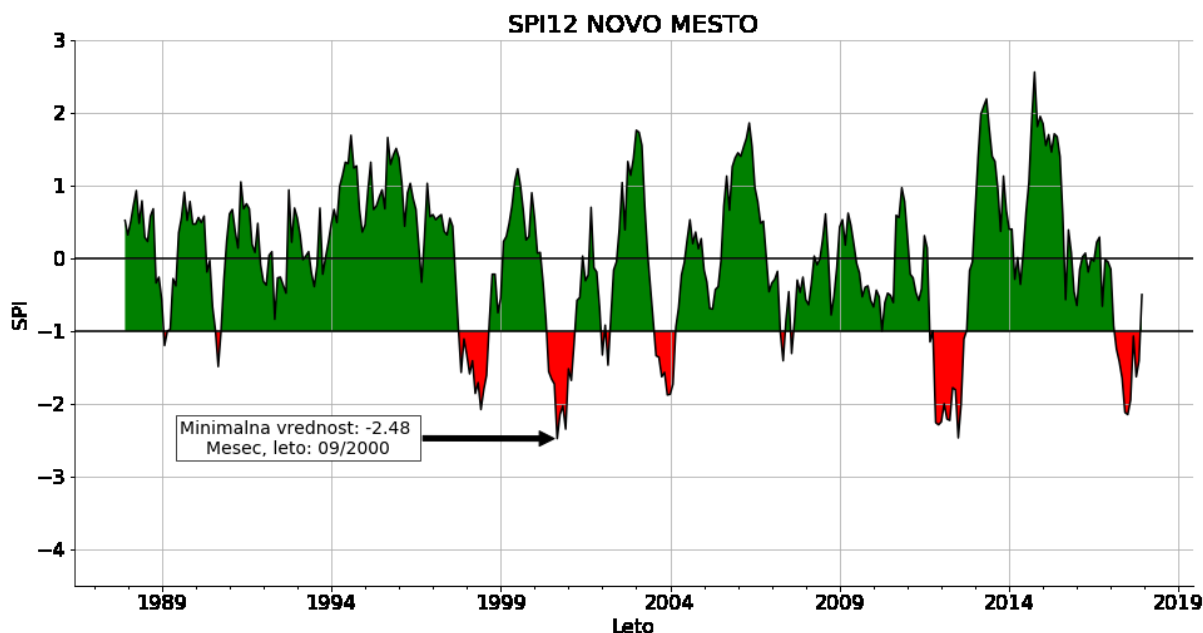
4.1.3 SPI za postajo Novo mesto

Grafikona 10 in 11 prikazujeta vrednosti indeksa SPI1 in SPI12 za meteorološko postajo Novo mesto (preostali izračunani indeksi se nahajajo v prilogi A. 3).

Ena izmed najdaljših suš na letni ravni je bila v Novem mestu, kot prikazuje grafikon 11, od septembra 2011 do decembra 2012. V tem obdobju doseže indeks SPI1 (grafikon 10) svojo najnižjo vrednost, ko je novembra leta 2011, padlo le 2,9 mm padavin. Iz preglednice 7 vidimo, da najnižje vrednosti indeksi SPI2 (–3,04), SPI3 (–3,29) in SPI6 (–2,99) dosežejo v juniju leta 2000. SPI9 in SPI12 dosežeta najnižjo vrednost indeksa septembra leta 2000, ko je od januarja do septembra 2000 padlo le 411,4 mm padavin, oziroma od oktobra 1999 do septembra 2000, le 753,1 mm padavin.



Grafikon 10: SPI1 v obdobje 1987–2017 za meteorološko postajo Novo mesto.



Grafikon 11: SPI12 v obdobje 1987–2017 za meteorološko postajo Novo mesto.

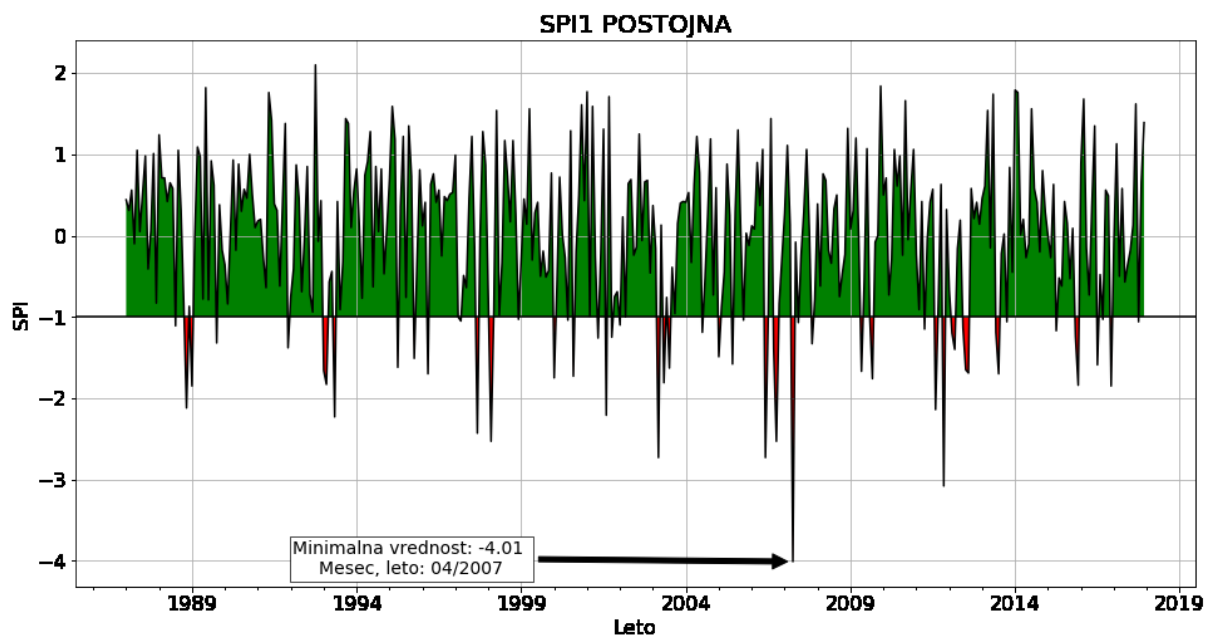
Preglednica 7: Najnižje vrednosti indeksa SPI s pripadajočimi količinami padavin določenimi za obdobje 1987–2017 na meteorološki postaji Novo mesto.

Novo mesto	mesec, leto	najnižja vrednost	padavine [mm]
SPI1	november, 2011	–3,75	2,9
SPI2	junij, 2000	–3,04	82,2
SPI3	junij, 2000	–3,29	109,5
SPI4	januar, 1990	–3,01	117,5
SPI6	junij, 2000	–2,99	211,9
SPI9	september, 2000	–3,06	411,4
SPI12	september, 2000	–2,48	753,1

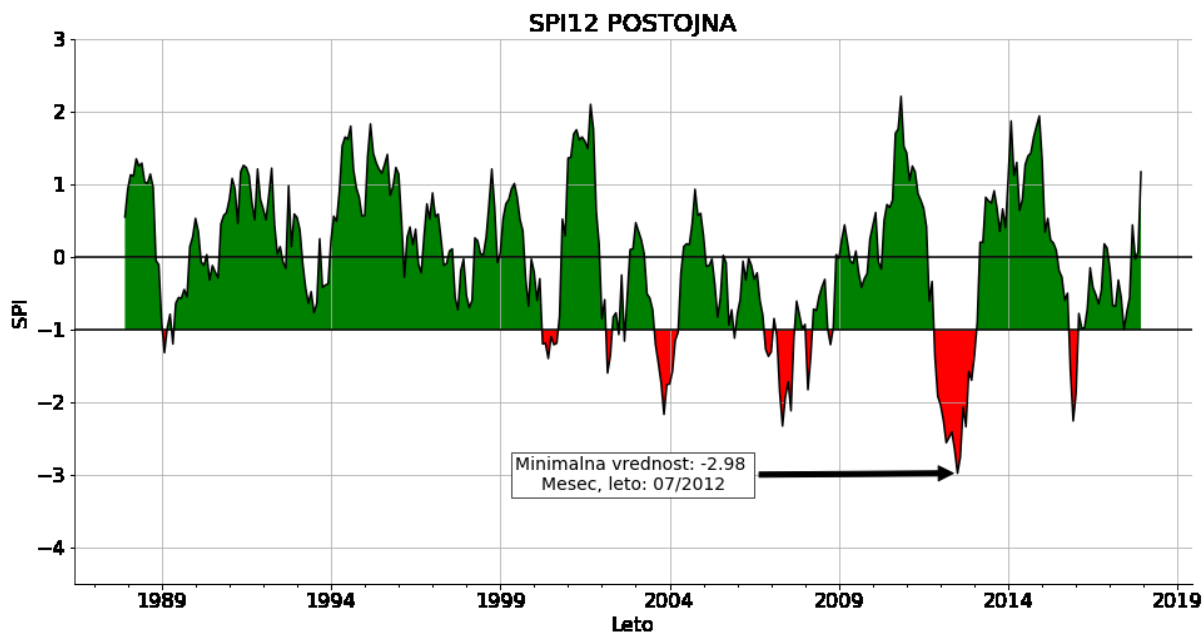
4.1.4 SPI za postajo Postojna

Grafikona 12 in 13 prikazujeta vrednosti indeksa SPI1 in SPI12 za meteorološko postajo Postojna (preostali izračunani indeksi se nahajajo v prilogi A. 4).

V aprilu leta 2007 SPI1 doseže svojo minimalno vrednost (–4,1), ko je padlo le 0,5 mm padavin. SPI3 in SPI4 identificirata najhujšo sušo januarja 1989. Najintenzivnejša in najdaljša suša, ki jo identificira indeks SPI12 za meteorološko postajo Lendava, se je začela septembra 2011 in trajala vse do februarja 2013. Kot prikazuje preglednica 8, v tem obdobju dosežeta tudi indeksa SPI9 (–2,99) in SPI12 (–2,98) svojo minimalno vrednost.



Grafikon 12: SPI1 v obdobje 1987–2017 za meteorološko postajo Postojna.

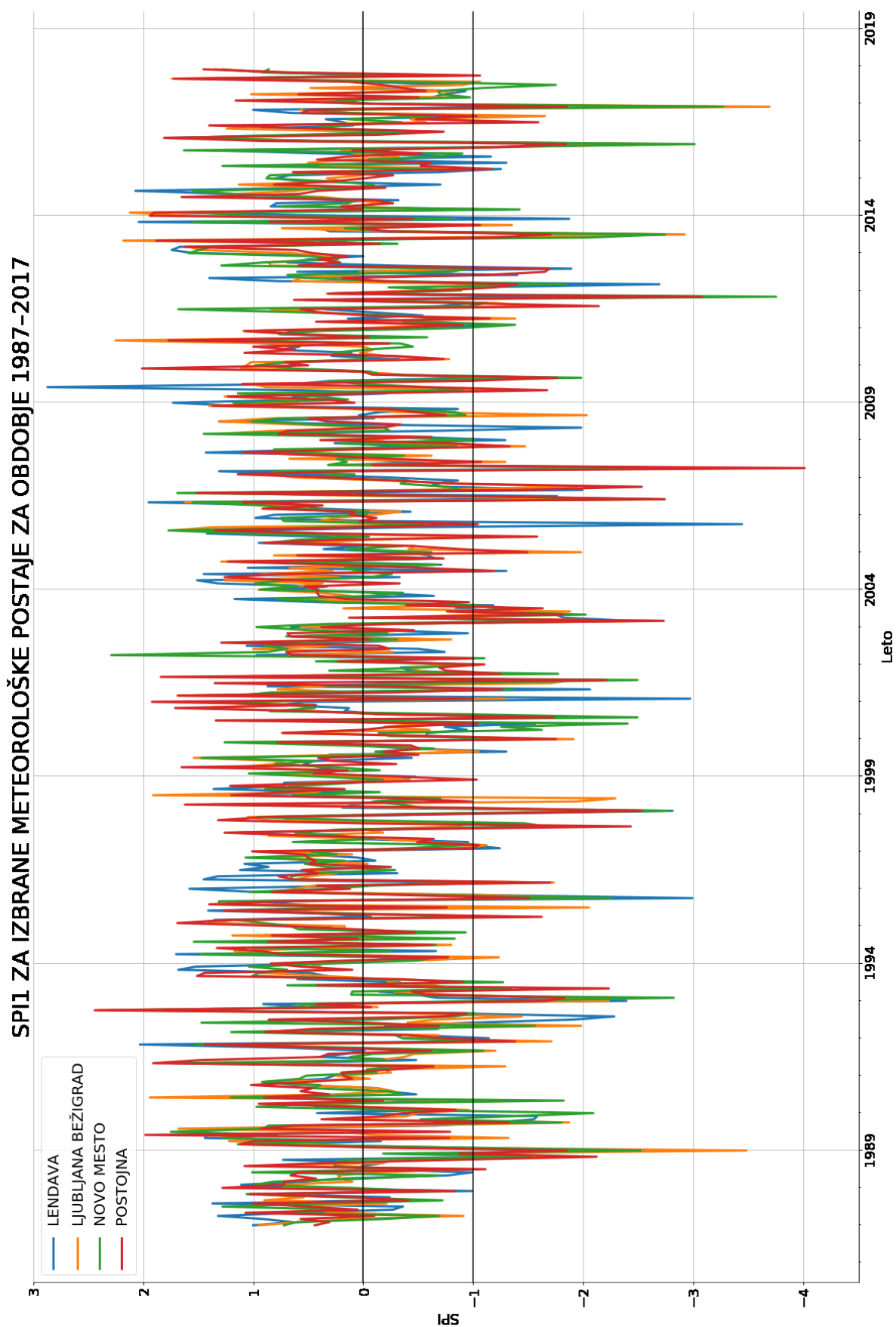


Grafikon 13: SPI12 v obdobje 1987–2017 za meteorološko postajo Postojna.

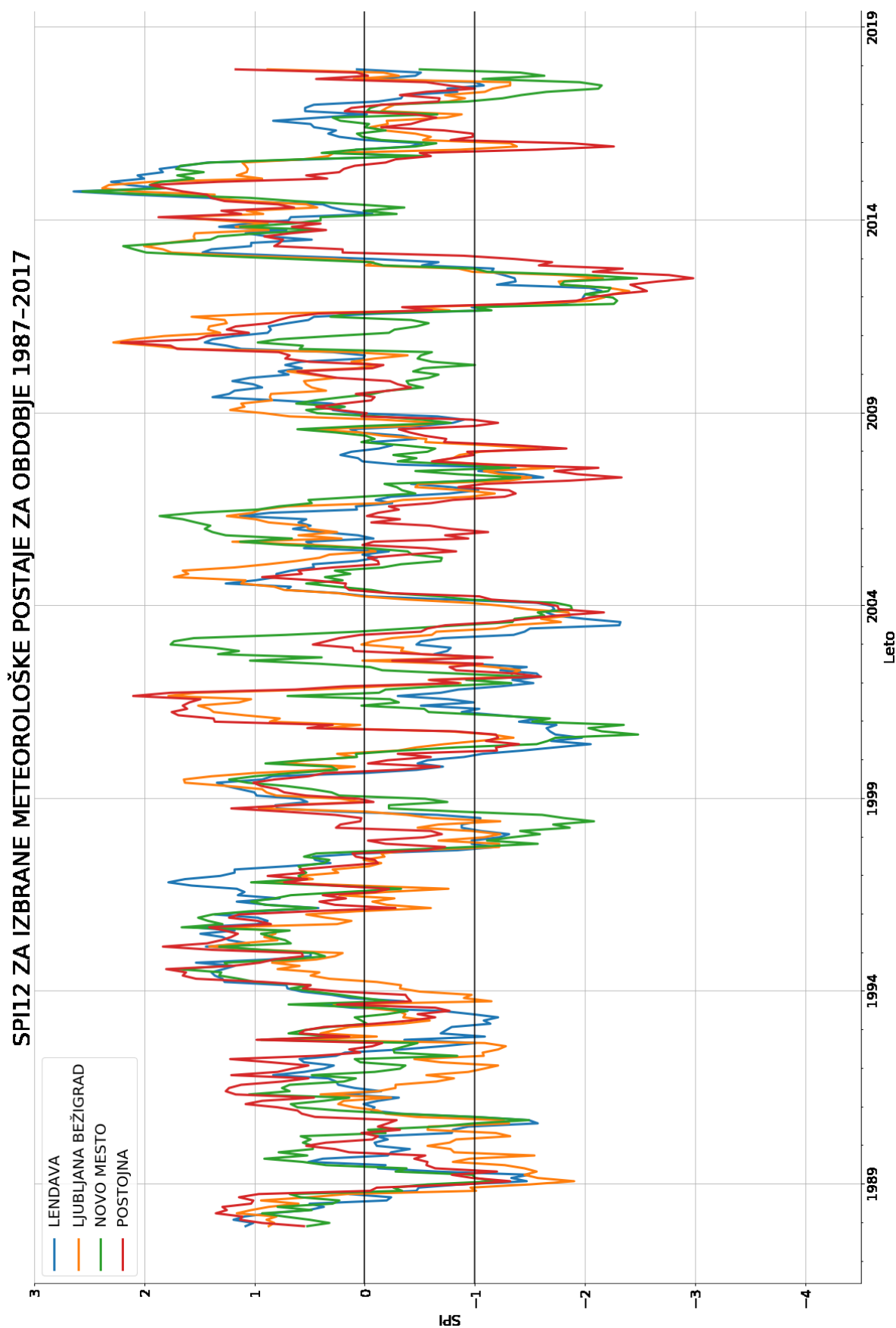
Preglednica 8: Najnižje vrednosti indeksa SPI s pripadajočimi količinami padavin določenimi za obdobje 1987–2017 na meteorološki postaji Postojna.

Postojna	mesec, leto	najnižja vrednost	padavine [mm]
SPI1	april, 2007	–4,01	0,5
SPI2	oktober, 2006	–2,87	76,7
SPI3	januar, 1989	–2,92	55,9
SPI4	januar, 1989	–2,78	132,4
SPI6	avgust, 2003	–2,57	343,3
SPI9	april, 2012	–2,99	627,7
SPI12	julij, 2012	–2,98	859,0

Grafikon 14 Grafikon 14 prikazuje, da SPI1 indeks izračunan za vse štiri meteorološke postaje. Za nekatere glavne sušne dogodke je na krajši časovni skali zaznati, da se za vse meteorološke postaje zgodijo ob približno enakem času, vendar se po meteoroloških postajah intenziteta sušnih dogodkov razlikuje. Zaznamo tudi, da indeks SPI1 ob enakih časih, za različne meteorološke postaje nekje prikazuje močo, drugje sušo. Na grafikonu 15 je razvidno, da padavine izračunane za daljšo časovno skalo za vse štiri meteorološke postaje potekajo dokaj usklajeno. Opaziti je nekatera odstopanja indeksa SPI12, npr. leta 2001 je bilo v Postojni in Ljubljani nadpovprečno padavin, ko so istega leta v Lendavi na letni ravni zabeležili pomanjkanje padavin. Leta 2012 so v vseh izbranih krajih zabeležili veliko pomanjkanje padavin v obdobju od 1987 do leta 2017, na letni ravni.



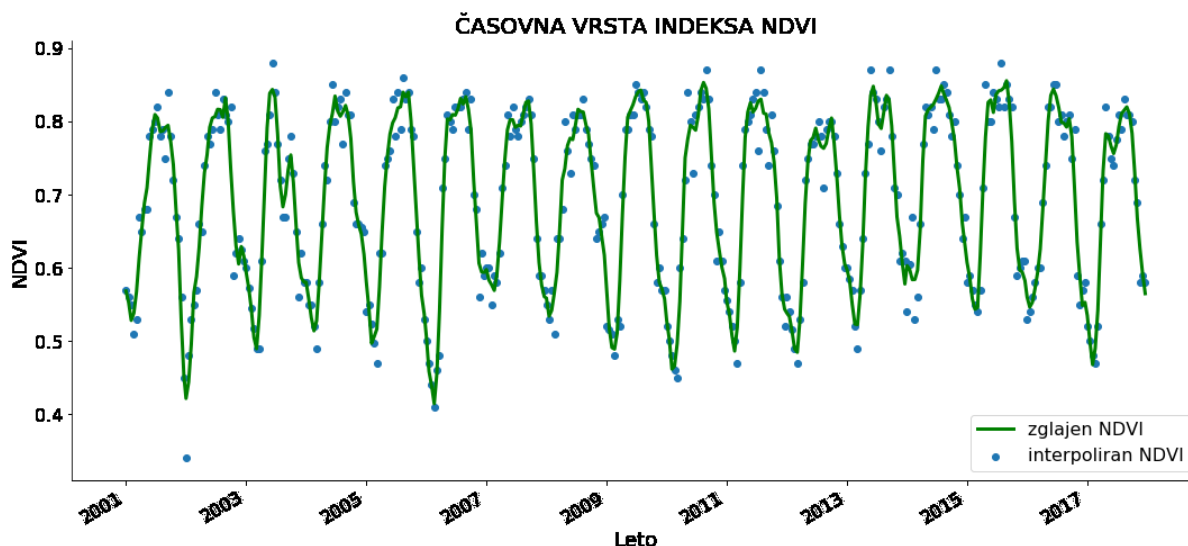
Grafikon 14: Prikaz indeksa SPI1 za meteorološko postajo Lendava, Ljubljana Bežigrad, Novo mesto in Postojna v obdobju 1987–2017.



Grafikon 15: Prikaz indeksa SPI12 za meteorološko postajo Lendava, Ljubljana Bežigrad, Novo mesto in Postojna v obdobju 1987-2017.

4.2 Izračun indeksa stanja vegetacije (VCI)

Za izračun indeksa VCI smo uporabili podatke časovnih serij (MOD13Q1). Satelitski posnetki so bili georeferencirani v geografsko projekcijo na elipsoid WGS84, transformirani v D48/GK in prevzorčeni v rastrsko mrežo 250 m. Najprej je bilo potrebno obdelati vse meritve, saj te vsebujejo precejšen delež šuma oz. nenatančnih meritev. V časovnih vrstah meritve tudi manjkajo (npr. zaradi oblakov itd.), kar je označeno z vrednostjo $-2,0$. Obdelava je potekala tako, da smo najprej meritvam, ki so imele vrednost $-2,0$ predpisali vrednost ni podatka. Manjkajoče vrednosti smo interpolirali in časovne serije zgladili s filtrom Savitzky–Golay za glajenje funkcij, da smo odstranil šum. Grafikon 16 prikazuje primerjavo interpoliranega NDVI indeksa in zglajenega NDVI indeksa s filtrom Savitzky–Golay za naključno izbrano točko.



Grafikon 16: Časovna vrsta interpoliranega in zglajenega indeksa NDVI za izbrano točko.

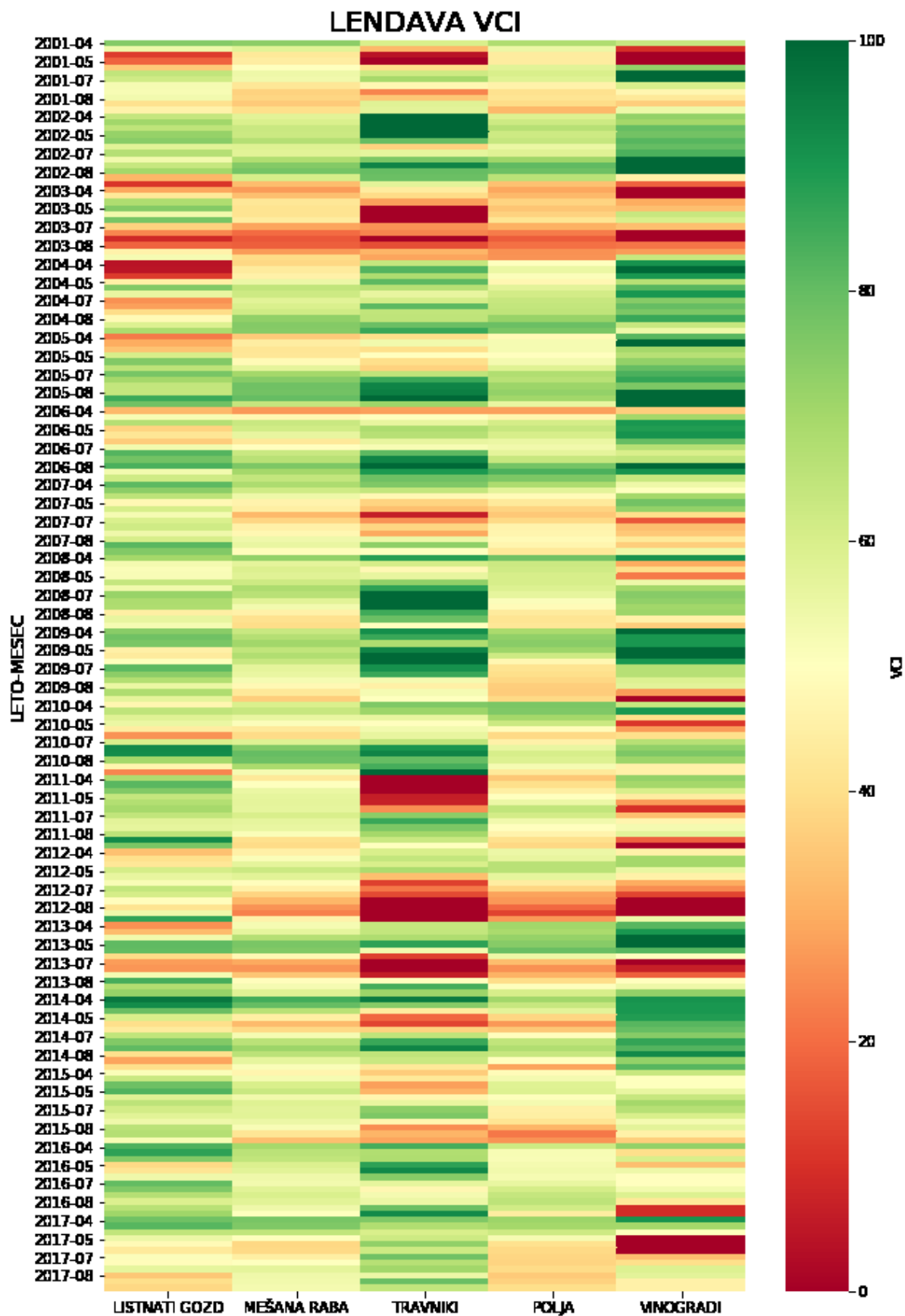
Zglajen NDVI indeks smo uporabili za izračun indeksa VCI. Indeks smo izračunali za rastno obdobje od aprila do septembra, v obdobju od 2001 do 2017, za vsako meteorološko postajo posebej po posamičnih dejanskih rabah tal. Izračunan VCI smo glede na njegovo intenziteto prikazali grafično po posameznih meteoroloških postajah in za posamezno dejansko rabo tal.

4.2.1 VCI Lendava

Na podlagi izračunanega indeksa VCI smo ugotovili, da je bilo najbolj sušno leto 2003, v katerem za daljša obdobja zaznamo ekstremno, hudo, zmerno in blago sušo. Sledilo mu je leto 2013, ko suša spet prizadene vse dejanske rabe v vseh intenzitetah od ekstremne do blage suše. Obsežnejša suša se pojavi še v letu 2012. V preostalih letih zaznamo manjša sušna obdobja, ki niso prisotna na vseh dejanskih rabah. Omenimo še leto 2001, ko smo zaznali krajša obdobja ekstremne, hude, zmerne in blage suše. Leta 2002 je bilo zelo kratko obdobje zmerne in hude suše. Leta 2004 je bilo v aprilu mesecu zaznati ekstremno, hudo in zmerno sušo predvsem na listnatem gozdu. Bolj obsežno sušo je bilo opaziti še leta

2011 na travnikih, ko je bila od avgusta do septembra ekstrema suša. V letu 2017, suša v največji meri prizadene vinograde (daljše obdobje ekstremske suše).

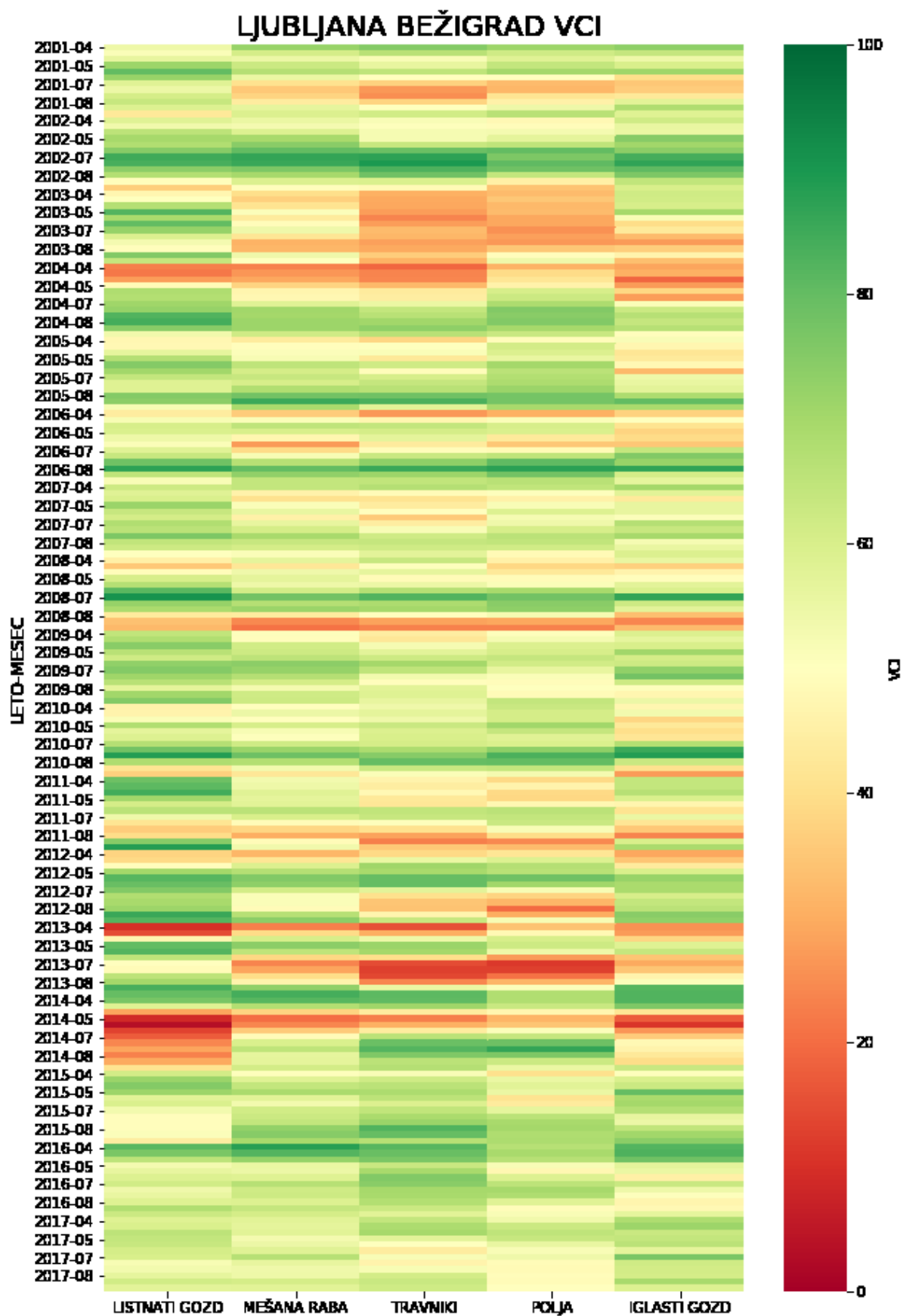
Grafikon 17 prikazuje vrednosti VCI v rastni sezoni (od aprila do septembra) v obdobju med leti 2001 in 2017, ločeno po dejanskih rabah za Lendavo.



Grafikon 17: Prikaz intenzitete VCI za Lendavo po dejanskih rabah.

4.2.2 VCI Ljubljana Bežigrad

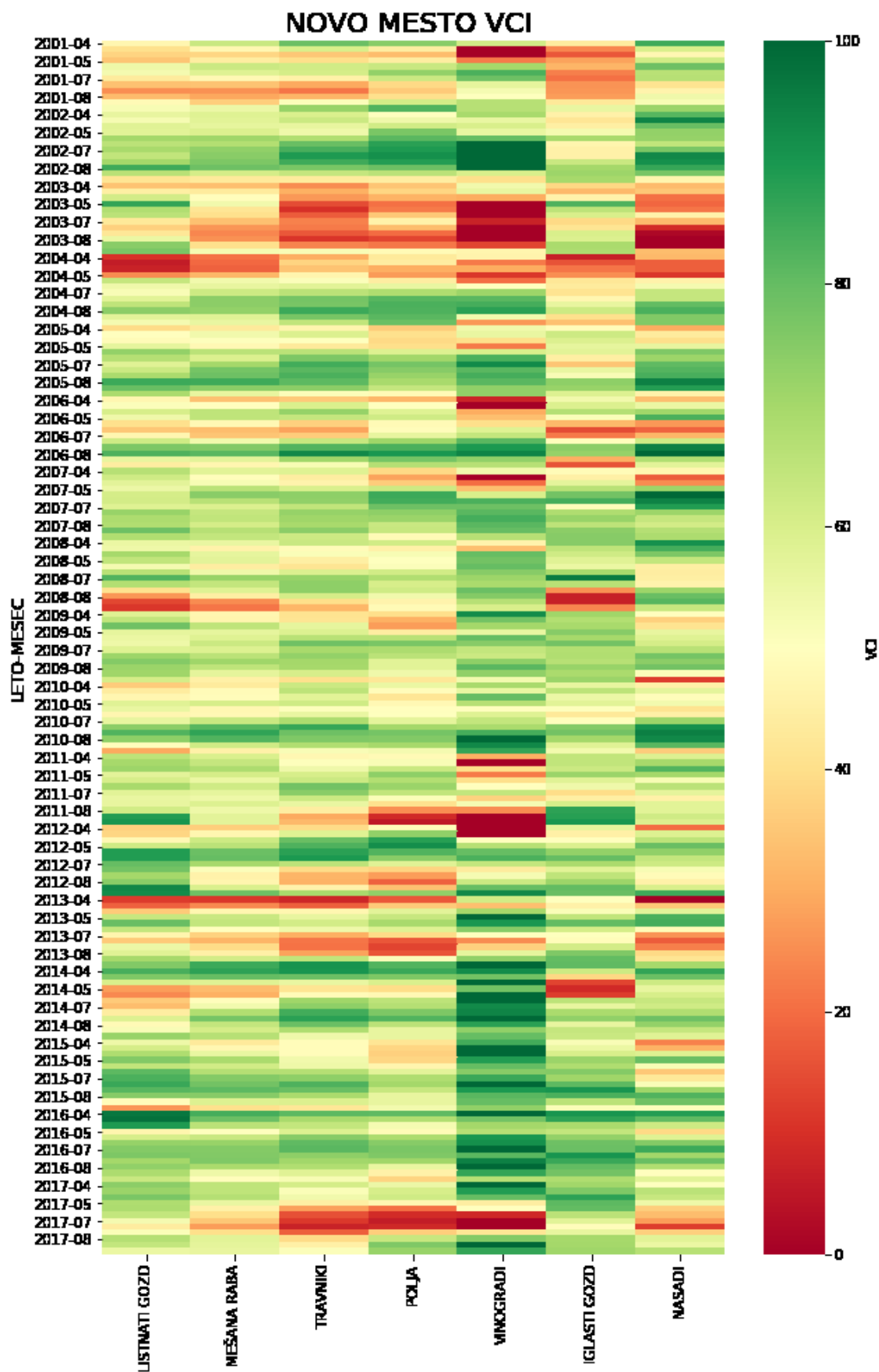
V Ljubljani zaznamo najdaljše sušno obdobje prav tako leta 2003. V večji meri gre za zmerno in blago sušo. Sledi mu leto 2013, ki je po časovnem obsegu trajalo nekoliko manj časa, vendar pa je bila intenziteta suše večja (hujša suša se pojavi na travnikih in listnatem gozdu). Leta 2008 in 2011 prizadene suša spet vse rabe. Leta 2012 se suša pojavi v večji meri na poljih. Leta 2014 zaznamo spet daljša sušna obdobja, ki se pojavijo na vseh rabah meseca maja in junija in vztraja na listnatem gozdu do septembra meseca. Če izpostavimo dejstvo, da je v času med 30. januarjem in 10. februarjem 2014 Slovenijo prizadel najhujši žledolom v zadnjem desetletju, lahko sklepamo, da je nizka vrednost indeksa NDVI in posledično indeksa VCI, posledica žledoloma (Ministrstvo za okolje in prostor, 2018). Leto 2014 pa je bilo tudi zelo namočeno leto. Na podlagi tega, lahko zaključimo, da samo uporaba indeksa VCI ne zadostuje za natančno spremljanje suše.



Grafikon 18: Prikaz intenzitete VCI za Ljubljana Bežigrad po dejanskih rabah.

4.2.3 VCI Novo mesto

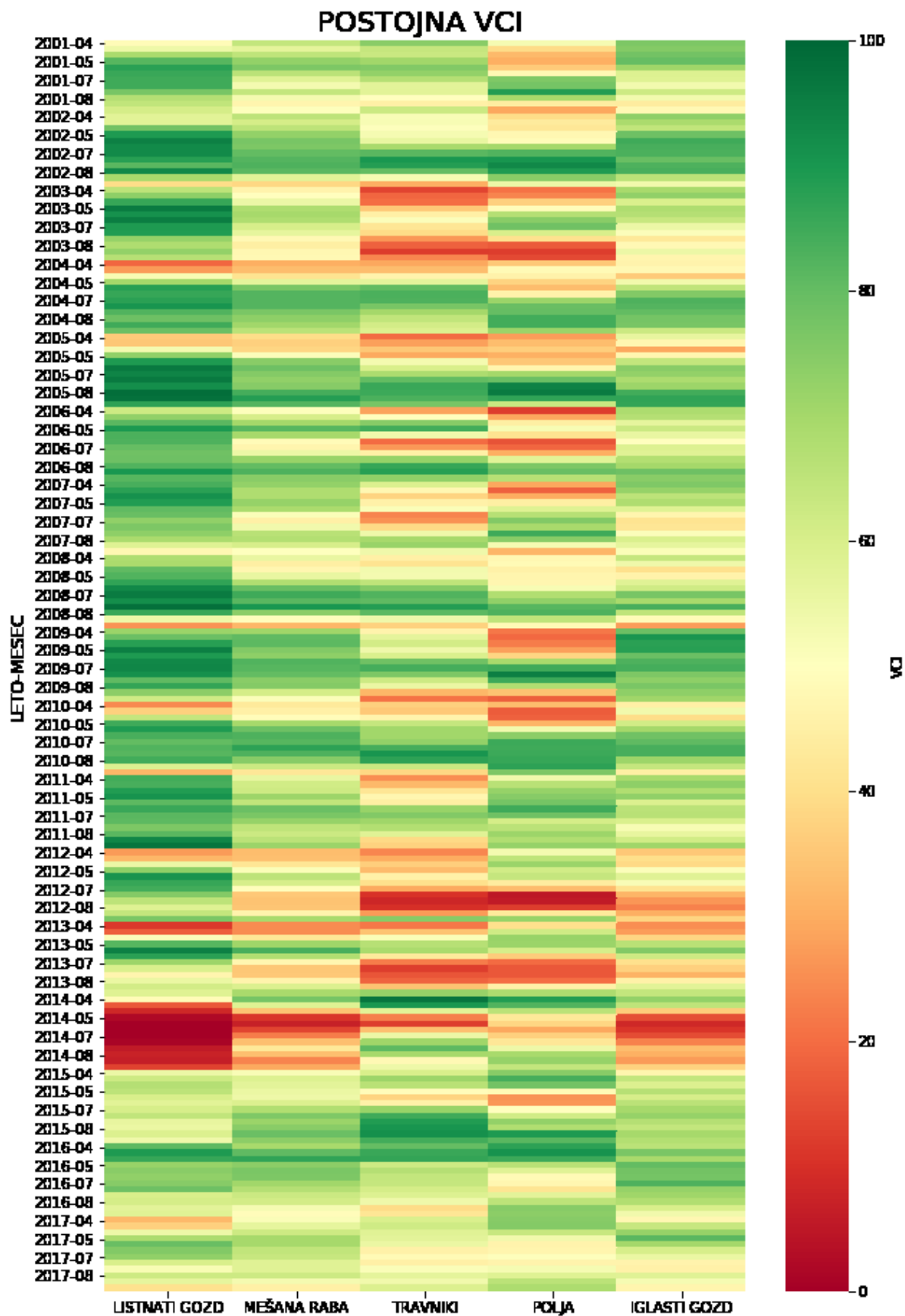
V Novem mestu opazimo, da je bilo najbolj sušno leto 2003, saj se pojavijo daljša obdobja ekstremne, hujše, zmerne in blage suše. Daljša sušna obdobja z večjo intenziteto se pojavijo še 2001, 2004, 2006, 2007, 2011, 2012, 2013 in 2017.



Grafikon 19: Prikaz intenzitete VCI za Novo mesto po dejanskih rabah.

4.2.4 VCI Postojna

S podatkov je razvidno, da je bilo v Postojni najbolj sušno leto 2014, vendar kot smo omenili je to posledica žledoloma. Nizke vrednosti indeksa VCI se pojavljajo za omenjeno leto pojavljajo skoraj čez celo leto, v največji meri na listnatem in iglastem gozdu. Bolj dolgotrajno sušo lahko zaznamo še v letu 2003, 2004, 2005, 2012 in 2013.

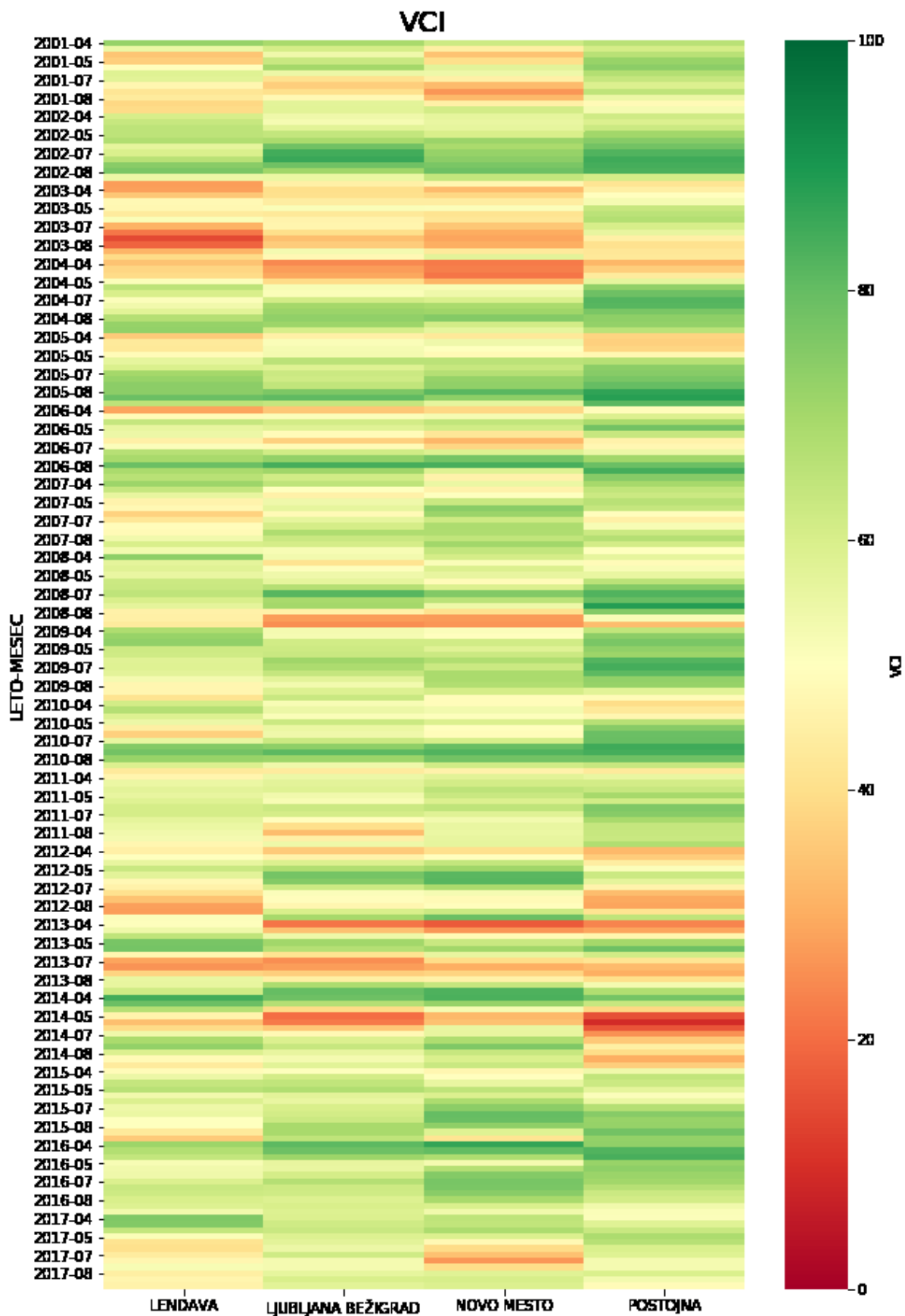


Grafikon 20: Prikaz intenzitete VCI za Postojno po dejanskih rabah.

Na podlagi grafikona 21, ki prikazuje izračunan indeks VCI (ob upoštevanju vseh rab po meteoroloških postajah), indeks VCI za sušna leta identificira:

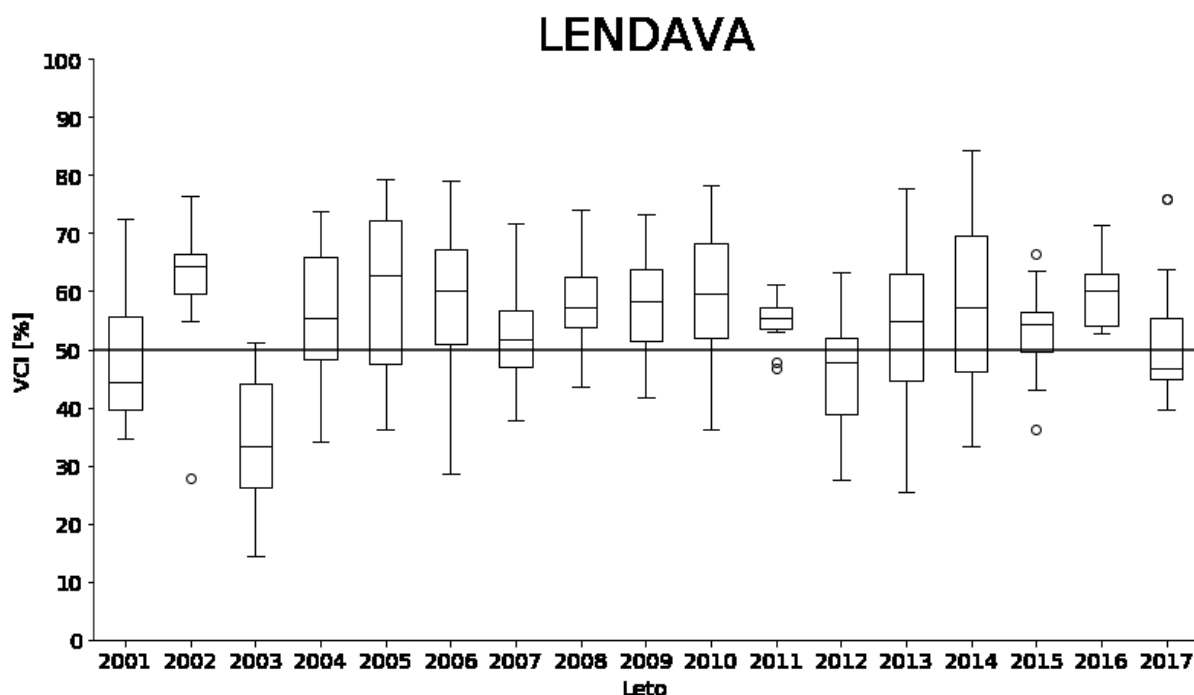
- Lendavi: 2001, 2003, 2004, 2005, 2007, 2010, 2012, 2013, 2014, 2015 in 2017;
- Ljubljana Bežigrad: 2001, 2003, 2004, 2006, 2008, 2011, 2013 in 2014;
- Novo mesto: 2001, 2003, 2004, 2006, 2008, 2013, 2014 in 2017;
- Postojna: 2004, 2005, 2008, 2010, 2012, 2013 in 2014.

Kot smo že ugotovili, leto 2014 indeks VCI napačno identificira zaradi žledoloma.



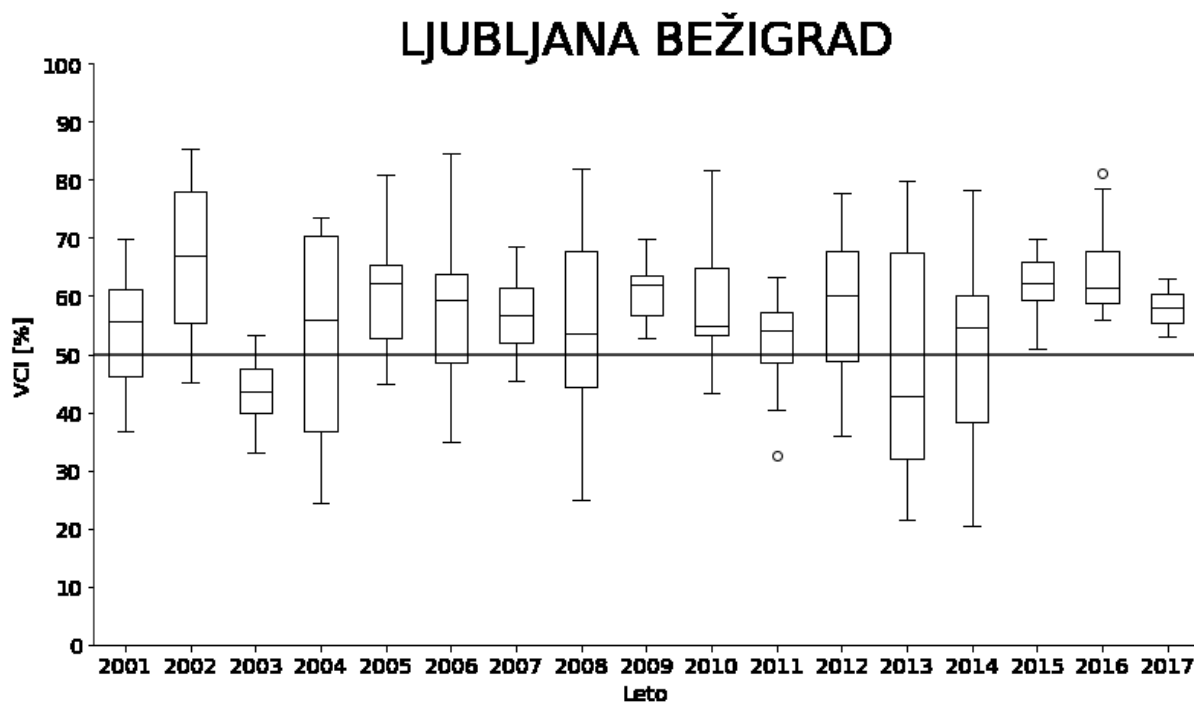
Grafikon 21: Prikaz intenzitete VCI (ob upoštevanju vseh rab) po izbranih meteoroloških postajah.

Graf kvartilov prikazuje povprečen VCI (vseh dejanskih rab) v obdobju od aprila do septembra, glede na posamezno leto. Iz grafikona 22 lahko razberemo, da je bilo v Lendavi najbolj sušno leto 2003.



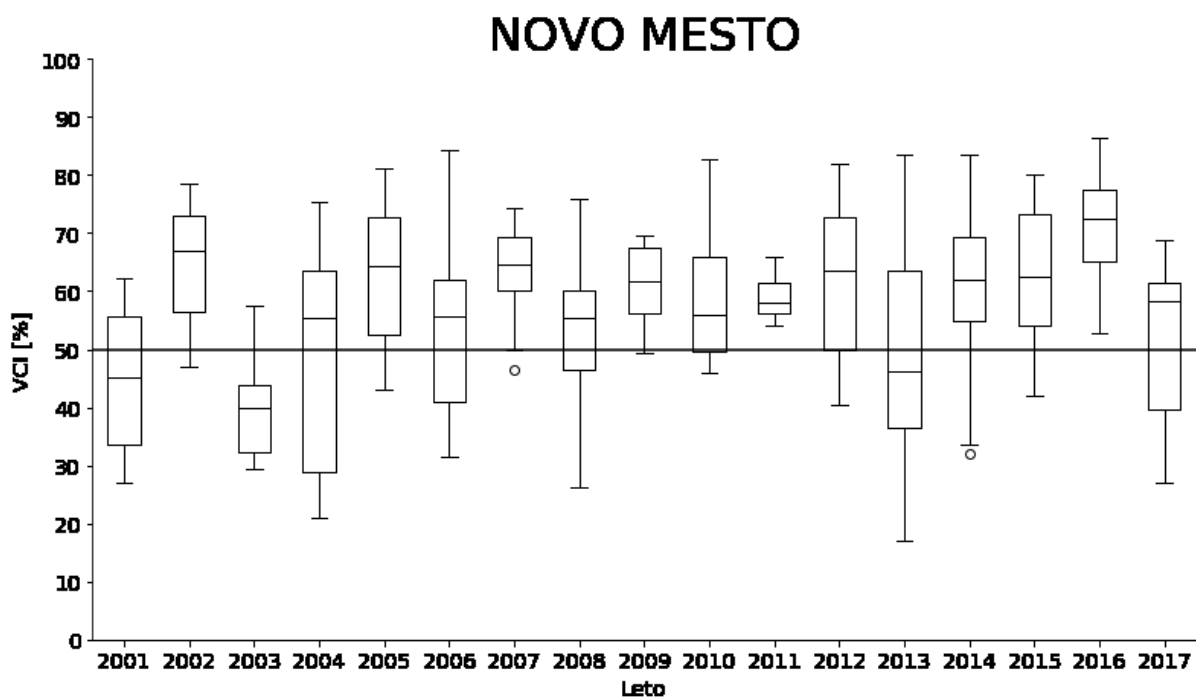
Grafikon 22: Graf kvartilov VCI za Lendavo.

Prav tako vidimo iz grafikona 23, da je za bilo za Ljubljano Bežigrad najbolj sušno leto 2003.



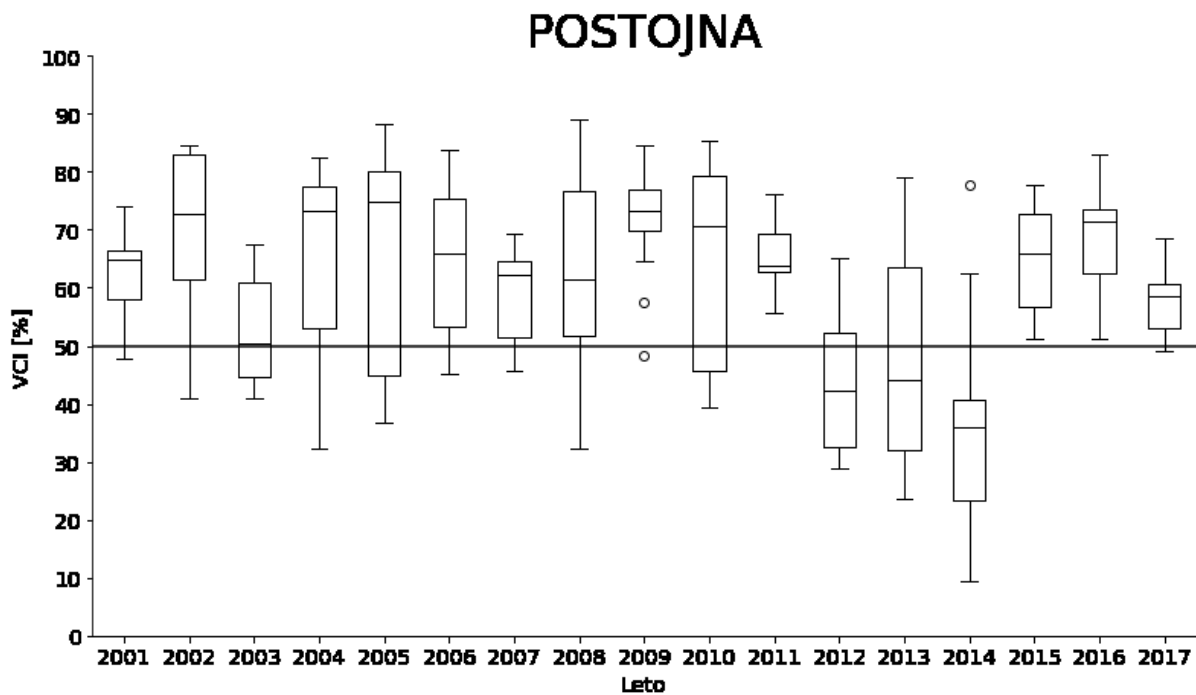
Grafikon 23: Graf kvartilov VCI Ljubljana Bežigrad.

Tudi za Novo mesto grafikon 24 prikazuje, da velja za najbolj sušno leto v obdobju 2001–2017, leto 2003.



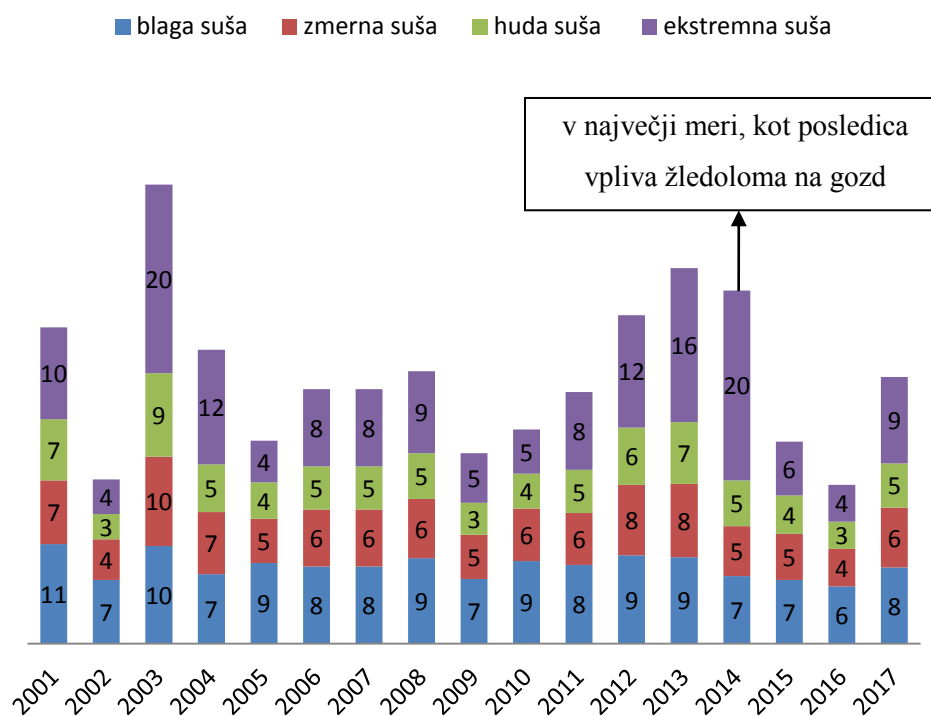
Grafikon 24: Graf kvartilov VCI Novo mesto.

Grafikon 25 prikazuje, da je bila v Postojni najhujša suša leta 2014, kar je napaka.



Grafikon 25: Graf kvartilov VCI Postojna.

Podatki satelitskih posnetkov pridobljenih za točke, ki se nahajajo na vplivnem območju izbranih meteoroloških postaj kažejo, da je bilo najbolj sušno leto v Sloveniji 2003. Pod vplivom suše je bilo 49 % vseh opazovanih površin, od tega kar 20 % pod vplivom ekstremne suše. Nato mu sledi leto 2013, ko je bilo pod vplivom suše 40% vseh opazovanih površin, od tega 16 % pod vplivom ekstremne suše in 7 % pod vplivom hude suše.



Grafikon 26: Prikaz suše v odstotkih glede na vrednosti VCI za vse štiri meteorološke postaje.

Po podatkih, ki jih navaja Sušnik in Gregorič (2017), je bilo v obdobju od 2001 do 2017 v Sloveniji zaznati lokalno oz. regionalno sušo v letih: 2001, 2006, 2007, 2009, 2011, 2012 ter na območju celotne Slovenije v letih 2003, 2013 in 2017.

Iz prikazanega lahko zaključimo, da smo tudi mi najhujše kmetijske suše na podlagi satelitskih posnetkov, z uporabo indeksa VCI, zaznali za leto 2003 in 2013. Indeks izračunan na podlagi satelitskih posnetkov identificira sušo leta 2014, čeprav je bilo omenjeno leto zelo namočeno. Kot smo že omenili je napačna identifikacija, posledica žledoloma, ki se odraža predvsem na gozdu.

4.3 Korelacija med indeksom stanja vegetacije (VCI) in standardiziranega padavinskega indeksa (SPI)

Izračunane vrednosti SPI1, SPI2, SPI3, SPI4, SPI6, SPI9 in SPI12 za štiri meteorološke postaje (Lendava, Ljubljana Bežigrad, Novo mesto in Postojna) smo nadalje uporabili za izračun korelacije z indeksom VCI. Ugotoviti smo hoteli, kakšna je povezava med sušnim indeksom, ki identificira

kmetijsko sušo (VCI) in indeksom (SPI), ki pomaga zaznati meteorološko sušo. Korelacijo smo izračunali na podlagi Pearsonovega korelacijskega testa tako, da smo primerjali vrednosti VCI in SPI pridobljene v istem mesecu.

Kadar se koeficient korelacije približuje vrednosti 1, sta spremenljivki močno pozitivno linearno povezani. V primeru, da ima koeficient korelacije vrednost 0, govorimo o zelo slabi linearni povezanosti. Vrednost koeficienta -1 pa pove, da sta spremenljivki močno negativno linearno povezani (Turk, 2012). Na tak način izračunana korelacija vsebuje sezonsko komponento in trend časovne vrste.

Korelacijo smo izračunali še na način, da smo za izbrane časovne vrste izračunali še razlike prvega reda (»first-order differences«), ki računa razlike med zaporednimi členi, in s tem odstranili trend iz časovne serije (DataCamp, 2018).

Preglednice 9–16 kažejo, da so po večini povezave med posameznimi rabami indeksa VCI in SPI zelo šibke povezanosti. Največja povezanost je med indeksoma SPI2 in VCI v Lendavi, za vinograde, in sicer 0,53. Na splošno je najnižja korelacija pri rabah listnatega gozda, iglastega gozda in mešane rabe, največja pa pri vinogradih. Pri dejanskih rabah iglasti gozd, listnati gozd in mešana raba opazimo tudi negativno povezanost med indeksom VCI in SPI.

Na podlagi pridobljenih rezultatov, lahko rečemo, da sta indeksa SPI in VCI za izbrane točke na slovenskem območju neodvisna.

Preglednica 9: Korelacija med indeksom VCI in SPI za Lendavo v obdobju od leta 2001 do 2017, izračunana s Pearsonovim koeficientom korelacije.

Lendava	listnati gozd	mešana raba	polja	travniki	vinogradi
SPI1	0,04	0,14	0,09	0,34	0,43
SPI2	0,00	0,20	0,18	0,47	0,53
SPI3	0,02	0,21	0,18	0,46	0,52
SPI4	0,04	0,22	0,20	0,46	0,51
SPI6	0,05	0,21	0,20	0,35	0,49
SPI9	0,07	0,18	0,15	0,29	0,39
SPI12	0,10	0,18	0,16	0,27	0,36

Preglednica 10: Korelacija med indeksom VCI in SPI za Lendavo v obdobju od leta 2001 do 2017, z odstranitvijo trenda.

Lendava	listnati gozd	mešana raba	polja	travniki	vinogradi
SPI1	0,04	0,05	0,02	0,16	0,21
SPI2	-0,08	0,07	0,10	0,37	0,18
SPI3	-0,06	0,10	0,09	0,37	0,16
SPI4	-0,03	0,12	0,12	0,43	0,17
SPI6	-0,01	0,12	0,11	0,34	0,15
SPI9	-0,03	0,06	0,09	0,27	0,04
SPI12	-0,03	0,09	0,15	0,32	0,10

Preglednica 11: Korelacija med indeksom VCI in SPI za Ljubljana Bežigrad v obdobju od leta 2001 do 2017, izračunana s Pearsonovim koeficientom korelacije.

Ljubljana Bežigrad	listnati gozd	mešana raba	polja	travniki	iglasti gozd
SPI1	0,00	0,17	0,23	0,24	0,10
SPI2	-0,08	0,15	0,23	0,26	0,03
SPI3	-0,06	0,14	0,22	0,25	0,04
SPI4	-0,06	0,11	0,20	0,23	0,05
SPI6	-0,09	0,04	0,12	0,12	-0,01
SPI9	-0,09	0,01	0,07	0,06	-0,05
SPI12	-0,08	0,00	0,05	0,04	-0,06

Preglednica 12: Korelacija med indeksom VCI in SPI za Ljubljana Bežigrad v obdobju od leta 2001 do 2017, z odstranitvijo trenda.

Ljubljana Bežigrad	listnati gozd	mešana raba	polja	travniki	iglasti gozd
SPI1	0,00	0,10	0,14	0,13	0,05
SPI2	-0,10	0,06	0,12	0,13	-0,01
SPI3	-0,09	0,07	0,11	0,11	0,01
SPI4	-0,09	0,05	0,11	0,11	0,02
SPI6	-0,11	0,03	0,07	0,07	-0,01
SPI9	-0,10	-0,01	0,02	0,00	-0,02
SPI12	-0,10	0,00	0,07	0,03	-0,01

Preglednica 13: Korelacija med indeksom VCI in SPI za Novo mesto v obdobju od leta 2001 do 2017, izračunana s Pearsonovim koeficientom korelacije.

Novo mesto	listnati gozd	mešana raba	polja	travniki	vinogradi	iglasti gozd	nasadi
SPI1	0,07	0,20	0,30	0,34	0,38	0,05	0,32
SPI2	0,01	0,16	0,28	0,33	0,37	-0,04	0,31
SPI3	-0,01	0,14	0,25	0,30	0,41	-0,08	0,28
SPI4	-0,01	0,13	0,23	0,28	0,46	-0,09	0,27
SPI6	-0,04	0,12	0,20	0,25	0,45	-0,10	0,25
SPI9	-0,09	0,06	0,14	0,18	0,41	-0,12	0,17
SPI12	-0,05	0,04	0,09	0,11	0,31	-0,05	0,06

Preglednica 14: Korelacija med indeksom VCI in SPI za Novo mesto v obdobju od leta 2001 do 2017, z odstranitvijo trenda.

Novo mesto	listnati gozd	mešana raba	polja	travniki	vinogradi	iglasti gozd	nasadi
SPI1	0,09	0,14	0,17	0,20	0,32	0,08	0,19
SPI2	0,03	0,09	0,12	0,14	0,22	0,05	0,12
SPI3	0,00	0,06	0,06	0,10	0,24	-0,01	0,09
SPI4	0,02	0,06	0,04	0,09	0,26	0,00	0,10
SPI6	0,02	0,06	0,02	0,07	0,17	0,02	0,12
SPI9	-0,07	-0,04	-0,03	-0,02	0,07	-0,05	0,03
SPI12	-0,09	-0,06	0,01	-0,02	0,06	-0,02	-0,04

Preglednica 15: Korelacija med indeksom VCI in SPI za Postojno v obdobju od leta 2001 do 2017, izračunana s Pearsonovim koeficientom korelacije.

Postojna	listnati gozd	mešana raba	polja	travniki	iglasti gozd
SPI1	-0,19	-0,01	0,18	0,21	-0,05
SPI2	-0,14	0,06	0,19	0,30	0,03
SPI3	-0,15	0,07	0,14	0,34	0,07
SPI4	-0,15	0,07	0,11	0,32	0,08
SPI6	-0,20	0,01	0,05	0,23	0,03
SPI9	-0,23	-0,03	0,10	0,21	0,01
SPI12	-0,16	0,00	0,10	0,20	0,04

Preglednica 16: Korelacija med indeksom VCI in SPI za Postojno v obdobju od leta 2001 do 2017, z odstranitvijo trenda.

Postojna	listnati gozd	mešana raba	polja	travniki	iglasti gozd
SPI1	-0,11	-0,01	0,11	0,11	-0,05
SPI2	-0,10	0,02	0,14	0,12	-0,02
SPI3	-0,15	-0,02	0,10	0,13	0,00
SPI4	-0,17	-0,03	0,06	0,10	-0,02
SPI6	-0,12	-0,03	0,10	0,11	-0,05
SPI9	-0,07	-0,04	0,07	0,07	-0,02
SPI12	0,01	0,01	0,02	0,07	0,02

Preglednica 17: Korelacije med letnim povprečjem SPI in VCI v obdobju od leta 2001 do 2017.

	Lendava	Ljubljana Bežigrad	Novo mesto	Postojna
SPI1	0,68	0,34	0,54	0,01
SPI2	0,77	0,35	0,51	0,13
SPI3	0,79	0,31	0,51	0,11
SPI4	0,75	0,22	0,48	0,05
SPI6	0,69	0,03	0,27	-0,02
SPI9	0,65	-0,17	0,04	-0,06
SPI12	0,63	-0,23	-0,07	0,00

Preglednica 17 kaže korelacije med letnim povprečjem SPI in VCI indeksa glede na izbrane meteorološke postaje v obdobju od leta 2001 do 2017. Rezultati pokažejo, da je največja korelacija med SPI in VCI dosežena za Lendavo in Novo mesto. Povezava med SPI in VCI za Postojno je neznatna oz. je ni.

Če primerjamo rezultate z raziskavami iz preteklih raziskav, kjer so tudi primerjali povprečen VCI in SPI za posamezno leto, ugotovimo, da smo mi odkrili največjo povezavo med indeksoma SPI2 in VCI. Zambrano in sod. (2016) so ugotovili, da je največja korelacija med SPI3 in VCI v času modificirane rastne sezone. Sahoo in sod. (2015) so ugotovili, da je med indeksom SPI1 in VCI zelo šibka povezava, med VCI in SPI3, SPI6, SPI9 pa zmerna povezava.

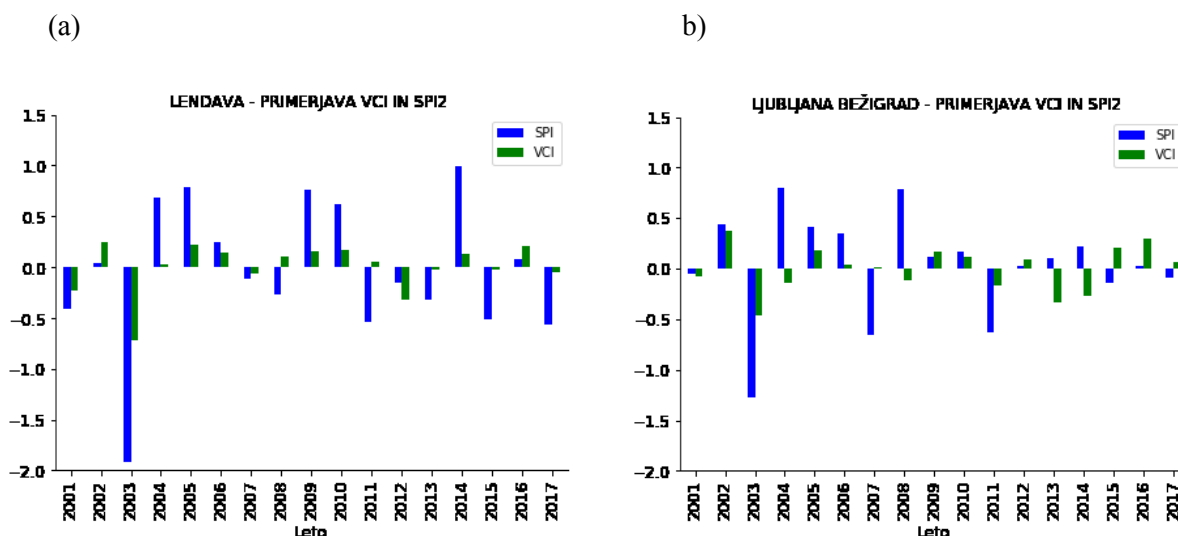
Gledano na letni ravni je največja korelacija dosežena med SPI2 in VCI. Primerjavo indeksov VCI in SPI2 smo ločeno prikazali po izbranih krajih. Najprej smo morali izračunati standardizirano VCI anomalijo, da smo lahko primerjali VCI in SPI, kot jih prikazuje grafikon 27.

Standardizirana anomalija se izračuna po enačbi (16) (Zambrano in sod., 2016):

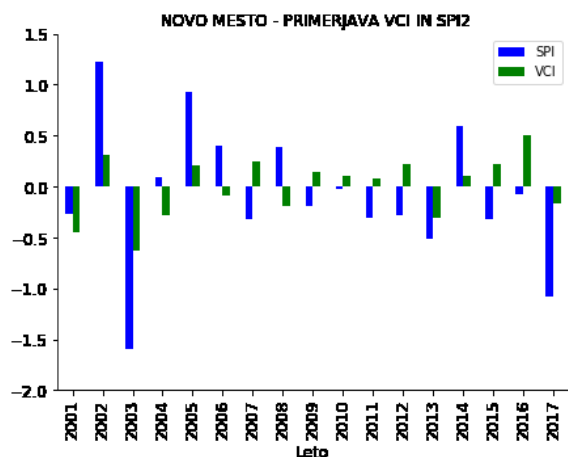
$$STD_{ijk} = \frac{X_{ijk} - \bar{X}_{ij}}{\sigma_{ij}} \quad (16),$$

kjer je:

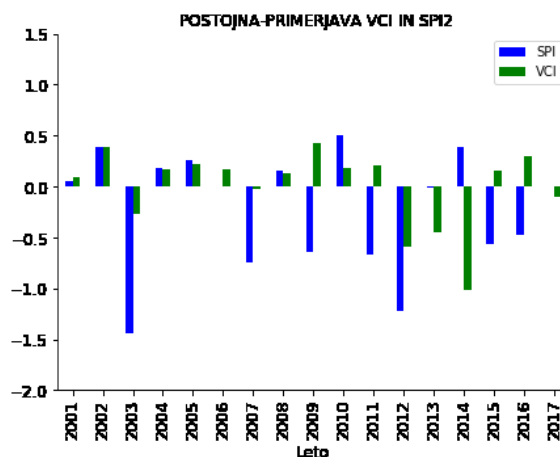
- X_{ijk} -VCI vrednost za piksel i, obdobje j in leto k,
- $\bar{X}_{ij}$ -srednja vrednost indeksa VCI za piksel i, obdobje j,
- σ_{ij} -standardna deviacija piksla i in obdobje j.



c)



č)



Grafikon 27: Primerjava povprečne vrednosti VCI in SPI2 po letih a) Lendava, b) Ljubljana Bežigrad, c) Novo mesto, č) Postojna.

Zaključimo lahko, da je suša naravna nesreča z zelo kompleksnim značajem. Suša je povezana s količino padavin, kar določa zdravje rastline, vendar tudi padavine ne vplivajo na vse ekosisteme enako. Na kmetijsko sušo vplivajo različni dejavniki, kot so tla, topografija, vrsta vegetacije, višina podtalnice, površinske vode, raven rezervoarjev ...

Posledično lahko rečemo, da k nizkim korelacijam prispevajo tudi drugi dogodki. V Postojni, ko je v letu 2014 padla dovoljšnja količina padavin, je bil indeks NDVI zelo nizek, kot posledica žledoloma. Podobni primeri so lahko preorane njive (nizek NDVI) in dovoljšna količina padavin (visok SPI), bolezen rastlin (nizek NDVI) in hkrati dovolj padavin (visok SPI), ožig rastline (nizek NDVI) in dovolj padavin. Podobna nasprotja nastanejo tudi v situaciji, če je NDVI indeks zajet, ko na travniku sušijo seno (nizek NDVI), a je še vedno v tem času padlo v določenem kraju in času dovolj padavin, ki prispevajo k visoki vrednosti indeksa SPI. Naravni nesreči, kot sta toča ali požar (rastlini znižata vrednost NDVI in s tem posledično VCI), tudi pripomoreta k nižji korelaciji med omenjenima indeksoma. Podoben primer je tudi pozeba. Nasproten primer je namakanje tal, ko je VCI indeks visok, SPI indeks pa negativen.

Vse to kaže na to, da sta spremenljivki VCI in SPI na območju Slovenije oz. za izbrane meteorološke postaje razmeroma neodvisni.

4.4 Korelacija med indeksom stanja vegetacije (VCI) in indeksom vlažnosti tal (SWI)

Primerjali smo še vrednosti med indeksom VCI in SWI (ang. Soil Water Index – v nadaljevanju SWI). Podatke indeksa SWI smo pridobili na Znanstvenoraziskovalnem centru Slovenske akademije znanosti in umetnosti (ZRC SAZU), in sicer za obdobje od leta 2007 do 2017.

SWI indeks je dnevni kompozit, z osnovno ločljivostjo rastrskega sloja 12,5 km.

Prav tako je bilo potrebno za indeks SWI najprej meritvam brez podatka, ki imajo vrednost 255 pripisati atribut ni podatka, nato te vrednosti interpolirati in nadalje zgladiti (uporabili smo filter za glajenje funkcij Savitzky–Golay). Izračunali smo korelacijo za obdobje 2007–2017 s Pearsonovim korelacijskim testom in z odstranitvijo trenda, kjer smo primerjali vrednosti VCI in SWI pridobljene na isti datum. Rezultati v preglednici 18, kažejo podobne korelacije (zelo nizke), kot smo jih pridobili med indeksoma SPI in VCI. Rezultati primerjave indeksa SWI in VCI so nekoliko pričakovani. Problem v primerjavi omenjenih indeksov je, da ne vemo ali je bil VCI indeks res zajet na isti dan, kot SWI. Kot smo že omenili, nimamo podatka na kateri dan v 16-dnevnem obdobju je bil VCI indeks dejansko zajet. Drugi problem je v tem, da je SWI indeks z osnovno prostorsko ločljivostjo rastrskega sloja 12,5 km, VCI pa 250 m.

Preglednica 18: Korelacije med VCI in SWI v obdobju od leta 2007 do 2017, izračunana s Pearsonovim koeficientom korelacije.

	listnati gozd	mešana raba	polja	travniki	vinogradi	iglasti gozd	nasadi
Lendava	–0,07	0,16	0,14	0,35	0,54	/	/
Ljubljana Bežigrad	–0,20	0,06	0,14	0,18	/	–0,08	/
Novo mesto	–0,10	0,08	0,23	0,18	0,34	0,04	0,12
Postojna	–0,21	–0,09	0,04	0,10	/	–0,11	/

Preglednica 19: Korelacije med VCI in SWI v obdobju od leta 2007 do 2017, z odstranitvijo trenda.

	listnati gozd	mešana raba	polja	travniki	vinogradi	iglasti gozd	nasadi
Lendava	–0,05	0,10	0,11	0,27	0,29	/	/
Ljubljana Bežigrad	–0,09	0,01	0,07	0,06	/	–0,04	/
Novo mesto	0,01	0,06	0,08	0,09	0,08	0,08	0,06
Postojna	0,05	0,04	0,05	0,06	/	0,05	/

5 IZDELAVA MODELA–STROJNO UČENJE

Strojno učenje (ang. machine learning) je veja raziskave umetne inteligence, ki je doživela velik napredek, kar se odraža v številnih komercialnih sistemih za strojno učenje in njihovi uporabi v industriji, medicini, ekonomiji ... Osnovni princip strojnega učenja je avtomatsko opisovanje oz. modeliranje pojavov iz podatkov. Naučeni modeli poizkušajo razlagati podatke, iz katerih so bili modeli zgrajeni. Modeli se nato uporabljajo za odločanje pri opazovanju modeliranega procesa v bodočnosti. Za strojno učenje potrebujemo množico podatkov in predznanje, rezultat pa je model (pravila, funkcije, relacije, sistemi enačb, verjetnostne porazdelitve ...), ki mora čim bolj ustrezati vhodnim podatkom in predznanju.

Metode strojnega učenja delimo (glede na uporabo naučenega znanja) na: klasifikacijo, regresijo, učenje asociacij in logičnih relacij, učenje sistemov (diferencialnih) enačbe in razvrščanje (Kononenko, 2005).

V magistrski nalogi smo uporabili strojno učenje za izdelavo klasifikatorjev. Klasifikator ima nalogo, da določi razred objektu, ki ga klasificiramo. To lahko stori na podlagi v naprej podane funkcije ali pa iz naučenih podatkov iz preteklosti. Atributi predstavljajo neodvisno (zvezno ali nezvezno) spremenljivko, na podlagi katere razvrščamo objekte v razrede (odvisna spremenljivka). Najbolj pogosti klasifikatorji so: odločitvena drevesa, odločitvena pravila, naivni Bayesov klasifikator, Bayesovske verjetnostne mreže, klasifikator z najbližjimi sosedi, linearna diskriminantna funkcija, logistična regresija, klasifikator po metodi podpornih vektorjev ter usmerjene umetne nevronske mreže (Kononenko, 2005).

Za izgradnjo modela smo dodatno uporabili še produkt MCD15A3 senzorja MODIS, ki je 4-dnevni kompozit indeksa listne površine (v nadaljevanju LAI, ang. Leaf Area Index) in indeksa frakcije aktivnega fotosintetskega sevanja (v nadaljevanju fAPAR, ang. Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation). Obdelava časovne serije MCD15A3 je potekala tako, da smo najprej meritvam, ki so imele vrednost $-2,0$ predpisali vrednost ni podatka. Manjkajoče vrednosti smo interpolirali in časovne serije zgladili s filtrom Savitzky–Golay za glajenje funkcij, da smo odstranili šum.

Atributi, ki smo jih vključili v model strojnega učenja so bili VCI, SPI1, SPI2, SPI3, SPI4, SPI6, SPI9, SPI12, SWI, EVI, NDVI, LAI, fAPAR in podatek o prisotnosti suše. Klasifikatorji, ki smo jih pri nalogi uporabili so bili klasifikacijsko drevo, naivni Bayesov klasifikator in metoda k-najbližjih sosedov.

Odločitveno drevo je sestavljeno iz notranjih vozlišč (atributi), vej (podmnožice atributov) in listov (razredi). Odločitveno drevo se zgradi na podlagi učnih primerov, na podlagi zgrajenega drevesa klasificiramo nove primere. Naivni Bayesov klasifikator predpostavlja pogojno neodvisnosti različnih

atributov pri danem razredu. Pri najpreprostejši obliki k-najbližjih sosedov shranimo vse nespremenjene učne primere. Ko želimo napovedati razred r_x novemu primeru u_x poiščemo med učnimi primeri k najbližjih $u_1, \dots, u_k$ in pri klasifikaciji napovemo razred, kateremu pripada največ izmen k najbližjih sosedov. Parameter k je ponavadi liho število, recimo 1, 7, 15 (Kononenko, 1997). Mi smo izdelali model, kjer ima k vrednost 7.

Za vsako točko imamo tudi podano (vsak peti dan), ali je bila suša prisotna, je ni bilo oz. ni bilo možno z gotovostjo ugotoviti ali je bila suša prisotna ali ne. Točke, pri katerih ni bilo mogoče ugotoviti prisotnosti suše, nismo vključili v izdelavo modela. Glede nato, da so časovne serije 16-dnevni kompozit, podatek o prisotnosti suše pa je podan na vsak peti dan, je bilo potrebno podatke urediti. Attribute smo podali na 16 dni. Ker za časovne serije nimamo točnega podatka na kateri dan v 16-dnevnem obdobju so bile zajete, smo za podatek o prisotnosti suše vzeli vmesni datum v tem obdobju. Vektorji so bili izdelani za attribute zajete od leta 2007 do 2016, ker imamo za to obdobje podatke o vseh naštetih indeksih, ki smo jih vključili v model.

Učni podatki predstavljajo 75 % vseh vektorjev na podlagi katerih, se ocenijo parametri modela. Testni podatki pa predstavljajo 25 % vseh vektorjev, na podlagi katerih smo ovrednotili rezultate. Modele smo izdelali za vsako rabo posebej. Listnati gozd in iglasti gozd smo združili v skupno kategorijo gozd, ker pri iglastem gozdu nismo imeli nobenega vektorja, ki odraža sušo.

Preglednica 20: Preglednica izdelanih modelov a) mešana raba, b) polja, c) travniki, č) vinogradi, d) gozd, e) nasadi.

Klasifikacijsko drevo

Naivni Bayes

k-najbližjih sosedov

a) mešana raba

		napoved		Σ
		ne	da	
opazovano	ne	2515	13	2528
	da	59	41	100
	Σ	2574	54	2628

		napoved		Σ
		ne	da	
opazovano	ne	2336	192	2528
	da	55	45	100
	Σ	2391	237	2628

		napoved		Σ
		ne	da	
opazovano	ne	2518	10	2528
	da	84	16	100
	Σ	2602	26	2628

b) polja

		napoved		Σ
		ne	da	
opazovano	ne	590	9	599
	da	28	21	49
	Σ	618	30	648

		napoved		Σ
		ne	da	
opazovano	ne	541	58	599
	da	23	26	49
	Σ	564	84	648

		napoved		Σ
		ne	da	
opazovano	ne	594	5	599
	da	38	11	49
	Σ	632	16	648

c) travniki

		napoved		
		ne	da	Σ
opazovano	ne	942	9	951
	da	15	60	75
	Σ	957	69	1026

		napoved		
		ne	da	Σ
opazovano	ne	833	118	951
	da	22	53	75
	Σ	855	171	1026

		napoved		
		ne	da	Σ
opazovano	ne	944	7	951
	da	56	19	75
	Σ	1000	26	1026

č) vinogradi

		napoved		
		ne	da	Σ
opazovano	ne	34	0	34
	da	2	0	2
	Σ	36	0	36

		napoved		
		ne	da	Σ
opazovano	ne	34	0	34
	da	2	0	2
	Σ	36	0	36

		napoved		
		ne	da	Σ
opazovano	ne	34	0	34
	da	2	0	2
	Σ	36	0	36

d) gozd

		napoved		
		ne	da	Σ
opazovano	ne	1932	5	1937
	da	4	3	7
	Σ	1936	8	1944

		napoved		
		ne	da	Σ
opazovano	ne	1902	35	1937
	da	2	5	7
	Σ	1904	40	1944

		napoved		
		ne	da	Σ
opazovano	ne	1933	4	1937
	da	7	0	7
	Σ	1940	4	1944

e) nasadi

		napoved		
		ne	da	Σ
opazovano	ne	49	2	51
	da	2	1	3
	Σ	51	3	54

		napoved		
		ne	da	Σ
opazovano	ne	49	2	51
	da	2	1	3
	Σ	51	3	54

		napoved		
		ne	da	Σ
opazovano	ne	51	0	51
	da	3	0	3
	Σ	54	0	54

Preglednica 21: Skupna natančnost modelov.

	Klasifikacijsko drevo	Naivni Bayes	k-najbližjih sosedov
mešana raba	97,3 %	90,6 %	96,4 %
polja	94,3 %	87,5 %	93,3 %
travniki	97,7 %	86,4 %	93,9 %
vinogradi	94,4 %	94,4 %	94,4 %
gozd	99,5 %	98,1 %	99,4 %
nasadi	92,6 %	92,6 %	94,4 %

Preglednica 22: Natančnost modelov ločeno za določanje suše in ne suše.

	Klasifikacijsko drevo		Naivni Bayes		k-najbližjih sosedov	
	ni suše	suša	ni suše	suša	ni suše	suša
mešana raba	99,5 %	41,0 %	92,4 %	45,0 %	99,6 %	16,0 %
polja	98,5 %	42,9 %	90,3 %	53,1 %	99,2 %	22,4 %
travniki	99,1 %	80,0 %	87,6 %	70,7 %	99,3 %	25,3 %
vinogradi	100,0 %	0,0 %	100,0 %	0,0 %	100,0 %	0,0 %
gozd	99,7 %	42,9 %	98,2 %	71,4 %	99,8 %	0,0 %
nasadi	96,1 %	33,3 %	96,1 %	33,3 %	100,0 %	0,0 %

Iz pridobljenih rezultatov iz preglednice 21, lahko sklepamo, da najboljšo natančnost za prepoznavanje sušnih in ne sušnih dogodkov, dosežemo s klasifikacijskim drevesom.

Ko pa pogledamo ločeno natančnosti modelov za določanje sušnih in ne sušnih dogodkov, opazimo, da se ne suši dogodki precej boljše klasificirajo od sušnih dogodkov. Menim, da je to posledica zelo majhnega števila vektorjev pri posamezni rabi, kateri razredi so odraz suše, v primerjavi z vektorji, kateri označujejo ne sušne dogodke. Najboljšo klasifikacijo za sušne dogodke dobimo s klasifikatorjem klasifikacijskega drevesa pri travnikih, in sicer v 80 % je model pravilno napovedal sušo.

6 ZAKLJUČEK

Suša je postala običajen pojav s katerim se srečujemo domala vsakoletno. Njene posledice so vidne v kmetijstvu (zmanjšana količina pridelka), prometu, turizmu, energetiki ... Huda suša omogoča tudi izbruhe številnih obsežnih požarov. Njenega pojava se običajno zavemo prepozno, da bi lahko pravočasno ukrepali.

Cilj magistrske naloge je bil preučiti uporabnost indeksov stanja vegetacije VCI, ki ga pridobimo na podlagi satelitskih posnetkov (določamo kmetijsko sušo), in standardiziranega padavinskega indeksa SPI, ki ga pridobimo na podlagi podatkov mesečnih količin padavin iz meteoroloških postaj (določamo meteorološko sušo), za spremljanje suše. Določanje sušnih indeksov na podlagi satelitskih posnetkov ima številne prednosti v primerjavi z indeksi pridobljenih s talnimi senzorji, recimo boljše časovno in prostorsko določitev stanja suše ... Uporaba le indeksa VCI ne zadostuje za natančno določanje suše, zato smo skušali ugotoviti njegovo uporabnost indeksa v kombinaciji z indeksom SPI.

Ugotovitve, do katerih smo prišli tekom magistrske naloge so, da med indeksoma SPI in VCI na slovenskem ozemlju nismo opazili značilnih povezav. S tem lahko potrdimo, da je suša res kompleksni pojav, ki je odvisen od več faktorjev (padavine, temperatura, sestav tal, višina podtalne vode ...). Lahko rečemo, da najvišje korelacije dosežemo med indeksom VCI in SPI, za krajša časovna obdobja, poudariti pa je potrebno, da sta indeksa razmeroma neodvisna pri vseh časovnih skalah. Potrdimo lahko hipotezo 1, da se vegetacija hitro odzove na primanjkljaj padavin, saj je največja korelacija med indeksom VCI in SPI dosežena za krajša časovna obdobja SPI1, SPI2 in SPI3, kot pa če primerjamo povezavo med indeksom SPI12 in VCI.

Različne kulture se na pomanjkanje padavin odzovejo v različnem času. Najmanjšo korelacijo med indeksoma VCI in SPI je opaziti pri listnatem gozdu, iglastem gozdu in mešani rabi. Najvišjo korelacijo med omenjenima indeksoma dosežemo pri travnikih in vinogradih.

Kogan (1995) je ugotovil, da je VCI indeks pridobljen na podlagi satelitskih posnetkov dobro identificira začetek, intenziteto, trajanje in prostorski obseg kmetijske suše. Tekom raziskave pa smo ugotovili, da na podlagi VCI indeksa težko kakovostno določimo sušo (primer žled).

Zaključimo lahko, da le z uporabo indeksov VCI in SPI ni mogoče kakovostno določiti ali se je na nekem izbranem območju pojavila suša ali ne.

Z uporabo strojnega učenja smo zgradili več modelov tako, da smo uporabili različne attribute. V osrednjem delu magistrske naloge smo prikazali rezultate modelov, ki podajo najboljše rezultate, glede na izbrane attribute. Z uporabo strojnega učenja, torej nismo uspeli zgraditi modela, ki bi uspešno določal sušne dogodke.

Na podlagi treh zgrajenih modelov za opazovanje suše, vidimo, da je najboljši model zgrajen na podlagi klasifikacijskega drevesa. Najnižjo natančnost za določanje ne sušnih dogodkov doseže pri nasadih (96,1 %), najvišjo pa pri vinogradih (100 %). Najnižjo natančnost za določanje sušnih dogodkov doseže pri vinogradih (0 %) in najvišjo natančnost pri travnikih (80 %). Vsi tri modeli dobro klasificirajo ne sušne dogodke (natančnost nad 87,6 %), sušni dogodki pa so precej slabo klasificirani. Boljše natančnosti izdelanih modelov bi najverjetneje dosegli, če bi v model vključili večje število vektorjev, ki bi predstavljali sušene oziroma ne sušne dogodke.

Zelo nizko korelacijo smo dosegli tudi med indeksom VCI in SWI. Prav tako je najnižjo korelacijo opaziti pri listnatem gozdu, iglastem gozdu in mešani rabi. Najvišjo pa pri travnikih in vinogradih.

Višjo povezanost bi morda dosegli, če bi za določanje suše na podlagi satelitskih posnetkov namesto indeksa SPI, uporabljali indeks SWI (zaznal bi namakanje tal), vendar z večjo prostorsko ločljivostjo, kot smo jo uporabili v nalogi. Korelacijo med SWI in VCI indeksom pa bi še vedno zniževali preostali vplivi, kot smo jih že omenili pri korelaciji indeksa VCI in SPI.

Določanje suše na podlagi satelitskih posnetkov je le splošen prikaz o stanju suše, ni pa povsem zanesljiv.

Poleg upoštevanja indeksa VCI in SWI za kakovostnejše določanje suše na podlagi satelitskih posnetkov, bi bilo potrebno v raziskave vključiti še druge baze podatkov, ki podajajo informacije o naravnih nesrečah, boleznih rastlin na določenem območju ...

VIRI

ARSO. 2018a. Standardizirani padavinski indeks (SPI).

http://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/indeks_spi/ (Pridobljeno 22. 1. 2018.)

ARSO. 2018b. Padavine.

<http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/maps/description/precipitation/> (Pridobljeno 27. 6. 2018.)

ARSO. 2018c. Opis opazovalnih postaj.

http://meteo.arso.gov.si/met/sl/climate/observation_stations/description/ (Pridobljeno 27. 6. 2018.)

Brenčič, M. 2017. Kaj je suša. V: 28. Mišičev vodarski dan: zbornik referatov, Maribor, 17. september, 2017. Maribor: Vodnogospodarski biro: str. 28, 34.

<http://mvd20.com/LETO2017/R4.pdf> (Pridobljeno 28. 5. 2018.)

Ceglar A., Kajfež-Bogataj, L. 2008. Obravnava meteorološke suše z različnimi indikatorji. Acta agriculturae Slovenica, 91, 2: str. 408, 409, 410, 411, 412, 413.

<http://aas.bf.uni-lj.si/september%202008/09ceglar1.pdf> (Pridobljeno 21. 2. 2018.)

Copernicus Global Land Service. 2018.

<https://land.copernicus.eu/global/products/vci> (Pridobljeno 21. 2. 2018.)

DataCamp. 2018.

<https://www.datacamp.com/community/tutorials/time-series-analysis-tutorial> (Pridobljeno 22. 6. 2018.)

European Environment Agency. 2018.

<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/main-drought-events-in-europe> (Pridobljeno 28. 5. 2018.)

Gregorič G., Ceglar A. 2007. Monitoring suše – regionalni aspekt. V: 18. Mišičev vodarski dan: zbornik referatov, Maribor, 10. december, 2007. Maribor: Vodnogospodarski biro: str. 124–127.

<http://mvd20.com/LETO2007/R18.pdf> (Pridobljeno 29. 5. 2018.)

Kobold M., Sušnik M. 2003. Hidrološka razmerja površinskih voda opazovanih slovenskih rek v letu 2003. V: 14. Mišičev vodarski dan: zbornik referatov, Maribor, 15. december, 2003. Maribor: Vodnogospodarski biro: str. 2.

http://www.arso.gov.si/o%20agenciji/knji%C5%BEnica/publikacije/Hidroloske_razmere.pdf

(Pridobljeno 16. 7. 2018.)

Kononenko I., 1997. Strojno učenje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko: 33 str.

Kononenko I., 2005. Strojno učenje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko: str. 1, 2, 3.

Hayes, M.J., Svoboda, M.D., Wilhite D.A., Vanyarkho, O.V.1999. Monitoring the 1996 Drought Using the Standardized Precipitation Index. Bulletin of the American Meteorological Society 80, 3: str. 430, 431.

Hozjan, K. 2015. Vpliv podnebnih sprememb na naravne nesreče na območju Slovenije. Magistrsko delo. Maribor, Univerza v Mariboru, Filozofska fakulteta, Oddelek za geografijo: str. 165.

<https://dk.um.si/Dokument.php?id=79246> (Pridobljeno 29. 5. 2018.)

Kogan F. N. 1995. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. Bulletin of the American Meteorological Society 76, 5: str. 655–666.

[https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1995\)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1995)076<0655:DOTLIT>2.0.CO;2) (Pridobljeno 29. 5. 2018.)

Kumar, M. N., Murthy, C.S., Sesha Sai, M. V. R., Roy P. S. 2009. On the use of Standardized Precipitation Index (SPI) for drought intensity assessment. Meteorological applications 16, 3: 381–389.

<https://doi.org/10.1002/met.136> (Pridobljeno 21. 1. 2018.)

LP DAAC. 2018.

https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis/modis_products_table/mod13q1_v006 (Pridobljeno 27. 6. 2018.)

Lokalno.si. 2009.

https://www.lokalno.si/2009/07/31/53663/aktualno/poldrugo_stoletje_novomeskega_vremena/

(Pridobljeno 27. 6. 2018.)

McKee T.B., Doesken N. J., Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. V: In Preprints 8th Conference on Applied Climatology, 17-12 January 1993, Anaheim, California: 179–184.

http://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf (Pridobljeno 10. 7. 2018.)

Ministrstvo za okolje in prostor. 2018.

http://www.mop.gov.si/si/delovna_podrocja/zmanjsevanje_posledic_naravnih_nesrec/zledolom_2014/ (Pridobljeno 10. 7. 2018.)

MODIS. 2018a.

<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/> (Pridobljeno 19. 6. 2018.)

MODIS. 2018b.

<https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php> (Pridobljeno 19. 6. 2018.)

NASA. 2018. Climate Time Machine.

<https://climatekids.nasa.gov/time-machine/> (Pridobljeno 30. 5. 2018.)

Nadbath, M. 2008. Meteorološka postaja Ljubljana Bežigrad.

<http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/stations/ljubljana-bezigrad.pdf> (Pridobljeno 14. 6. 2018.)

Nadbath, M. 2007. Meteorološka postaja Postojna.

<http://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/stations/postojna.pdf> (Pridobljeno 14. 6. 2018.)

National Drought Mitigation Center. 2018.

<http://drought.unl.edu/droughtmonitoring/SPI/SPIProgram.aspx> (Pridobljeno 21. 2. 2018.)

Oštir, K. Daljinsko zaznavanje. 2006. Ljubljana, Založba ZRC: str. 164, 165.

Sahoo, R. N., Dutta, D., Khanna, M., Kumar, N., Bandyopadhyay S. K. 2015. Drought assessment in the Dhar and Mewat Districts of India using meteorological, hydrological and remote-sensing derived indices. *Natural Hazards* 77, 2: 733–751.

DOI: 10.1007/s11069-015-1623-z

I. Sholihah, R., Trisasongko, B. H., Shiddiq, D., S. Iman, L., Kusdaryanto, S., Manijo, R. Panuju, D. 2016. Identification of agricultural drought extent based on vegetation health indices of Landsat data: case of Subang and Karawang, Indonesia. *Procedia Environmental Sciences* 33: 14–20.
doi: 10.1016/j.proenv.2016.03.051

Sušnik, A., Gregorič, G. 2017. Kmetijska suša v 21. stoletju v Vodnogospodarski biro: 40.Sloveniji. V: 28. Mišičev vodarski dan: zbornik regeratov, Maribor, 17. september, 2017. Maribor: str. 37, 38.
<http://mvd20.com/LETO2017/R5.pdf> (Pridobljeno 29. 5. 2018.)

Sušnik, A. 2014. Zasnove kazalcev spremljanja suše na kmetijskih površinah. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehnična fakulteta, Oddelek za agronomijo: str. 20, 28.
http://www.digitalna-knjiznica.bf.uni-lj.si/agronomija/dd_susnik_andreja.pdf (Pridobljeno 28. 5. 2018.)

Thom, H. C. S. 1966. Some Methods of Climatological Analysis. Geneva: Secretariat of the World Meteorological Organization. Technical Note No. 81: str. 20, 21, 22.

Turk G., 2012. Verjetnostni račun in statistika. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: str.190.

Zambrano, F., Lillo-Saavedra, M., Verbist, K., Lagos, O. 2016. Sixteen Years of Agricultural Drought Assessment of the BioBío Region in Chile Using a 250 m Resolution Vegetation Condition Index (VCI). *Remote Sensing* 8, 6: 530.
doi:10.3390/rs8060530

Wikimedia.2018.

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MODIS_sensor.png?uselang=sl (Pridobljeno 26. 6. 2018.)

» Ta stran je namenoma prazna«.