

Utjecaj ekstremnih uvjeta u atmosferi na vinovu lozu u sadašnjim i budućim klimatskim uvjetima

Omazić, Branimir

Doctoral thesis / Doktorski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:567797>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-08-07**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET

GEOFIZIČKI ODSJEK

Branimir Omazić

**UTJECAJ EKSTREMNIH UVJETA U
ATMOSFERI NA VINOVO LOZU U
SADAŠNJIM I BUDUĆIM KLIMATSKIM
UVJETIMA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2023.



Sveučilište u Zagrebu

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Branimir Omazić

**UTJECAJ EKSTREMNIH UVJETA U
ATMOSFERI NA VINOVO LOZU U
SADAŠNJIM I BUDUĆIM KLIMATSKIM
UVJETIMA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:

izv. prof. dr. sc. Maja Telišman Prtenjak

Zagreb, 2023.



University of Zagreb

FACULTY OF SCIENCE
DEPARTMENT OF GEOPHYSICS

Branimir Omazić

**THE IMPACT OF EXTREME ATMOSPHERIC
CONDITIONS ON VINES IN PRESENT AND
FUTURE CLIMATE**

DOCTORAL THESIS

Supervisor:

assoc. prof. Maja Telišman Prtenjak, Ph.D.

Zagreb, 2023.

Ova je doktorska disertacija izrađena na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Maje Telišman Prtenjak, u sklopu Sveučilišnog poslijediplomskog doktorskog studija fizike, smjer geofizika.

Zahvala:

Iskrene zahvale mojoj mentorici izv. prof. dr. sc. Maji Telišman Prtenjak na ukazanom povjerenju, strpljivosti, svim kritikama, savjetima, putovanjima na kojima smo prenosili znanje drugima, ali i stjecali nova saznanja koja su upotpunila ovu radnju. Hvala što ste u pretrpanom rasporedu uvijek našli koju minutu za poslušati moje problem i mišljenje, čak i kada se nije slagalo s Vašim.

Zahvalio bih se svim vinarijama koje su ustupile podatke i omogućile ovo istraživanje (Belje, Badel, Korlat, Agrolaguna, Kutjevo, Krauthaker, Blato), ali i svim onim vinarijama čiji podatci nisu ušli u ovaj rad. Zahvalio bih se i udruzi Plavac mali koja nam je pomogla da stupimo u kontakt s mnogim vinarijama. Veliko hvala i dr. sc. Marijanu Buboli s Instituta za turizam i poljoprivredu u Poreču koji je prikupljao podatke, ali i brojnim komentarima obogatio moje znanje i ovaj rad. Zahvalu upućujem i Sektoru za meteorološka motrenja i klimatološke podatke Državnog hidrometeorološkog zavoda koji su ustupili mjenja meteoroloških podataka, ali i dostupna opažanja fenoloških faza. U radnji su također korišteni podatci reanalize ERA5 i klimatskih simulacija iz inicijative EURO-CORDEX te velike zahvale idu i toj inicijativi. Zahvalio bih se i Nikolini Ban koja je dostavila simulacije COSMO modela.

Hvala svima koji su svojim radom pomogli u izradi ove radnje: Marku Kvakiću na svesrdnoj pomoći prilikom pokretanja i parametrizaciji modela STICS modela, Mislavu Aniću na zajedničkoj borbi s mrazom, Andreini Belušić koja me je uvela u klimatsko modeliranje i uvijek bila spremna podijeliti svoje veliko znanje, Ivanu i Željki Prši na pomoći pri učenju agronomskih pojmova i vrhunskim vinima s kojima su me obskrbljivali, Marini Anić, Luciji Blašković i Josipu Meštriću na svim popratnim analizama.

Zahvalio bih se Hrvatskoj zakladi za znanost na financiranju izrade doktorske radnje kroz projekt potpore mladim istraživačima, kao i svima uključenima u projekte SWALDRIC, CroViZone i VITCLIC u okviru kojih su objavljena istraživanja vezana za izradu doktorske radnje.

Hvala svim djelatnicima Geofizičkog odsjeka, posebice onima s kojima sam provodio najviše vremena: Sari Ivasić, Barbari Malečić, Luciji Blašković, Marijani Boras, Damjanu Jeliću i Patriku Jureši.

Posebno bih se zahvalio članovima povjerenstva za ocjenu doktorskog rada izv. prof. dr. sc. Željku Večenaju, prof. dr. sc. Branku Grisogonou i prof. dr. sc. Marku Karoglanu na uloženom trudu i vremenu u čitanje, konstruktivnim komentarima, sugestijama i raspravama koje su obogatile ovaj rad.

Kroz ovo istraživanje učio sam, rastao, ali se ponekad i mučio s brojevima i trendovima, sve u nadi da će moji rezultati u budućnosti pomoći barem jednom vinaru. Hvala Zrinki Katarini i Viktoru koji su znali da je igra rješenje kad bih se u svemu tome izgubio. Doktorirali smo zajedno!

...Ma nosio ja u glavi

i sve fakultete,

kad odrastem jako velik,

ja ću ostat' dijete.

(Enis Kišević - Velik kao dijete)

Zagreb, studeni 2023.

Branimir Omazić

Informacije o mentorici:

Maja Telišman Prtenjak je na PMF-u u Zagrebu diplomirala 1995., magistrirala 2001. i doktorirala 2006. godine na Sveučilištu u Zagrebu. Od 1996. godine radi pri Geofizičkom odsjeku PMF-u Sveučilišta u Zagrebu, trenutno u zvanju izvanredne profesorice i znanstvene savjetnice. Dobitnica je Nagrade za znanstvenu izvrsnost od strane MZOŠ-a 2009. te PMF-a za 2022. Usavršavala se u inozemstvu (Francuska (Meteo-France), Španjolska (UIB), Italija (ICTP), Srbija (Sveučilište Novi Sad) na nekoliko kraćih specijalizacija i sudjelovala je na više desetaka međunarodnih konferencija/radionica. Maja Telišman Prtenjak jest ili je bila članica triju uredničkih odbora časopisa (Geofizika, Meteorology and Atmospheric Physics i Hrvatski meteorološki časopis), a bila je članica desetak organizacijskih/znanstvenih odbora međunarodnih znanstvenih i znanstveno-stručnih skupova i radionica. Sudjelovala je u radu više znanstvenih i stručnih međunarodnih i domaćih projekata, kao suradnik (njih 11) i kao voditelj (njih 6). Do sada je koautorica na oko 45 znanstvenih radova i na oko 140 konferencijskih priopćenja u suradnji s domaćim i inozemnim suradnicima. Održala je 2 pozvana predavanja i 2 pozvana seminarara. Recenzirala je više međunarodnih i domaćih projekata i oko 60 radova za više renomiranih međunarodnih i domaćih časopisa. Do sada je bila mentor/komentor u 4 rada za Rektorovu nagradu, 27 diplomskih radova i 6 obranjenih doktorata te 1 doktorat u završnoj fazi. Fokus rada je na mezoskalnim meteorološkim fenomenima (s posebnim osvrtom na opasne vremenske prilike kao što su tuča, munje, jak vjetar, magla, mraz, šumski požari itd.) nad kompleksnom topografijom u sadašnjim i budućim klimatskim uvjetima koristeći i mjerenja te mezoskalne numeričke (prognostičke i klimatske) modele.

SAŽETAK

Brojna istraživanja ukazuju na promjene u temperaturi i oborini nad Sredozemljem kad promatramo prošle, ali i buduće klimatske uvjete pomoću klimatskih modela. Budući da te promjene značajno utječu i na biljni svijet, zapažaju se promjene u uzgoju vinove loze uzimajući u obzir kvalitetu uroda, ali i nastup fenofaza. Vinogradarstvo, u ekonomskom i tradicijskom smislu, predstavlja vrlo važnu poljoprivrednu granu u Hrvatskoj. Zbog toga je poželjno, ali i potrebno, proučiti učinak klimatskih promjena na uzgoj vinove loze u sadašnjim, ali i budućim klimatskim uvjetima.

Postoji više mogućnosti kako promatrati utjecaj klime na vinovu lozu, a najjednostavniji je pristup promatranjem različitih bioklimatskih indeksa. U tu svrhu promatrane su promjene pet bioklimatskih indeksa (srednje temperature u sezoni vegetacije, Winklerovog indeksa, Huglinovog indeksa, indeksa hladnih noći i indeksa suhoće) u razdoblju od 1961. do 2020. na meteorološkim postajama Državnog hidrometeorološkog zavoda. Rezultati ukazuju na vidljiv trend porasta temperature zraka, a posljedično i temperaturnih indeksa, posebno značajnog od kraja 1990-ih pa do danas. Osim toga, rezultati indeksa suhoće sugeriraju sve veći deficit dostupne vode u tlu, naročito na jugu Hrvatske. Ovi trendovi u temperaturi zraka utjecali su na trend sve ranijeg nastupa fenoloških faza (pupanja, cvatnje, šare i berbe) vinove loze. Budući da utjecaj meteoroloških parametara na fenološke faze nije jednostavno utvrditi i razlikuje se od sorte do sorte i od jedne do druge lokacije, razvijena su četiri statistička modela (dva temeljena na akumulaciji topline, dva na linearnoj regresiji) koja istražuju taj utjecaj. Osim toga, po prvi puta u Hrvatskoj testiran je biodinamički model STICS na četiri sorte vinove loze ('Graševina', 'Chardonnay', 'Merlot' i 'Plavac mali'). Rezultati testiranja ovih modela ukazuju na vrlo dobro slaganje modeliranih i opaženih datuma fenoloških faza za modele temeljene na akumulaciji topline, kao i za model STICS. Ova spoznaja omogućuje korištenje tih modela u kombinaciji s regionalnim klimatskim modelima kako bi se uvidjele promjene nastupa fenoloških faza i u budućoj klimi. Iz dobivenih rezultata vidljivo je da će se zbog porasta temperature datumi nastupa fenoloških faza u budućoj klimi pomaknuti još više prema početku godine. Ovo dovodi do dva moguća izazova u budućim klimatskim uvjetima: (i) pomicanje pupanja prema početku

ožujka na kontinentu će dodatno povećati rizik od kasnog proljetnog mraza jer se datumi posljednjeg proljetnog mraza neće toliko pomaknuti i (ii) pomicanje šare prema kraju srpnja i početku kolovoza označava da će se krucijalni period vegetacije vinove loze, od šare do berbe, u potpunosti odvijati u najtoplijem dijelu godine, a samim time očekuju se daljnje promjene u kemijskom sastavu grožđa i posljedično vina.

Ključne riječi: vinova loza, fenologija, bioklimatski indeksi, klimatske promjene, STICS model, mraz, klimatski modeli

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Many studies worldwide indicate that changes in temperature and precipitation significantly affect agriculture and food production (e.g., Fuhrer, 2003; Pandžić et al., 2022; Sviličić et al., 2016) and particularly affect the Mediterranean area (de Luis et al., 2014; Fernández-Montes and Rodrigo, 2012). As a result, food producers are increasingly faced with reduced harvests caused by numerous extreme meteorological conditions.

As an important agriculture sector in moderate latitudes, viticulture has been strongly influenced by changes in temperature and precipitation in recent years (Bock et al., 2013; Droulia and Charalampopoulos, 2022). There are numerous influences of different meteorological parameters on the cultivation of grapevines, composition of grapes, and the diseases that can affect vines. Bock et al., (2011) found that phenological stages were most influenced by average maximum temperatures of preceding months. Jones (2006) showed that the length of the growing season is directly related to the growing season mean temperature. The length of the growing season could also be linked to soil moisture, air temperature, and crop-management practices (Webb et al., 2012). Prolonged summer periods of extremely high temperatures can affect and slow down the physiological processes in the grapevine (Berry and Bjorkman, 2003).

The impact of climate change is greatly visible in the observed changes in the main phenological stages of grapevine: budburst, flowering, veraison, and harvest (e.g., Cortázar-Atauri et al., 2017; Urhausen et al., 2011). For example, many studies based on the measurements report earlier harvests (e.g., Koufos et al., 2014; Laget et al., 2008; Leeuwen & Darriet, 2016). Because temperature changes are more pronounced during the warm period of the year (Beniston et al., 2007), which is the vegetation period, a further shortening of the vegetation period is to be expected (Malheiro et al., 2010; Droulia and Charalampopoulos, 2021). This is also indicated by the numerous climate studies for different climate scenarios (e.g., Fraga

et al., 2014; Ramos and Jones, 2018). However, although recent studies showed a positive correlation between temperature and earlier onset of most phenological stages under warmer climates (e.g., Fila et al., 2014; Fraga et al., 2017), the impact of climate change on budburst is not fully evident in different locations. It is important to emphasize that earlier onset of budburst indicates a potentially higher risk of frost.

Although the analysis of the impact of climate change on phenological stages can be estimated using climate models coupled with crop models, it is also possible to do a similar analysis with statistical phenological models (e.g., Fraga et al., 2016; Grillakis et al., 2022; Reis et al., 2020). A crop model simulates the vegetation cycle of different types of crops, either annual and/or perennial, herbaceous and/or woody in the soil-plant-atmosphere environment based on the balance of water, carbon, and nitrogen (e.g., Brisson et al., 2003). The numerical approach provides information far into the future in a biodynamically acceptable way, however, the crop modeling could have certain limitations due to many parametrizations used (e.g., Lalić et al., 2018). Various temperature-driven statistical phenological models have been used in numerous studies for determining the onset of phenological stages. The most frequently used models are based on growing degree days (GDD), respectively calculating heat sum above a certain value which is necessary for a stage to start. Other ways to succeed in this is to use the crop model, such as the STICS (Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard) model. STICS has been developed since 1996 at INRA and has been widely used for grapevine phenology prediction.

Also, numerous studies point to a further increase in temperature, which will lead to the continuation of the shift of phenological phases towards the beginning of the year. A special danger lies in delaying the budding towards the beginning of the year because it allows greater damage from frost.

Therefore, the overall objectives of the study were as follows; The first aim was to investigate the existence of shifts in the onset of the observed phenological stages of the four varieties (two white varieties, 'Graševina' and 'Chardonnay', and two red varieties, 'Merlot' and 'Plavac mali') which are, in terms of production, among the most represented and important in Croatia. The second aim was to develop a statistical approach to predict the main phenological stages (budburst, flowering, veraison, and harvest) using temperature and precipitation, as well as to parametrized STICS model for Croatia, so that these models could be used for coupling with climate models or for predicting future shifts of phenological stages. Then, to carry out analyses of bioclimatic indices for the first time in the future climate over Croatia filling the gap in the information on viticultural zoning in this part of Europe.

Data and methods

Daily values of minimum, maximum, and mean (T_{min} , T_{max} , T_{mean} , °C) air temperature, as well as daily precipitation amount (P , mm), from 80 meteorological stations all over Croatia from 1961 to 2020 were available for this research. The Croatian Meteorological and Hydrological Service (DHMZ) provided observations and data control. Established metrics for the quantitative evaluation of the viticulture in the context of climate suitability are bioclimatic indices: average growing season temperature (GST, Jones 2006), Growing degree-days (GDD, or Winkler index, Winkler et al., 1974), Huglin Heliothermal index (HI, Huglin, 1978), Cool night index (CI, Tonietto, 1999), and Dryness index (DI; Riou et al., 1994; Tonietto and Carbonneau, 2004). Since grapevines are heat-demanding crops (to complete their phenological stages) the first four indices are based on temperatures in the atmosphere, while the fifth one combines several meteorological variables.

The start dates of four phenological stages (budburst, flowering, veraison, and harvest) in 12 locations from 12 wineries throughout Croatia were collected. Four varieties (white varieties 'Graševina' and 'Chardonnay' and red varieties 'Merlot' and 'Plavac mali'), which make up most of the production in Croatia (~ 70%), were chosen for this study. Two of these varieties ('Graševina' and 'Plavac mali') are considered autochthonous and more than 50% of the wine produced is of these varieties. The other two varieties ('Chardonnay' and 'Merlot') are not native to Croatia but are well accepted and cultivated inland and in coastal areas. As the phenological data were rare but therefore very valuable, the available length of the sequences was tried to be fully used. Four statistical models were used to determine the beginning of a particular phenological stage. The first two models are based on determining the GDD thresholds required for phenological stage to start. The first model uses a base temperature of 10 °C for calculating GDD, while the second one uses a base temperature of 5 °C. Models numbered 3 to 4 use multiple linear regression to predict the onset of phenological stage occurrence using dependent variables: mean values of the minimum, maximum, and mean daily temperature (Model 3) and mean values of the minimum, maximum, mean daily temperature, and total precipitation (Model 4). Each of these four models also has two subtypes A and B. The A subtype of the model indicates that each variety is viewed as a unity and location is not taken into account. In this way, model calibration is done on a half of the stations listed as calibration stations. In this way, in addition to examining the influence of meteorological parameters on the cultivation of grapevines, it is also possible to examine whether the thresholds and parameters calculated at one location for a particular variety can also be applied at other locations for the same variety. For the analysis of the existing climate characteristics as well as for future climate projections, the results of Regional Climate Models (RCMs) from the EURO-CORDEX database (e.g., Jacob et

al., 2014) at 0.11° grid spacing are used as well as output of ETHZ-CCLM-02 model at 0.02° grid. RCMs are forced by Global Climate Models (GCMs) with a moderate (RCP4.5) and a high-end (RCP8.5) greenhouse gas (GHG) scenarios. In order to determine future changes in bioclimatic indices spatial distribution of the indices in historical runs (1971-2000) is compared to two different 30-year periods (2041-2070 and 2070-2100). Also onset of phenological stages in this historical and future period is compared.

Also, 10 different methods for frost detection have been tested. Five of them have already been introduced in other studies but were not tested in the area of interest. The other five methods are proposed in this paper. The proposed methods are based on that the dew point temperature must be below 0 °C for frost to occur. If the air is saturated, its temperature is called the dew point temperature because any further temperature drop causes condensation and dew formation (Lalić et al., 2018) and we could assume that if this temperature is below 0 °C, ice crystal could be formed. The dew point temperature is calculated using the Clausius-Clapeyron equation, and the Tmin is measured each morning at 2-m height. Depending on the method, RH at 07 CET or RHmean were used to calculate Td since there are no measurements of relative humidity at the exact time when the air temperature reaches the minimum value. In this research, the minimum temperature threshold for methods 6-10 was not calculated separately, but the threshold was set in the range of 2 °C and 3 °C every half degree, respectively. This assumption is in agreement with the results of the study Zaninović and Gajić Čapka (1999) for Zagreb-Maksimir station for a 10-year period (1971-1980) in the cold part of the year (September – May). Their analysis showed that the minimum air temperatures at 5-cm height are lower 2-3 °C than the minimum temperatures at 2-m height during clear/calm, clear/windy and partly cloudy/calm situations. For more transparent results, methods were evaluated in three seasons: the whole year (January - December), spring (March-May), and autumn (September – November).

Results and concluding remarks

All calculated temperature bioclimatic indices (GDD, HI, GST and CI) show a decrease in values during the 1960s and 1970s and an increase from the 1980s onwards which is particularly pronounced since the early 1990s. During the 1960s and 1970s, there was a downward trend in temperature, visible on GDD and more pronounced in continental regions. The downward trend in temperature and agrometeorological indices in the last century was also noted in other works (e.g., Fioravanti et al., 2016; Ruml et al., 2022; Vršič et al., 2014). The year 1980 is typically referred to as a turning point where trends shift upward. The cooling trend was presumably due

to a widespread decrease in surface solar radiation (global dimming of solar radiation) between the 1950s and 1980s (Wild, 2009), which affected the global temperature change (Broecker, 1975). Broecker (1975) concluded that a temperature drop during the middle of the last century was caused by the natural climate cycle, which overcame temporarily the warming effect of contemporary increased CO₂ content in the atmosphere. He predicted that the warming effect of the atmosphere would exceed the cooling effect caused by natural climate variability owing to the further exponential increase in CO₂ concentrations towards the end of the 20th century. Concerning the GDD values in the Dalmatia region (Fig. 2d), it should be noted that 1994 was the first time that a station recorded a GDD value above 2700 °C units, which is classified as Too hot (Table 1). Over the next nine years, there was a situation where at least at one station, the GDD value exceeded that limit, and in 2018 at one station it exceeded 3000 °C units.

Such changes in regions have been recorded in numerous studies across Europe in recent years. Koufos et al. (2018) showed that the GDD trend for the baseline period (1981-2010) in Greece was from 28 to 140 °C units/10 years. In northeastern Spain (Ramos et al., 2008), a positive trend of GDD is visible, and research in Croatia shows that the growth of the indices will continue in the future

If we look at the general appearances of all phenological stages, we can state that they mostly appear at earlier dates in the season. Although the trends themselves are rarely significant (the reason can also be a relatively small number of years), it is clear that they are the most significant for harvesting and budburst. The most dominant trend for budburst was recorded in Erdut_V4 for 'Graševina' (-1.5 days/year which indicates -15 days/10 years), but the series has only 4 years of observations. In Kutjevo_V1 and Križevci_V6, the trend is also negative and slightly less than -1 day/year. The only station where the trend is not noticed is Daruvar_V2. For 'Chardonnay', these trends are similar or in some locations more marked. At the only maritime (coastal) station where data for 'Chardonnay' are available (Poreč_V7), the trend is most pronounced (-1.1 day/year). It should be emphasized that for 'Chardonnay', budburst generally occurs a few days earlier than for other varieties. Similar results were obtained for red varieties. For 'Merlot', one station (Poreč_V7) has a positive trend, and for the other station (Zadar_V9) trend is negative. For 'Plavac Mali', the time series is the longest, and at both coastal stations in Dalmatia, Hvar and Lastovo, the trend is negative but more pronounced at Hvar, which is the only significant one (- 0.39 days/year). The harvest of white cultivars showed mostly a negative trend, which means earlier harvests. In the case of white varieties, the trends are more pronounced for 'Graševina' than for 'Chardonnay'. The trends for 'Graševina' are mostly up to -1.4 days/year (or up to ~ -14 days/10 years). Positive trends are observed at the Poreč_V7 and Erdut_V4 stations. The reasons at the Erdut_V4 station could be due to the short

period of observation, and in Poreč_V7 due to the virus diseases that occurred in the vineyard in recent years, which delayed the ripening process of grapes.

Four statistical phenological models, described in Table 2, were used to predict the onset of phenological stages. Their analysis is shown in Table S2.6 and Figures 5 and 6 for each cultivar and main phenological stage. Overall, the GDD approach provides better results than multiple linear regression. STICS model also gave good results for white varieties, but for red varieties (especially 'Plavac mali') results were not so satisfactory. Overall, results showed possibility of using statistical models for future prediction of phenological stages.

The results show that a shift in phenological phases is expected in the future, regardless of the cultivar. The robustness of future changes depends on the localization analyzed and cultivar. An earlier start of budburst up to 20 days is expected by the end of the century. Moving budburst this early could increase the risk of frost in continental Croatia. Even more significant shifts are in the onset of harvest (especially if statistical models are observed). Postponing the harvest also means a reduction in the growing season, and a further reduction in the period from veraison to harvest is also visible. This could lead to an increase in temperature-dependent sugars, and that period would then come in an even warmer period.

An increased risk of frost is also expected in the future climate. The results of testing methods for frost detection indicate that the method that uses T_{min} of 3 °C and $T_d < 0$ °C for detection gives the best results. Using RCMs and this method, the expected reduction in the number of days with frost is obtained both on an annual level and in spring. However, the shift of the last spring day with frost towards the beginning is less than the shift of the budding date. It is expected that the last day with frost in continental Croatia will move 10 days towards the beginning of the year. Budding shifts are greater and this indicates possible challenges for winegrowers in the future.

POPIS KRATICA

β	Pristranost računata teorijom detekcije signala
CET	Srednjoeuropsko vrijeme (<i>eng. Central European Time</i>)
CI	Indeks hladnih noći (<i>eng. Cool night Index</i>)
d	Indeks točnosti
DHMZ	Državni hidrometeorološki zavod
DI	Indeks suhoće (<i>eng. Dryness Index</i>)
DOY	Redni broj dana u godini (<i>eng. Day Of Year</i>)
Es	Direktna evaporacija iz tla
ETP	Potencijalna evapotranspiracija
GCM	Globalni klimatski model (<i>eng. Global Climate Model</i>)
GDD	Suma efektivnih temperatura (<i>eng. Growing Degree-Day</i>)
GST	Srednja temperatura zraka u sezoni vegetacije (<i>eng. average Growing Season Temperature</i>)
HI	Huglinov indeks
IPCC	Međuvladin panel za klimatske promjene (<i>eng. The Intergovernmental Panel on Climate Change</i>)
IOA	Indeks slaganja (<i>eng. Index of Agreement</i>)
P	Dnevna količina oborine
POD	Vjerojatnost detekcije (<i>eng. Probability Of Detection</i>)
POFD	Vjerojatnost krive detekcije (<i>eng. Probability Of False Detection</i>)
RCM	Regionalni klimatski model (<i>eng. Regional Climate Model</i>)
RCP	Reprezentativne koncentracije stakleničkih plinova (<i>eng. Representative Concentration Pathways</i>)
RH7	Relativna vlažnost izmjerena u 7 CET
RHsr	Srednja dnevna relativna vlažnost

SDT	Teorija detekcije signala (<i>eng. Signal Detection Theory</i>)
STICS	<i>fra. Simulateur mulTIisciplinaire pour les Cultures Standard</i>
T5cm	Najniža dnevna temperatura zraka na 5 cm visine iznad tla
Td	Temperatura rosišta
Tmax	Najviša dnevna temperatura zraka na 2 m visine
Tmin	Najniža dnevna temperatura zraka na 2 m visine
Tsr	Srednja dnevna temperatura zraka na 2 m visine
Tv	Potencijalna transpiracija u vinogradima
v	Srednja dnevna brzina vjetra

Sadržaj

SAŽETAK.....	ii
EXTENDED ABSTRACT.....	iv
Introduction.....	iv
Data and methods.....	vi
Results and concluding remarks.....	vii
POPIS KRATICA.....	x
1 Uvod.....	1
1.1 Utjecaj meteoroloških parametara na uzgoj vinove loze.....	2
1.2 Načini određivanja nastupa fenofaza vinove loze.....	7
1.3 Ekstremni uvjeti u atmosferi i njihov utjecaj na vinovu lozu.....	8
1.4 Motivacija i ciljevi istraživanja.....	11
2 Podatci.....	13
2.1 Administrativna i klimatološka podjela Hrvatske.....	13
2.2 Meteorološka mjerenja i opažanja.....	14
2.3 Fenološki podatci.....	16
3 Metode.....	19
3.1 Bioklimatski indeksi.....	19
3.1.1 Srednja temperatura zraka u sezoni vegetacije.....	19
3.1.2 Suma efektivnih temperatura ili Winklerov indeks.....	21
3.1.3 Huglinov indeks.....	21
3.1.4 Indeks hladnih noći.....	22
3.1.5 Indeks suhoće.....	22
3.2 Modeli.....	23
3.2.1 Klimatski modeli.....	23
3.2.2 Statistički modeli za određivanje nastupa fenoloških faza.....	25
3.2.3 Model STICS (model razvoja biljaka).....	27

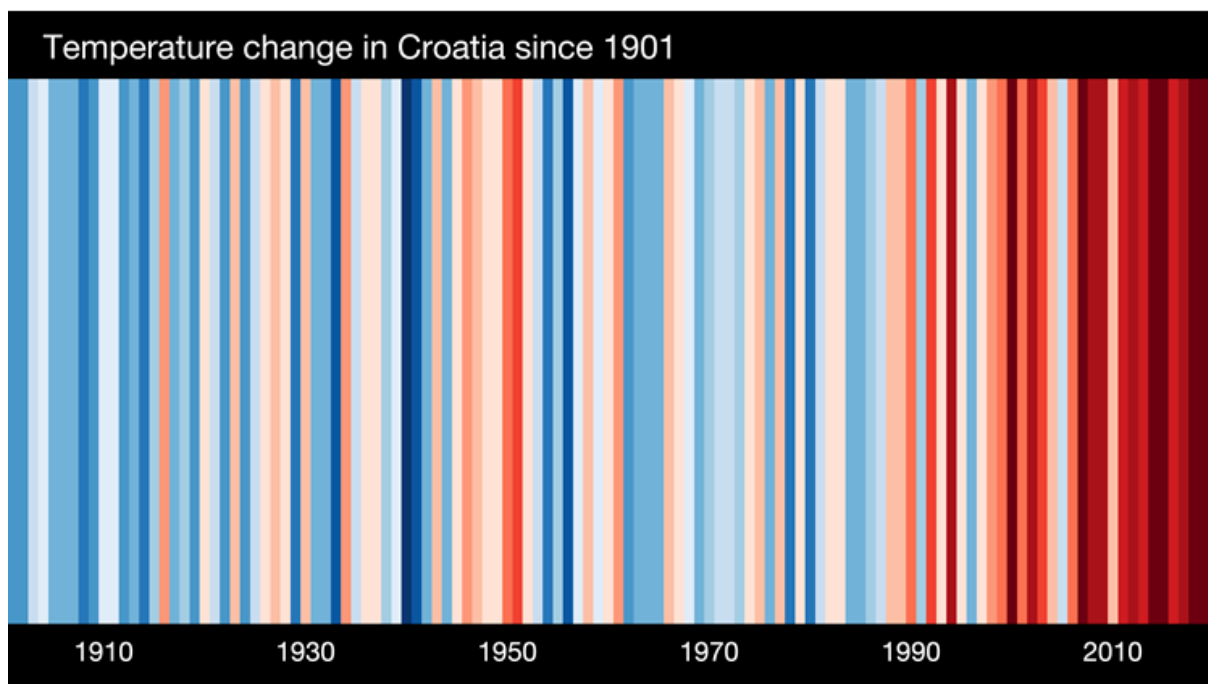
3.2.4 Metode za analizu pojave mraza.....	28
3.3 Statističke metode za ocjenu točnosti.....	30
3.3.1 Statističke veličine za procjenu točnosti nastupa fenoloških faza.....	30
3.3.2 Vjerojatnost nastupa i vjerojatnost krive detekcije.....	31
3.3.3 Teorija detekcije signala.....	31
3.3.4 Primjena Bayesove statistike.....	32
4 Rezultati.....	33
4.1 Analiza meteoroloških i fenoloških podataka u sadašnjim klimatskim uvjetima.....	33
4.1.1 Analiza bioklimatskih indeksa.....	33
4.1.2 Analiza meteoroloških parametara u vegetacijskoj sezoni.....	39
4.1.3 Analiza fenoloških faza.....	44
4.2 Testiranje modela za procjenu nastupa fenoloških faza.....	47
4.2.1 Statistički modeli.....	47
4.2.2 Model STICS.....	51
4.3 Analiza očekivanih promjena u budućim klimatskim uvjetima.....	53
4.3.1 Analiza bioklimatskih indeksa.....	53
4.3.2 Nastup fenoloških faza primjenom statističkih modela u budućim klimatskim uvjetima	63
4.3.3 Nastup fenoloških faza primjenom modela STICS u budućim klimatskim uvjetima.....	69
4.4 Nastup pojave mraza u sadašnjim i budućim klimatskim uvjetima.....	70
4.4.1 Rizik od nastupa mraza u sadašnjim klimatskim uvjetima.....	70
4.4.2 Validacija metoda za procjenu vjerojatnosti pojave mraza.....	73
4.4.3 Očekivane promjene u nastupu mraza u budućim klimatskim uvjetima.....	81
5 Zaključak.....	87
Literatura.....	91
Dodatak A.....	101
<i>Curriculum vitae</i>	107
Popis radova.....	111

Izvorni znanstveni i pregledni radovi u CC časopisima.....	111
Znanstveni radovi u drugim časopisima.....	111
Znanstveni radovi u zbornicima skupova.....	112
Sažetci u zbornicima skupova.....	112

1 Uvod

Vinova loza (lat. *Vitis vinifera*) jedna je od najzastupljenijih poljoprivrednih kultura u Europi i u Hrvatskoj. Iz Europe i zapadne Azije, odakle potječe, čovjek ju je prenio na sve kontinente, osim Antarktike. Vinova loza može se uzgojiti u različitim klimatskim uvjetima, a tome pogoduje njezina prilagodljivost i genetska varijabilnost. Iako je prilagodljiva, najviše joj odgovara raspon temperatura od 10 °C do 20 °C, stoga se najčešće uzgaja između 25° i 52° sjeverne (N) geografske širine te 30° i 45° južne (S) geografske širine. Međutim, u zadnjih nekoliko desetljeća zbog porasta globalne temperature dolazi do promjene u klimatskim obilježjima vinogradarskih regija.

Vinova loza osjetljiva je na porast temperature te na promjene u oborinskom režimu. Utjecaj klimatskih promjena na čitavu biosferu, ali i na vinogradarstvo i vinarstvo te proizvodnju hrane postaje sve značajniji (npr., Fuhrer, 2003.; Maracchi i sur., 2005.; Lalić i sur., 2018.; Pandžić i sur., 2022.; Sviličić i sur., 2016.). Utjecaj promjena u klimatskim obilježjima na vinovu lozu je raznolik i može se očitovati u promjenama nastupa fenoloških faza, pomicanju berbe te promjenama u kvaliteti vina uzrokovanim promjenama u kemijskom sastavu grožđa. I dok neka područja profitiraju od klimatskih promjena, pa imamo sve više vinograda na sjeveru i u centralnim (brdovitim) predjelima Europe (Drouliua i Charalampopolos, 2022.), neke tradicionalne vinske regije, posebice na jugu Europe, suočavaju se s poteškoćama. Klimatske promjene koje sa sobom nose daljnje povećanje temperature, mogle bi donijeti i dodatne promjene u uzgoju vinove loze. Klimatske projekcije pokazuju da bi središnja Europa od toga mogla imati i koristi jer bi se kvaliteta vina povećala i otvorila bi se mogućnost za kultiviranje u još nekim područjima i regijama (Malherio i sur., 2010.). Veći dio južne Europe čeka dodatna prilagodba na sve više temperature i sušne uvjete te će se u tim područjima uzgoj vinove loze vjerojatno morati nastaviti na nadmorskim visinama višim od sadašnjih. Slična situacija može se već sada primijetiti i u Hrvatskoj. Zbog porasta temperature (Slika 1.1) uzgoj vinove loze postaje moguć u nekim visinskim područjima, što je prije samo 20 ili 30 godina bilo nezamislivo, poput nižih dijelova Like i Gorskog kotara (Karoglan i sur., 2018.; Prša i sur., 2022.).



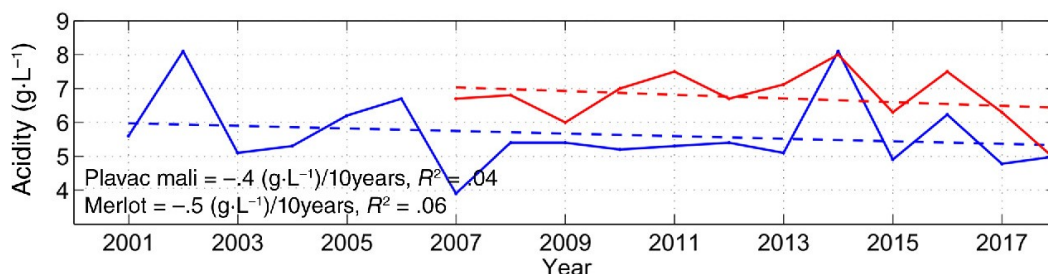
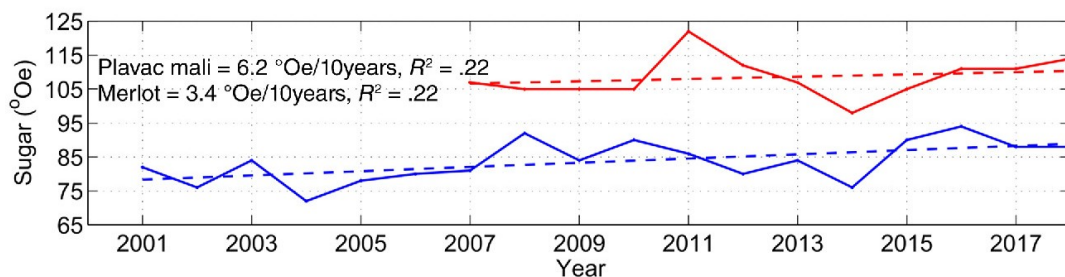
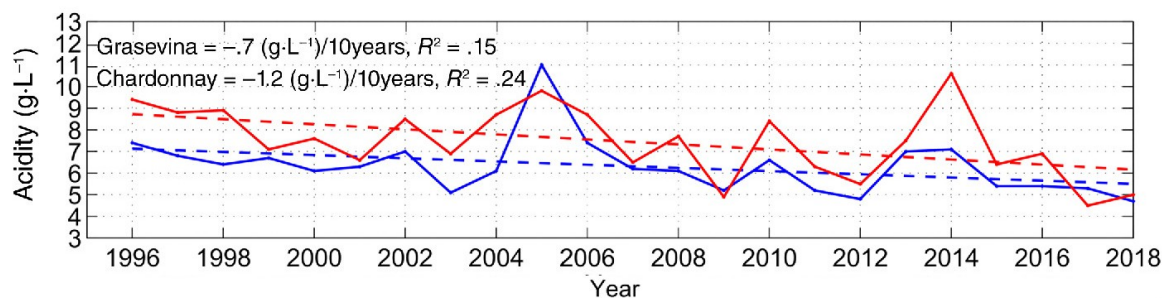
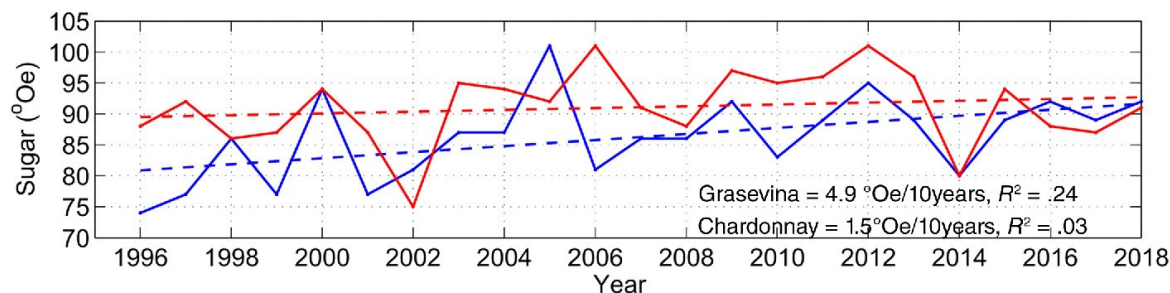
Slika 1.1 Odstupanje prosječne temperature u Hrvatskoj u razdoblju 1901.-2020. Svaka pruga predstavlja srednju temperaturu za pojedinu godinu. Crvene linije označavaju godine s pozitivnim odstupanjem od prosjeka (temperatura viša od prosjeka), a plave linije s negativnim odstupanjem od prosjeka (temperatura niža od prosjeka). Tamnije nijanse predstavljaju veća odstupanja od prosjeka. (Izvor: <https://mingor.gov.hr/vijesti/obiljezavanje-dana-pruga-zagrijavanja-s-ciljem-podizanja-svijesti-o-ozbiljnosti-klimatskih-promjena/8266>.)

Vinogradarstvo, kao važna gospodarska grana, omogućuje zapošljavanje većeg broja ljudi te postizanje većih prinosa po jedinici površine u odnosu na dobar dio poljoprivrednih kultura u Hrvatskoj. Osim toga, vinogradarska i vinarska proizvodnja od velikog su značaja za poljoprivredu, turizam, ali i razvoj ruralnih područja u Hrvatskoj te je uzgoj vinove loze tradicionalno ukorijenjen u mnoge hrvatske krajeve (npr. Prša, 2022.). Zbog svega toga, kao i zbog posebne osjetljivosti država u Sredozemlju na klimatske promjene (IPCC, 2022.), kontinuirano praćenje i proučavanje utjecaja klimatskih promjena na uzgoj vinove loze iznimno je važan za Hrvatsku. Jedan od doprinosa sveukupnom poznavanju utjecaja bit će prikazan kroz ovu disertaciju.

1.1 Utjecaj meteoroloških parametara na uzgoj vinove loze

Uzgoj vinove loze uvelike ovisi o meteorološkim parametrima i klimatskim uvjetima područja na kojem se uzgaja, a ta ovisnost nije linearna ni jednostavna. Istraživanja su pokazala da temperatura i oborina na različite načine mogu utjecati na vinovu lozu, kvalitetu njezinog uroda,

bolesti i fenološke faze. Radi što jednostavnijeg proučavanja utjecaja klime na uzgoj vinove loze, razvijeni su različiti bioklimatski indeksi koji opisuju prikladnost pojedine regije za proizvodnju vina i često se koriste kao alat za zoniranje. Višegodišnja varijabilnost i dugogodišnji trendovi meteoroloških elemenata (poput temperature i oborine) također se odražavaju i u bioklimatskim indeksima pa se varijabilnost klime može dobro očitati u njima (Santos i sur., 2012.). Neki od indeksa koji se često koriste su srednja temperatura u vegetacijskoj sezoni (GST; Jones, 2006.), Winklerov indeks ili suma efektivnih temperatura (GDD; Winkler i sur., 1974.), Huglinov indeks (HI; Huglin, 1978.), indeks hladnih noći (CI; Tonietto, 1999.) te indeks suhoće (DI; Riou i sur., 1994.). Analiza vrijednosti navedenih indeksa pokazuje značajan porast temperature u vegetacijskom razdoblju u brojnim regijama u Europi (Santos i sur., 2012.), a predviđene promjene njihovih vrijednosti u budućnosti ukazuju na moguća pomicanja regija pogodnih za uzgoj vinove loze sjevernije na kontinent ili na više nadmorske visine (Malherio i sur., 2010.). Također, analiza indeksa suhoće ukazuje na sve veću potrebu za navodnjavanjem u južnim dijelovima Europe. Meteorološki parametri utječu i na samu kvalitetu uroda pa su tako Bock i sur. (2013.) pokazali za Njemačku, koristeći višestruku linearnu regresiju, da se porast šećera u moštu od približno 38 % i porast u prinosima od 15 % može povezati s porastom temperature zraka. Osim toga, oborina u lipnju može imati značajan negativan utjecaj na koncentraciju šećera u moštu (Jones i Davis, 2000.; Bock i sur., 2013.). Uslijed klimatskih promjena vidljivo je i smanjenje koncentracije kiselina (Vršič i sur., 2014.). Promjene u kemijskom sastavu grožđa i koncentracijama šećera i kiselina u moštu vidljive su i u Hrvatskoj. Omazić i sur. (2020.) pokazali su da je na odabranim lokacijama zbog povećanja GDD došlo i do povećanja koncentracija šećera u moštu i smanjenja kiselina za sve četiri promatrane sorte: 'Graševina', 'Chardonnay', 'Merlot' i 'Plavac mali' (Slika 1.2). Uza sve to, kombinacija visokih proljetnih temperatura i relativne vlažnosti može dovesti do razvoja bolesti poput pepelnice (Carbonneau, 2003.).



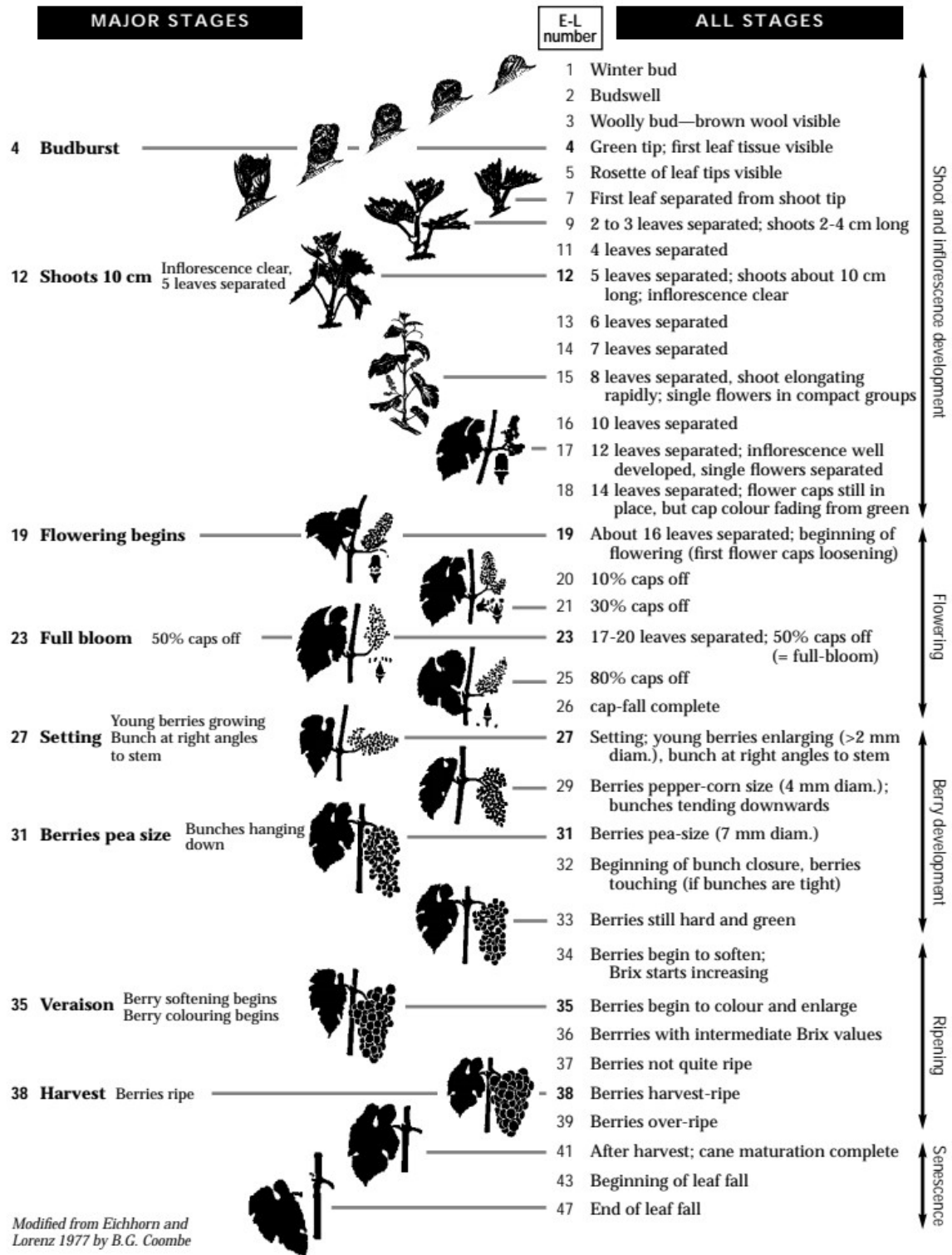
Slika 1.2 Trendovi šećera i kiselina u moštu za sorte 'Graševina' i 'Chardonnay' u Kutjevu (gornje dvije slike) i za 'Plavac mali' u Blatu na Korčulu i 'Merlot' u Korlatu (donje dvije slike). (Izvor: Omazić i sur., 2020.).

Ipak, meteorološki parametri imaju najznačajniji utjecaj na fenološki ciklus vinove loze. Tijekom jedne godine vinove loza prolazi kroz nekoliko faza rasta i razvoja, a te faze nazivamo fenofazama. Godišnji ciklus vinove loze ima sedam faza (npr., Preiner, 2013.), od kojih su četiri od posebnog značaja: pupanje (*eng. budburst*), cvatnja (*eng. flowering*), šara (*eng. veraison*) i berba (*eng. harvest*). Fenološki ciklus vinove loze opisan je na Slici 1.3. Za vrijeme pupanja dolazi do otvaranja zimskih pupova i mladice počinju intenzivno rasti. Ova faza traje 40-60 dana i završava s počekom cvatnje. Za vrijeme cvatnje dolazi do otvaranja cvjetova i oplodnje ili samooplodnje. Ova faza traje kraće (od 10 do 20 dana). U ovom razdoblju kiša nije poželjna, a optimalna temperatura je između 20 °C i 30 °C. Kod šare dolazi do promjena u bobicama, od

promjene boje kožice, mekšanja kožice i prozirnosti. Također, događaju se značajne promjene u kemijskom sastavu bobica grožđa jer koncentracija ukupnih kiselina opada, a koncentracija šećera raste. Kad grožđe dosegne tehnološku zrelost i optimalni, odnosno željeni, odnos šećera i kiselosti vinogradari kreću s berbom.

Dostupna opažanja fenoloških faza u Europi pokazuju da je došlo do značajnog pomicanja tih faza prema početku kalendarske godine. Najznačajnija pomicanja vidljiva su u datumima berbe. U Francuskoj je ranija berba zabilježena na različitim sortama i područjima (npr., Laget i sur., 2008.; Van Leeuwen i Darriet, 2016.). Slična situacija pokazala se i u Grčkoj gdje su se datumi berbe pomaknuli 8 do 18 dana ranije u zadnjih 20-40 godina (Koufos i sur., 2014.). No, osim berbe, i druge fenološke faze bilježe sve ranije nastupe. Tomasi i sur. (2011.) izračunali su za Italiju postojanje trenda i do 19 dana u ranijem nastupu cvatnje, šare i berbe. Osim toga, raniji nastupi tih faza zabilježeni su i u Francuskoj za razdoblje 1951.-2018. (Van Leeuwen i sur., 2019.), ali i u susjednoj Srbiji za razdoblje 1986.-2011. (Ruml i sur., 2016.). Rezultati za vinorodne regije u drugim dijelovima južne Europe, preciznije u Portugalu, (Fraga i sur., 2017.) sugeriraju raniji početak fenofaze pupanja i cvatnje za 2 do 5 dana. Ove promjene u fenološkim fazama velikim dijelom uzrokovane su promjenama u temperaturi i oborinskom režimu, osobito izraženom u drugoj polovici 20 stoljeća. Bock i sur. (2011.) uočili su da su nastupi fenoloških faza vinove loze pod posebnim utjecajem najviših dnevnih temperatura koje se događaju neposredno prije njihovih nastupa. Jones (2006.) je pokazao da se duljina vegetacijske sezone može povezati sa srednjom temperaturom u istom razdoblju. Duljina vegetacijske sezone povezana je i s vlažnošću tla, temperaturom zraka, ali i samim zahvatima na vinovoj lozi (Webb i sur., 2012.). Ako uzmemo u obzir projicirani nastavak porasta temperature u Europi u budućnosti (IPCC, 2022.) iz klimatskih modela, kao i to da je porast temperature izraženiji u toplom dijelu godine (Beniston i sur., 2007.), koji je ujedno i vegetacijski, za očekivati je daljnje skraćivanje vegetacijske sezone (Malheiro i sur., 2010.; Droulia i Charalampopoulos, 2021.).

Grapevine growth stages – The modified E-L system



Slika 1.3 Fenološki ciklus vinove loze (Izvor: Coombe, 1995.). Glavne fenološke faze vinove loze navedene su pod brojevima: 4 – pupanje, 19 – cvatnja, 35 – šara i 38 – berba.

1.2 Načini određivanja nastupa fenofaza vinove loze

Zbog utjecaja temperature zraka na fenološke faze vinove loze u današnjim pristupima praćenja fenologije ulažu se veliki naponi u što točniju prognozu fenoloških faza u sadašnjim klimatskim uvjetima. Dobivene informacije mogu znatno pomoći kod određivanja što točnijeg nastupa fenoloških faza u budućnosti. Sama prognoza fenoloških faza može se raditi na nekoliko načina. Često se takvi događaji prognoziraju modelima razvoja biljaka (*eng. crop models*). Ovakav tip modela simulira fenološki ciklus različitih poljoprivrednih kultura koristeći dostupne meteorološke, agronomske i pedološke podatke te simulirajući vodnu bilancu i kružni ciklus različitih plinova (npr. CO₂, P, N). Trenutno je u uporabi određeni broj takvih modela razvijenih za određena područja i kulture, a jedan primjer takvog tipa modela predstavlja model STICS (*franc. Simulateur mulTidisciplinaire pour les Cultures Standard*; Brisson i sur., 2003.). Iako su ti modeli korisni, ovakva vrsta modeliranja ima i svoja ograničenja. (i) Modeli razvoja biljaka koriste parametrizacije za procese koje ne mogu direktno opisati. (ii) Mjerenja često nisu dostupna, poput pedoloških mjerenja ili nedostatka informacija o sortama koje se opisuju (Lalić i sur., 2018.). (iii) Kao ulazni podaci koriste se rezultati klimatskih modela za opis klimatskih okruženja, a treba uzeti u obzir i prijenos pogrešaka modela zbog grube razlučivosti na mreži točaka (tj. mrežnom volumenu) gdje se vrši simulacija. Izvori pogrešaka proizlaze također i iz prenošenja pogrešaka globalnih modela putem rubnih uvjeta koji se koriste u regionalnim klimatskim modelima velike razlučivosti (Menendez i sur., 2014.; Ban i sur., 2014., 2015; Belušić i sur., 2018.; Belušić Vozila i sur., 2019.). Zbog svega navedenog često se koristi skup projekcija budućih klimatskih uvjeta odnosno medijan/srednjak ansambla skupa različitih regionalnih klimatskih modela korištenjem rubnih uvjeta više globalnih modela. Korištenjem ansambla, odnosno medijana skupa ansambla, daje se uvid u raspon očekivanja budućih klimatskih stanja.

Zbog određenih ograničenja primjene dinamičkih modela postoji i drugi način na koji se može dobiti prognoza fenoloških faza. Bazira se na primjeni različitih statističkih pristupa. Statistički modeli koriste samo meteorološke parametre te ih na statistički način povezuju s počecima nastupa fenoloških faza. Različiti fenološki statistički modeli bazirani na temperaturi više su ili manje uspješno korišteni za prognozu fenoloških faza u brojnim istraživanjima. Najčešće tako korišteni statistički model je model koji koristi temperaturne sume (*tzv. modeli GDD¹*). Statistički modeli pretpostavljaju da određena fenološka faza počinje kada se u vinovoj lozi skupi dovoljna toplina vidljiva kroz temperaturnu sumu (iznad određenog praga). Ovakav model, koji je računao temperaturne sume iznad osnovne temperature od 5 °C, pokazao se kao izrazito uspješan za prognozu pupanja u Francuskoj (de Cortázar-Atauri i sur., 2009.). Navedeni

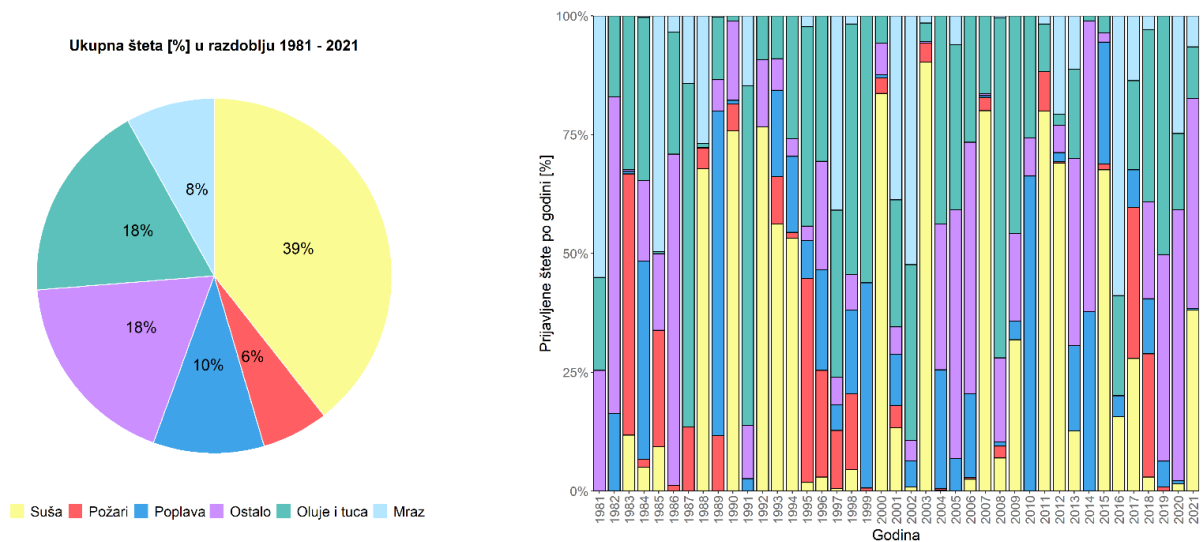
¹ Suma efektivnih temperatura ili Winklerov indeks (*eng. Growing degree-day, GDD*; Winkler, 1974)

pristup pokazao se dobrim u prognoziranju fenoloških faza i u SAD-u (Zapata i sur., 2017.), gdje je taj model prognozirao fenološke faze 17 sorti vinove loze u razdoblju od 1990. do 2013. Ujedno je ukazao i na važnost odabira dobre osnovne temperature za svaku fazu i varijantu zasebno. Model temeljen na vrijednostima GDD-a korišten je i za prognozu nastupa fenoloških faza stolnog grožđa u Grčkoj (Grillakis i sur., 2022.) te u Portugalu (Fraga i sur., 2016.). Sve ovo ukazuje na mogućnost da se već i sa statističkim modelima može prilično točno prognozirati nastup fenoloških faza te da mogu dati procjenu promjena fenoloških faza i u budućim klimatskim uvjetima.

1.3 Ekstremni uvjeti u atmosferi i njihov utjecaj na vinovu lozu

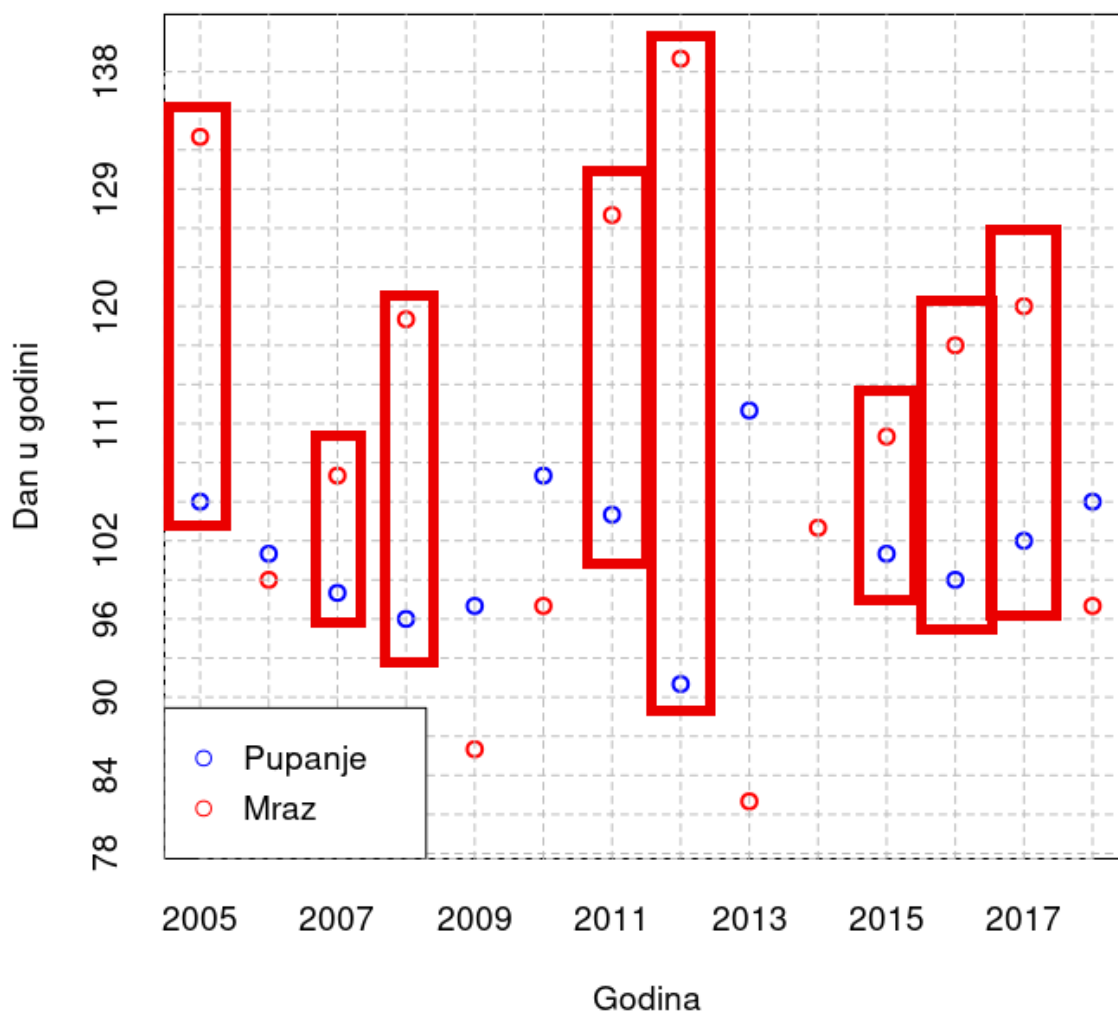
Kao što je ranije prikazano u tekstu, brojna istraživanja potvrđuju da meteorološki uvjeti definiraju područja pogodna za uzgoj vinove loze, pokretač su fenološkog ciklusa, a i njezin urod i kvaliteta uvelike ovise o istima. Osim toga, i meteorološki ekstremi izrazito su bitni za sam uzgoj vinove loze; tu se posebice misli na sušu i mraz. Dugotrajna razdoblja visokih ljetnih temperatura mogu usporiti ili u potpunosti zaustaviti fenološke procese u vinovoj lozi (Berry i Bjorkman, 2003.). Osim toga, ako su takva razdoblja praćena nedostatkom oborine događa se vodni stres kod vinove loze (Koundouras i sur., 1999.), a to vodi do smanjene produktivnosti i uroda (Moutinho-Pereira i sur., 2004.). Suša također ima utjecaj i na veličinu bobica (Ojeda i sur., 2002.) i rodnost pupa (Guilpart i sur., 2014.). U Hrvatskoj su sušna razdoblja analizirana u više studija (npr., Cindrić i sur., 2010., 2016.; Marinović i sur., 2021.) te ukazuju na povećani trend nastupa suše, osobito u ljetnim mjesecima na području Jadrana, izraženije u Dalmaciji. Osim toga, klimatske projekcije ukazuju na očekivani nastavak ovakvog trenda u Hrvatskoj (Marinović i sur., 2021.), naročito izraženog u ljetnim mjesecima, neovisno o regiji.

Za razliku od suše, analiza utjecaja mraza u poljoprivredi u Hrvatskoj, pa tako i na uzgoj vinove loze, vrlo je skromna. Prema podacima Ministarstva financija u razdoblju od 1981. do 2021., oko 8 % ukupnih ekonomskih gubitaka otpada na štete od mraza, a postoje godine poput 2016. kada je više od 50 % ekonomskih gubitaka bilo prouzrokovano mrazom (Slika 1.4).



Slika 1.4 Ukupna ekonomska šteta za razdoblje 1981. – 2021. (lijevo) i štete po godinama za razdoblje 1981. – 2021. prema podacima Ministarstva financija, uzrokovanih meteorološkim nepogodama.

Proletni mraz može značajno smanjiti urod vinove loze (Spellman, 1999.). Zbog sve ranijeg pupanja, povećava se vjerojatnost štete od mraza jer su niske temperature krajem ožujka i u travnju na kopnu dosta česte. Jedan od primjera je analiza podataka u Daruvaru, od 2005. do 2018., kad je posljednji proljetni dan s mrazom nastupio osam puta nakon što je krenulo pupanje vinove loze (Slika 1.5). Crvenim pravokutnikom na slici označene su godine u kojima je mraz nastupio nakon početka pupanja. Zbog povećane stope pojave mraza, učinak tih pojava trebao bi predstavljati važan čimbenik u odabiru sorti vinove loze (Leolini i sur., 2018.). To potvrđuje potrebu za poznavanjem meteoroloških uvjeta koji omogućuju nastanak mraza u sadašnjoj, ali i u budućoj klimi.



Slika 1.5 Početak pupanja i zadnji dan s mrazom u Daruvaru (preuzeto iz elaborata CroViZone projekta, KK.05.1.1.02.0032; <https://www.pmf.unizg.hr/images/50024384/Prilagodba-vinogradarskog-sektora-u-Hrvatskoj-klimatskim-promjenama.pdf>). Crvenim pravokutnicima označene su godine u kojima je posljednji proljetni mraz nastupio nakon početka pupanja vinove loze.

Mraz možemo klasificirati kao adveksijski ili radijacijski, a definira se kao pojava koja postoji kada temperatura zraka pri tlu padne ispod 0 °C (npr. Kalma i sur., 1992.). Meteorološki uvjeti pogodni za nastanak radijacijskog mraza su vedro nebo i suha atmosfera koja omogućuje dugovalnu radijaciju i ohlađivanje tla. Adveksijski mraz nastaje kao rezultat intruzije hladnog zraka (tzv. crni mraz). Analiza atmosferskih parametara u kombinaciji s mikrometeorološkim opažanjima može dati potpunu sliku za nastanak mraza (Rossi i sur., 2002.). Ipak, najveći problem je što su mikrometeorološka mjerenja skupa i rijetka, a najčešće imamo samo podatak o temperaturi izmjerenoj na 2 m visine u meteorološkoj kućici (Tmin).

Minimalna temperatura zraka opažena u meteorološkoj kućici može se značajno razlikovati od one u voćnjacima ili vinogradima (Firanj Sremac i sur., 2021.). Upravo je to razlog zbog kojeg različita istraživanja pokušavaju odrediti nastanak mraza koristeći različite metode i samo osnovne meteorološke parametre dostupne na svim meteorološkim postajama. Najčešće korištena metoda za opisivanje mraza je kada se temperatura na 2 m visine spusti ispod 0 °C (npr., Cuxart i Guijarro, 2010.; Molitor i sur., 2014.; Charalampopoulos i Droulia, 2022.). Neke druge studije koriste drukčije pragove za minimalnu temperaturu, ali se svode na slične pretpostavke. Tako, na primjer, Schwartz i sur. (2006.) koriste prag od -2,2 °C, Scheifinger i sur. (2003.) upotrebljavaju korak od 0,5 °C za temperature od 0 °C do -4 °C, dok Sgubin i sur. (2018.) koriste dva uvjeta za nastanak mraza; ako je $T_{min} < -2$ °C te srednja dnevna temperatura $T_{sr} < 2$ °C. Ove se metode često preuzimaju i računa se vjerojatnost nastanka mraza na nekom području bez prethodne validacije na tom području. Neke od ovih metoda ranije su korištene za određivanje mraza u Hrvatskoj u sadašnjim ili budućim klimatskim uvjetima, ali njihova točnost nije provjeravana (Vučetić i Anić, 2021.; Charalampopoulos i Droulia, 2022.). Zbog toga je potrebno pronaći metodu koja bi uz ulazne parametre dostupne na svim meteorološkim postajama mogla najbolje predvidjeti pojavu mraza u Hrvatskoj. Pronalaženje optimalne metode pomoglo bi u razumijevanju uvjeta potrebnih za stvaranje mraza u različitim klimatskim područjima te za što bolji opis njegove vjerojatnosti u nekom klimatskom razdoblju.

Korištenje klimatskih modela omogućuje procjenu rizika od mraza u budućoj klimi. Istraživanja mraza u Europi ukazuju na smanjenje broja dana s mrazom u sadašnjoj (Erlat i Turkes, 2011.) i budućoj klimi, ali i pomicanje zadnjeg proljetnog dana s mrazom prema početku kalendarske godine (npr., Malinović-Miličević i sur., 2018.; Graczyk i Szwed 2020.). Uočene promjene u nastupima ekstrema ne umanjuju rizik od štete uzrokovane mrazom. Zbog povećanja temperature dolazi i do sve ranijeg nastupa pupanja i cvatnje, a to pomicanje datuma ponekad je izraženije od pomicanja zadnjeg dana s mrazom. Ovo ukazuje na to da bi, uz povećanje temperature u vegetacijskoj sezoni, i pojava mraza mogla dodatno preoblikovati raspodjelu sorti vinove loze u Europi (Leolini i sur., 2018.).

1.4 Motivacija i ciljevi istraživanja

Zbog svojeg geografskog položaja i klimatske raznolikosti, Hrvatska je pogodna za uzgoj mnogih sorti vinove loze, ali i izrazito ranjiva na klimatske promjene. Ovo doktorsko istraživanje pridonosi produbljivanju poznavanja utjecaja klimatskih promjena na uzgoj proizvoljno odabranih četiriju sorti vinove loze.

Sve navedeno vodi prema glavnoj hipotezi rada da uslijed klimatskih promjena dolazi i do promjena u uzgoju vinove loze u Hrvatskoj te da se nastavak tih promjena očekuje i u budućnosti. Prilikom ispitivanja glavne hipoteze postavljeni su sljedeći ciljevi ovog rada:

- I Provesti klimatološku analizu meteoroloških mjerenja povezanih s uzgojem vinove loze na mreži postaja DHMZ-a. Za tu analizu koristit će se često upotrebljavani bioklimatski indeksi kako bi rezultati ovog rada bili lako usporedivi s drugim istraživanjima u Europi i svijetu. Analiza bi dala odgovor na pitanje ima li promjena u trenutnoj podijeli vinogradarskih zona te postoji li potreba za njihovim revidiranjem.
- II Provesti analizu fenoloških opažanja sorti 'Graševina', 'Chardonnay', 'Merlot' i 'Plavac mali' za četiri fenološke faze (pupanje, cvatnja, šara i berba) u odabranim vinogradima i meteoroloških mjerenja na meteorološkim postajama u blizini vinograda u dostupnom vremenskom razdoblju. Analiza fenoloških opažanja dat će uvid ima li utjecaja mjerenih klimatskih promjena na nastupe opaženih fenoloških faza vinove loze u Hrvatskoj.
- III Utvrditi utjecaj meteoroloških parametara na nastup fenoloških faza vinove loze. Pri tome će se koristiti model razvoja biljaka (*crop model*), ali i razviti statistički modeli koji bi koristeći samo meteorološke parametre opisivali nastupe fenoloških faza. Odredili bi se najtočniji modeli koji bi se onda mogli koristiti i za buduće klimatske projekcije.
- IV Pomoću klimatskih modela dati naznake o promjenama klime u budućnosti u Hrvatskoj te utjecaju promjena na uzgoj vinove loze. Klimatskim simulacijama bi se odredilo: (i) moguće postojanje novih područja pogodnih za uzgoj vinove loze u budućoj klimi te (ii) procijenilo moguće očekivane daljnje promjene u nastupima fenoloških faza kako bi se mogla dati što točnija informacija i smjernice o mogućim načinima prilagodbe.
- V Provesti analizu nastupa mraza u sadašnjim klimatskim uvjetima te dati njegova očekivanja u budućim. Za potrebe analize mraza u budućoj klimi razvit će se metoda koja najbolje opisuje vjerojatnost nastupa mraza.

Ciljevi istraživanja ovog rada proširit će dosadašnje spoznaje o utjecaju klimatskih promjena na uzgoj vinove loze, posebno dajući uvid na njihov utjecaj na fenologiju vinove loze za više sorata, od kojih su neke tradicionalne i autohtone sorte u Hrvatskoj. Osim toga, ovaj rad iznijet će klimatološku analizu mraza u Hrvatskoj kako u sadašnjoj, tako i u budućoj klimi, što može biti od velike važnosti za cjelokupnu poljoprivrednu proizvodnju u Hrvatskoj, a ne samo za vinogradarstvo. Neke najvažnije informacije na temu istraživanja iznesene su u brojnim predavanjima (npr. Grisogono i sur., 2023., Karoglan i sur., 2018.) i istraživačkim radovima (Omazić i sur., 2020., 2023.).

2 Podatci

2.1 Administrativna i klimatološka podjela Hrvatske

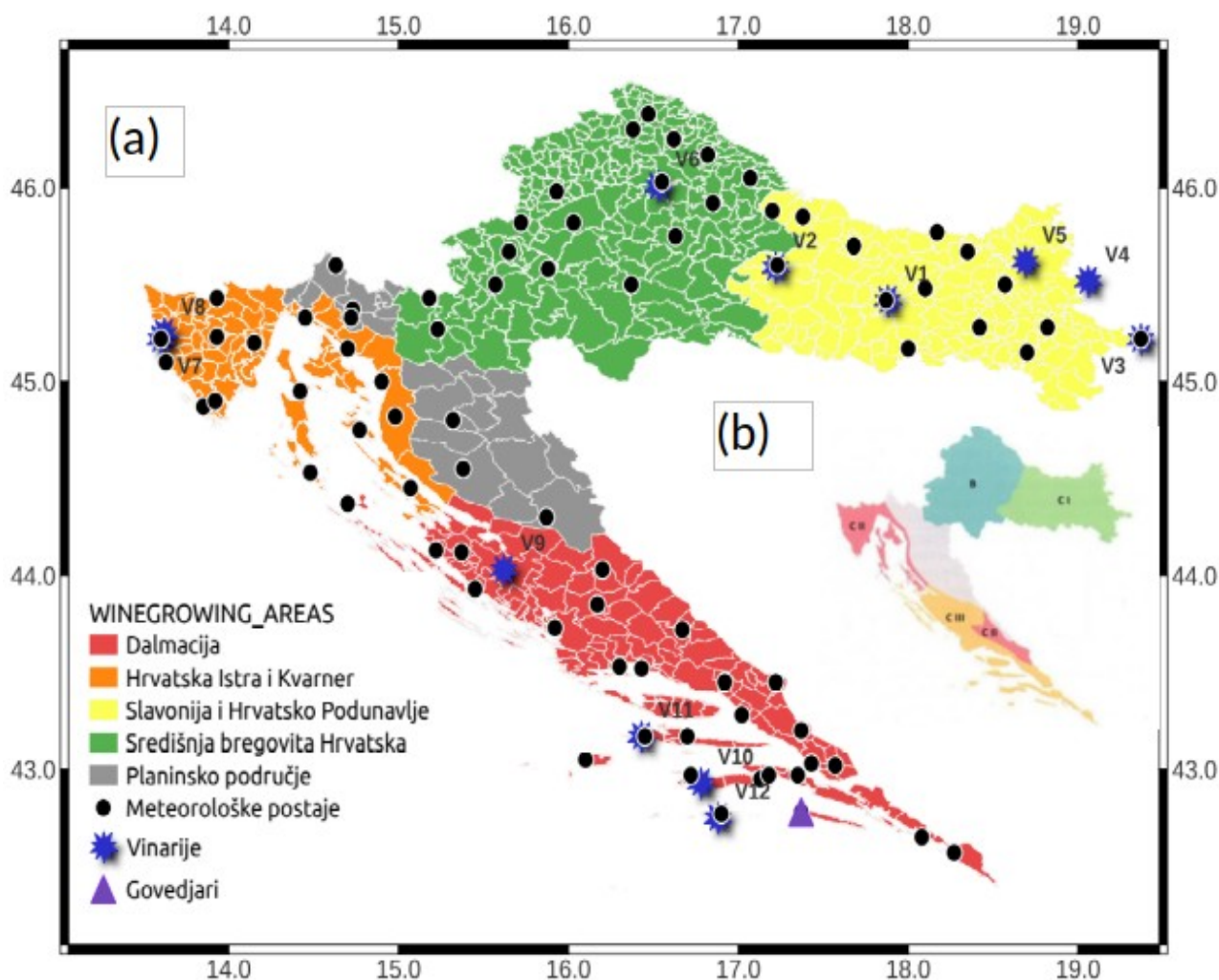
Administrativno, Hrvatska je podijeljena u četiri vinogradarske regije u kojima je, prema podacima Agencije za plaćanja u poljoprivredi, 2020. godine bilo više od 18 000 ha vinograda (Slika 2.1). Sama administrativna podjela grubo prati i klimatske karakteristike Hrvatske, koje su obilježene blizinom Jadranskog mora, planinskim masivima u unutrašnjosti te otvorenošću kontinentalnog područja Panonskoj ravnici (Zaninović i sur., 2018.). Prema agroklimatskom atlasu Republike Hrvatske (Vučetić i Anić, 2021.), većina područja pogodna je za uzgoj vinove loze.

Kontinentalni dio Hrvatske obuhvaća dvije vinogradarske regije: na istoku zemlje nalazi se regija Slavonija i Hrvatsko Podunavlje, a prema zapadu se pruža Središnja bregovita Hrvatska. Svaka od ovih regija dodatno je podijeljena u podregije i vinogorja. Prema klimatskom atlasu Republike Hrvatske (Zaninović i sur., 2008.) ove dvije vinogradarske regije nalaze se umjerenj kontinentalnoj klimi umjerenih geografskih širina. Srednja godišnja temperatura u ovom području je oko 11 °C i raste prema istoku. Glavna karakteristika ove klime je velika razlika u temperaturama toplog i hladnog dijela godine. Osim toga, zbog značajne količine oborine (300-600 mm godišnje) i s prosječno više od 270 dana u godini s temperaturom iznad 0 °C, ove regije pogodne su za uzgoj mnogih poljoprivrednih kultura, pa tako i vinove loze. Upravo u njima nalazi se 51 % ukupne površine vinograda u Hrvatskoj (9239 ha) i u njima se proizvede 67 % od ukupne proizvodnje grožđa u Hrvatskoj. Uobičajeno se uzgajaju bijele sorte (posebice 'Graševina'), ali mogu se uzgojiti i crne sorte, pogotovo na istoku zemlje gdje je temperatura nešto viša. I obalna područja podijeljena su u dvije regije. Na samom zapadu zemlje nalazi se regija Hrvatska Istra i Kvarner. Ova regija pogodna je za uzgoj gotovo svih sorti vinove loze, a dominantno se u ovom području uzgaja 'Malvazija istarska'. Obalna područja Istre i Kvarnera imaju srednju godišnju temperaturu oko 13 °C, a njezine vrijednosti smanjuju se prema unutrašnjosti. Srednja godišnja temperatura raste prema jugu, prema regiji Dalmaciji. Osim visoke temperature, još jedna od karakteristika regije Dalmacija je i manja količina oborine u ljetnim mjesecima i velik broj sušnih dana. Zbog takvih klimatskih karakteristika Dalmacija pogoduje uzgoju crnih sorti, a najviše se uzgaja sorta 'Plavac mali'. Kontinentalne regije od primorskih dijeli planinsko područje koje administrativno ne pripada niti jednoj regiji. U ovom

području uzgoj vinove loze uglavnom nije moguć, ali zadnjih godina na nekim lokacijama s nižom nadmorskom visinom započelo je kultiviranje vinove loze. Svaka od ovih regija pripada i određenoj vinogradarskoj zoni. Pripadnost određenoj vinogradarskoj zoni od velike je važnosti za vinare jer njome se definira mogućnost primjene različitih dozvoljenih enoloških postupaka u proizvodnji, kao što su pojačavanje, dokiseljavanje i otkiseljavanje mošta/vina (npr. Prša, 2022.). Vinogradarske zone rezultat su klimatskih čimbenika, a za podjelu po zonama često se koristi suma efektivnih temperatura, odnosno Winklerov indeks (GDD). Od 2021. u Hrvatskoj postoje 4 vinogradarske zone (Slika 2.1b). Regija Središnja i bregovita Hrvatska nalazi se u zoni B (drugoj najhladnijoj mogućoj), Slavonija i Hrvatsko Podunavlje nalaze se u zoni C I, Hrvatska Istra i Kvarner u zoni C II, a regija Dalmacija je podijeljena u dvije zone (obalni dio i zaleđe). Unutrašnjost uglavnom pripada zoni C II, dok su obalna područja u najtoplijoj zoni C III. Međutim, kako se klimatski uvjeti mijenjaju, a očekuje se i daljnja promjena praćena stalnim povećanjem temperature, upitno je prati li ova podjela na zone trenutnu situaciju, ali i ako prati, koliko će dugo vremena trebati do službenog redefiniranja vinogradarskih zona u Hrvatskoj.

2.2 Meteorološka mjerenja i opažanja

U ovom istraživanju korišteni su podaci s 80 meteoroloških postaja Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ-a, Slika 2.1a). Za analizu bioklimatskih indeksa korišteni su podaci o najvišoj dnevnoj temperaturi zraka (T_{max} , °C), najnižoj dnevnoj temperaturi zraka (T_{min} , °C), srednjoj dnevnoj temperaturi zraka (T_{sr} , °C), srednjoj dnevnoj relativnoj vlažnosti zraka (RH_{sr} , %), srednjoj dnevnoj brzini vjetra (v , m/s) i ukupnoj dnevnoj količini oborine (P , mm). Duljine nizova variraju od postaje do postaje, a najdulji neprekinuti nizovi su od 1961. do 2020. i dostupni su na 34 meteorološke postaje. Kroz godine se broj postaja povećavao, ali su isto tako neke postaje prestajale s radom. Osim toga, u određenim dijelovima imamo nedostatak mjerenja što zbog kvarova instrumenata, što zbog nedostatka motritelja. Ovo je naročito vidljivo između 1991. i 1995., za vrijeme Domovinskog rata, kada jedan dio postaja ima rijetka opažanja, odnosno nema ih. Kako bi se mogla provesti što točnija klimatološka analiza bioklimatskih indeksa, pristupilo se prostorno-vremenskoj interpolaciji meteoroloških elemenata što je predloženo u radu Perčec Tadić (2010.). Ova interpolacija korištena je samo za izračun bioklimatskih indeksa i njihovu klimatološku analizu pa je samim time interpolacija rađena na meteorološkim podacima od travnja do listopada. Ako je u tom periodu nedostajalo manje od 35 % podataka, tada su meteorološki elementi interpolirani uzimajući u obzir podatke izmjerene na najbližoj postaji. Ako je nedostajalo više od 35 % podataka tada interpolacija nije rađena.



Slika 2.1 (a) Administrativna podjela vinogradarskih regija u Hrvatskoj, 80 meteoroloških postaja na kojima su izračunati bioklimatski indeksi (crni kružići), te 12 vinarija (zvijezde i oznake V1-V12) na kojima su bila dostupna fenološka opažanja vinove loze. Popis vinarija nalazi se u Tablici 2.2. Ljubičastim trokutom označena je meteorološka postaja Goveđari na Mljetu, na kojoj je jedne godine zabilježena vrijednost GDD-a veća od 3000 °C jedinica. (b) Raspodjela četiriju vinogradarskih zona (B, C I, C II, C III) u Hrvatskoj prema Prša (2022.).

Osim toga, za testiranje metoda za analizu i prognozu mraza korišteni su podatci i o relativnoj vlažnosti zraka izmjerenoj u 07 CET (*RH7*) kao i opažanja mraza na postajama u mreži DHMZ-a. Kako bi se provela što točnija analiza ocjene metoda za detekciju nastupa mraza, postaje su podijeljene u četiri kategorije (kontinentalne postaje, planinske postaje, sjeverni Jadran i južni Jadran). Osim toga, nastupi mraza promatrani su u tri vremenska razdoblja: cijela godina, proljeće i jesen. Na ovaj način može se dobiti bolja informacija o točnosti metoda u određenom dijelu godine, s time da je naglasak na kasnom proljetnom mrazu (zbog ekonomske važnosti). Analiziran je broj dana s mrazom, zadnji proljetni dan s mrazom i prvi jesenski dan s mrazom. Na ovaj način dobivaju se informacije ne samo o ukupnom broju dana s mrazom, nego takav pristup omogućuje klasifikaciju utjecaja/procjene opasnosti mraza za uzgoj određenih kultura, ovisno o nastupima mraza u proljeće ili jesen.

2.3 Fenološki podatci

Za analizu fenoloških podataka prikupljeni su podatci o počecima nastupa četiri fenološke faze (pupanje, cvatnja, šara i berba) na 12 lokacija diljem Hrvatske (Slika 2.1, Tablica 2.1 i 2.2). U ovoj doktorskoj radnji istraživanje je provedeno na četiri sorte vinove loze (dvije bijele: 'Graševina' i 'Chardonnay' te dvije crne: 'Plavac mali' i 'Merlot'). Ove su sorte zastupljene s oko 70 % u ukupnoj proizvodnji vinove loze u Hrvatskoj. 'Graševina' i 'Plavac mali' tradicionalne su sorte u Hrvatskoj, a 'Chardonnay' i 'Merlot' su internacionalne sorte, dobro prihvaćene i vrlo raširene u uzgoju i kod nas. Upravo su zato odabrane ove četiri sorte kako bi se odredilo koje sorte su otpornije na klimatske promjene.

Budući da u Hrvatskoj ne postoji sustavno praćenje fenoloških faza vinove loze, dostupni su podatci samo onih vinarija koje su pristale sudjelovati u istraživanju, a samim time se razlikuju i vremenski nizovi. Zbog malog broja vinarija i godina u kojima su opažane fenološke faze (u odnosu na brojna meteorološka mjerenja), ovi podatci su izrazito vrijedni. Osim nastupa fenoloških faza, na nekim lokacijama dostupni su i podatci o količini šećera u moštu i kiselinama. Popis vinarija koje su sudjelovale u istraživanju te dostupni podatci i duljina nizova prikazani su u Tablicama 2.1 i 2.2.

Tablica 2.1 Dostupni podatci o počecima fenoloških faza u referentnim vinogradima u Hrvatskoj (prikazani na slici 2.1a za dvije bijele sorte vinove loze (G – 'Graševina', C – 'Chardonnay'). Osim toga, tablica pokazuje koriste li se podatci s postaje za kalibraciju/validaciju za podtip A (KAL/VAL stupac) statističkih fenoloških modela (vidi poglavlje 3.2.2), te u kojem periodu je napravljena kalibracija, a u kojem validacija za podtip modela B.

SORTA	LOKACIJA	KAL/VAL	PUPANJE		CVATNJA		ŠARA		BERBA	
			KAL	VAL	KAL	VAL	KAL	VAL	KAL	VAL
G	KUTJEVO_V1	KAL	2010-2015	2016-2020	2010-2015	2016-2020	2010-2015	2016-2020	2010-2015	2016-2020
	DARUVAR_V2	VAL	2005-2011	2012-2013, 2015-2020	2005-2012	2013-2020	2005-2012	2013-2020	2001-2009	2010-2018
	KRIŽEVCI_V6	KAL	2005-2011	2012-2018	2005-2011	2012-2018	2005-2012	2013-2020	2001-2002, 2004-2010	2011-2018
	ERDUT_V4	VAL								
	ILOK_V3	VAL							2000-2009	2010-2020
C	KUTJEVO_V1	KAL	2010-2015	2016-2020	2010-2015	2016-2020	2010-2015	2016-2020	2010-2015	2016-2020
	DARUVAR_V2	VAL	2005-2012	2013-2020	2005-2012	2013-2020	2005-2012	2013-2020	2001-2009	2010-2018
	ILOK_V3	KAL	2005-2010, 2012	2015-2017, 2019-2020	2005-2010, 2012	2015-2017, 2019-2020	2005-2010, 2012	2015-2017, 2019-2020	2003-2012	2013-2020
	POREČ_V7	VAL	2008-2014	2015-2020	2008-2014	2015-2020	2008-2014	2015-2020	2008-2014	2015-2020
	ERDUT_V4	KAL								
	BELJE_V5	VAL							2000-2009	2010-2018

Tablica 2.2 Dostupni podatci o počecima fenoloških faza u referentnim vinogradima u Hrvatskoj (prikazani na slici 2.1a za dvije crne sorte vinove loze (M – 'Merlot', PM – 'Plavac mali'). Osim toga, tablica pokazuje koriste li se podatci s postaje za kalibraciju/validaciju za podtip A (KAL/VAL stupac) statističkih fenoloških modela (vidi poglavlje 3.2.2) te u kojem periodu je napravljena kalibracija, a u kojem validacija za podtip modela B.

SORTA	LOKACIJA	KAL/VAL	PUPANJE		CVATNJA		ŠARA		BERBA	
			KAL	VAL	KAL	VAL	KAL	VAL	KAL	VAL
M	ZADAR_V9	VAL	2007-2013	2014-2020	2007-2013	2014-2020	2007-2013	2014-2020	2007-2013	2014-2020
	POREČ_V7	KAL	2008-2014	2015-2020	2008-2014	2015-2020	2008-2014	2015-2020	2008-2014	2015-2020
	AGROLAGUNA_V8	VAL							2010-2014	2015-2020
	KORČULA_V10	KAL							2007-2013	2014-2020
	KUTJEVO_V1	VAL							2005-2011	2012-2018
	BELJE_V5	VAL							2006-2012	2013-2018
PM	HVAR_V11	KAL	1961-1990	1991-2020	1961-1990	1991-2020	1961-1990	1991-2020	1961-1990	1991-2020
	LASTOVO_V12	VAL	1961-1990	1991-2020	1961-1990	1991-2020	1961-1990	1991-2020	1961-1990	1991-2020
	KORČULA_V10	VAL							2001-2010	2011-2020

3 Metode

3.1 Bioklimatski indeksi

Kako bi se što bolje opisala interakcija između vinove loze i klimatskih uvjeta potrebnih za njezin uspješan rast i razvoj, izvedeno je nekoliko bioklimatskih indeksa koji na jednostavan način opisuju pogodnost određenog područja za uzgoj vinove loze.

3.1.1 Srednja temperatura zraka u sezoni vegetacije

Prva indikacija o mogućoj uspješnosti uzgoja vinove loze na nekom području je promatranje srednje temperature u sezoni vegetacije (*eng. average growing season temperature, GST*). Računajući srednju temperaturu zraka od travnja do kraja listopada (jednadžba 3.1) ovaj indeks svrstava područja u jednu od sedam klasa (Tablica 3.1). Srednja temperatura računa se kao srednja vrijednost najviše dnevne temperature zraka (T_{max}) i najniže dnevne temperature zraka (T_{min}).

$$GST(^{\circ}C) = \sum_{1.4.}^{31.10.} (T_{max} + T_{min}) / 2 \quad (3.1)$$

Ovisno o klasi, područje može biti pogodno za uzgoj nekih ili svih sorti vinove loze ili nepogodno za njezin uzgoj (izrazito hladno ili prevruće područje). Ovaj indeks predložio je Jones (2006.) i temelji se na spoznaji da je berba direktno povezana s temperaturom u sezoni rasta.

Tablica 3.1 Lista bioklimatskih indeksa korištenih u ovom istraživanju.

Indeks	Definirani razredi		
Prosječna temperatura u vegetacijskoj sezoni (GST) (Jones, 2006.)	<13 13 – 15 15 – 17 17 – 19 19 – 21 21 – 24 > 24	Ekstremno hladno Hladno Umjereno toplo Toplo Vruće Vrlo vruće Ekstremno vruće	
Suma efektivnih temperatura (GDD) ili Winklerov indeks (WI) (Winkler i sur., 1974.; Jones i sur., 2012.)	< 850 850 – 1111 1111 – 1389 1389 – 1667 1667 – 1944 1944 – 2222 2222 – 2700 > 2700	Ekstremno hladno Zona Ia Zona Ib Zona II Zona III Zona IV Zona V Ekstremno vruće	Zona A Zona B Zona CI Zona CII Zona CIII
Huglinov indeks (HI) (Huglin, 1978.)	< 1200 1200 – 1500 1500 – 1800 1800 – 2100 2100 – 2400 2400 – 2700 2700 – 3000 > 3000	Ekstremno hladno Vrlo hladno Hladno Umjereno hladno Umjereno toplo Vruće Vrlo vruće Ekstremno vruće	
Indeks hladnih noći (CI) (Tonietto, 1999.)	< 12 12 – 14 14 – 18 > 18	Vrlo hladne noći Hladne noći Umjerene noći Tople noći	
Indeks suhoće (DI) (Riou i sur., 1994.; Tonietto i Carbonneau, 2004.)	< -100 -100 – 50 50 – 150 > 150	Vrlo suho Umjereno suho Umjereno vlažno Vlažno	

3.1.2 Suma efektivnih temperatura ili Winklerov indeks

Suma efektivnih temperatura ili Winklerov indeks (*eng. Growing degree-day, GDD*) računa se kao suma srednjih dnevnih temperatura zraka u danima kada je ona prelazila iznad 10 °C koristeći jednadžbu 3.2. U njoj T_{max} predstavlja najvišu dnevnu temperaturu zraka, a T_{min} najnižu dnevnu temperaturu zraka. Osnovna temperatura za vinovu lozu je 10 °C jer se podrazumijeva da upravo na toj temperaturi vinova loza postaje aktivna. Ako je za određeni dan $GDD < 0$, tada se računa da se nije akumulirala toplina te taj dan GDD ima vrijednost 0.

$$GDD(^{\circ}Cjedinice) = \sum_{1.4.}^{31.10.} (T_{max} + T_{min}) / 2 - 10^{\circ}C. \quad (3.2)$$

Ovaj indeks bazira se na tome da je vinovoj lozi potrebna određena količina akumulirane topline kako bi završila svoj fenološki ciklus (Malcherio i sur., 2010.). Prvi put je uveden 1974. godine (Winkler, 1974.) i na temelju njega cijeli svijet bio je podijeljen u pet zona (A, B, C I, C II, C III). Kasnije su Jones i sur. (2012.) uvidjeli potrebu za dodatnom podjelom najtoplije i najhladnije zone te se danas može naći podjela na osam zona (Tablica 3.1).

3.1.3 Huglinov indeks

Huglinov indeks (HI, Huglin, 1978.) je heliotermički indeks koji je također ovisan o temperaturi zraka. Uveo ga je Huglin (1978.), a slično kao i Winklerov indeks bazira se na principu računanja temperaturnih suma. Temperaturne sume počinju se zbrajati 1. travnja, ali za razliku od Winklerovog indeksa pretpostavlja se da vegetacijska sezona završava sa zadnjim danom rujna. Huglinov indeks računa se po jednadžbi 3.3 gdje T_{sr} označava srednju dnevnu temperaturu zraka, a k koeficijent duljine dana. Ovaj koeficijent uključuje korekciju duljine dana u računu temperaturnih suma ovisno o geografskim širinama u kojima se nalazimo. Njegovi iznosi prikazani su u Tablici 3.2. Ovisno o vrijednosti Huglinovog indeksa, područja možemo svrstati u jednu od osam klasa (Tablica 3.1), a uzima se u obzir da je područje pogodno za uzgoj vinove loze ako je vrijednost $HI > 1500^{\circ}C$ jedinica.

$$HI(^{\circ}Cjedinice) = \sum_{1.4.}^{30.9.} \frac{(T_{sr} - 10^{\circ}C) + (T_{max} - 10^{\circ}C)}{2} \cdot k. \quad (3.3)$$

Tablica 3.2 Koeficijent duljine dana k ovisno o geografskoj širini i korišteni u jednadžbi 3.3.

Geografska širina	k
< 40°	1
40° - 42°	1,02
42° - 44°	1,03
44° - 46°	1,04
46° - 48°	1,05
48° - 50°	1,06

3.1.4 Indeks hladnih noći

Indeks hladnih noći (eng. *Cool night index, CI*) je mjesečni srednjak minimalne temperature zraka u mjesecu berbe (rujnu) i dan je jednadžbom 3.4. T_{min} u razdoblju prije berbe značajno utječe na omjer šećera i kiselina u bobicama grožđa. Osim toga, visoke temperature zraka tijekom noći mogu utjecati i na kemijski sastav grožđa, osobito na antocijane (Kliwer i Torres, 1972.). Dajući relativnu mjeru potencijala sazrijevanja, postoje četiri klase CI (Tablica 3.1) od vrlo hladnih do vrućih noći (Tonietto, 1999.).

$$CI(^{\circ}C) = \frac{1}{30} \sum_{j=1.9.}^{30.9.} T_{min,j} \quad (3.4)$$

3.1.5 Indeks suhoće

Indeks suhoće (eng. *Dryness index, DI*) mjera je viška ili manjka vlage u tlu i definira četiri zone, od vrlo suhe do vlažne zone za razdoblje od travnja do rujna (Tablica 3.1). Za izračune DI u jednadžbi 3.5, evapotranspiracija je procijenjena prema FAO Penman-Monteih metodi (Allen i sur., 1998.). Indeks suhoće računa se prema izrazu:

$$DI(mm) = W_0(mm) + P(mm) - T_v(mm) + E_s(mm) \quad (3.5)$$

U jednadžbi 3.5. W_0 predstavlja pretpostavljeni početni vodni kapacitet tla, odnosno najveću moguću zalihu vode u tlu početkom sezone. U ovoj doktorskoj radnji korištene su tri vrijednosti W_0 do 1 m dubine. Ovisno o području na kojem se postaja nalazi, procijenjeni iznos W_0 je 150 mm za obalna područja, 200 mm za planinska područja ili 400 mm za kontinentalna područja nižih nadmorskih visina. Veličine T_v i E_s se računaju za svaki mjesec u godini; T_v predstavlja potencijalnu transpiraciju u vinogradu i dana je sljedećim izrazom:

$$T_v(mm) = kd \cdot ETP(mm), \quad (3.6)$$

gdje je ETP je potencijalna evapotranspiracija, a kd koeficijent radijacijske apsorpcije vinove loze i varira od 0,1 do 0,5 ovisno o mjesecu u godini (Tonietto i Carbonneau, 2004.). E_s je direktna evaporacija iz tla i računa se prema:

$$E_s(mm) = \frac{ETP(mm)}{N} (1 - kd) \cdot JPM. \quad (3.7)$$

U gornjem izrazu N je broj dana, a JPM je broj dana mjesečnog efektivnog isparavanja tla.

3.2 Modeli

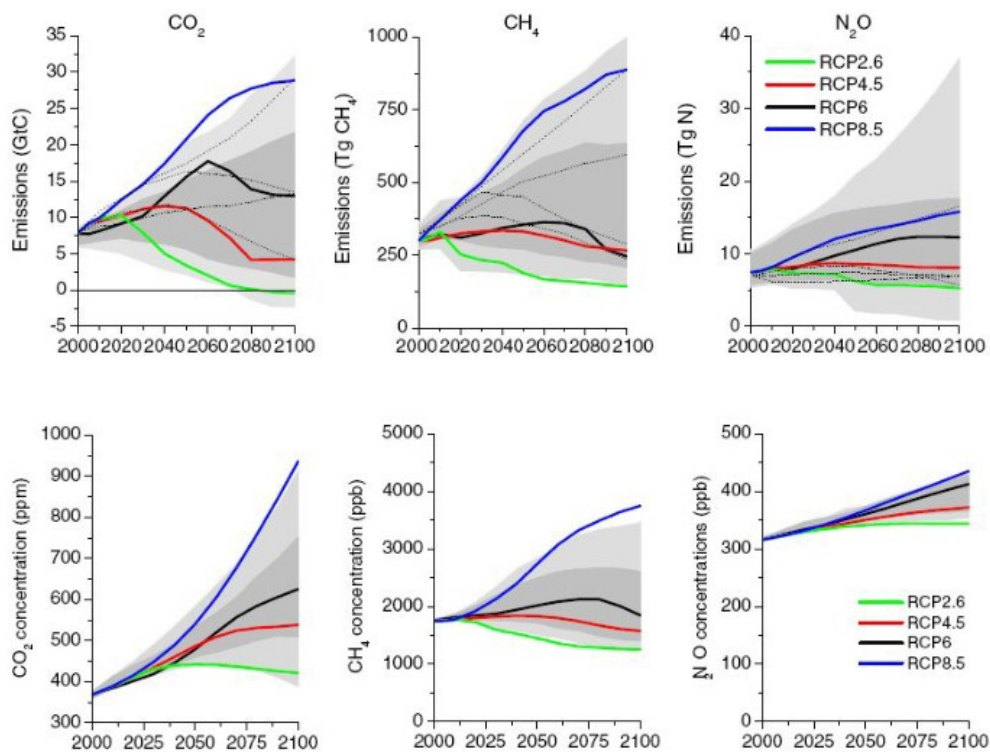
3.2.1 Klimatski modeli

Osim mjerenja i opažanja za klimatsku analizu prošlog razdoblja i klimatske projekcije do kraja stoljeća korišteni su izlazi reanalize ERA-Interim (Dee i sur., 2011.) te modelski izlazi triju regionalnih klimatskih modela (*eng. Regional climate models, RCMs*) iz EURO-CORDEX inicijative (Jacob i sur., 2013.). Za ove potrebe preuzeti su modelski izlazi dnevnih vrijednosti (srednje dnevne vrijednosti) za iste podatke koji su korišteni i iz mjerenja. Simulacije klimatskih modela dostupne su s prostornom razlučivošću od $0,11^\circ$. Dnevni srednjaci dostupni su za razdoblje od 1971. do 2100. Ovdje odabrani modeli pokazali su se kao dobar izbor u drugim istraživanjima za područje Hrvatske (Belušić i sur., 2018.; Belušić Vozila i sur., 2019.) te su zato odabrani između svih dostupnih modela u EURO-CORDEX bazi. Pet različitih globalnih klimatskih modela (*eng. Global Climate Models, GCM*) korišteni su za rubne i početne uvjete za navedene RCM-e. Svi RCM nisu pokretani istim GCM-ovima, a popis svih RCM-a i GCM-a koji su združeno korišteni dan je u Tablici 3.3.

Za potrebe ovog doktorskog istraživanja korištena su dva scenarija koncentracije stakleničkih plinova, umjereni RCP4.5 i ekstremni RCP8.5 (van Vuuren i sur. 2011.). Scenarij RCP4.5 pretpostavlja da će sredinom stoljeća doći do smanjenja emisije stakleničkih plinova te da će njihova koncentracija blago rasti (u slučaju CO_2 i N_2O) ili polako opadati (CH_4) (Slika 3.1). Na taj način bi se porast temperature uzrokovan porastom emisije stakleničkih plinova stabilizirao u drugoj polovici 21. stoljeća. Scenarij RCP8.5 daje porast koncentracije i emisija stakleničkih plinova do kraja 21. stoljeća (Slika 3.1), a samim time i očekivani porast globalne prizemne temperature do $4,3^\circ C$ do kraja stoljeća. Na ovaj način za buduću klimu dobivamo 10 simulacija za svaki RCP, što čini 20 simulacija za buduću klimu. S ovakvim ansamblom od 20

projekcija možemo dobiti široku sliku potencijalne klimatske varijabilnosti te dobro opisati klimatska očekivanja u budućnosti.

Osim navedenih izvora modeliranih podataka iz EURO-CORDEX inicijative, koristile su se klimatske simulacije s još finijim razlučivanjem dobivene pomoću modela ETHZ. Za analizu je korišten model ETHZ-CCLM-02 na dvije ugnježdene domene; jedne s grubljim razlučivanjem na $0,11^\circ$ te finijom na $0,02^\circ$ (tzv. *COSMO convection-resolving model* ili *convection-permitting model*). Budući da je rezolucija u ovom klimatskom modelu izrazito fina, ne postoji mogućnost simuliranja cjelokupnog razdoblja od 2011. do kraja stoljeća, nego su simulacije dostupne tek u dva vremenska razdoblja od po 10 godina: evaluacijski od 1999. do 2008. te buduće razdoblje od 2044. do 2053. Isto tako, ovaj model ima samo jedan RCP scenarij i to RCP8.5.



Slika 3.1 Emisije (gornji red) i koncentracije (donji red) stakleničkih plinova: CO₂ (lijevo), CH₄ (sredina) i N₂O (desno). Izvor: Van Vuuren i sur., 2011.).

Analize projekcija rađene su za više razdoblja u budućnosti (P1; 2011.–2040., P2; 2041.–2070. i P3; 2071.–2099.) te su uspoređivane s uvjetima sadašnje klime (P0, 1971.–2000.) za vegetacijski ciklus od travnja do listopada.

Tablica 3.3 Popis analiziranih simulacija. Sve simulacije modela unutar EURO-CORDEX inicijative dostupne su s mrežnim korakom 0,11°, a simulacija modela ETHZ dostupna je s prostornim korakom mreže 0,02°.

EURO-CORDEX RCM/Institucija	GCM	Razdoblje	Broj simulacije	Varijabla
RCA4_SMHI (Samuelsson i sur. 2011.)	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	P0, P2, P3	1	<i>Tsr, Tmax, Tmin, RH, P, brzina vjetra na 10 m visine</i>
	ICHEC-EC-EARTH	P0, P2, P3	2	
	IPSL-IPSL-CM5A-MR	P0, P2, P3	3	
	MOHC-HadGEM2-ES	P0, P2, P3	4	
	MPI-M-MPI-ESM-LR	P0, P2, P3	5	
	ECMWF ERA-Interim	1981-2010	11	
CCLM4_CLMcom (Rockel i sur., 2008.)	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	P0, P2, P3	6	<i>Tsr, Tmax, Tmin, RH, P, brzina vjetra na 10 m visine</i>
	ICHEC-EC-EARTH	P0, P2, P3	7	
	MOHC-HadGEM2-ES	P0, P2, P3	8	
	MPI-M-MPI-ESM-LR	P0, P2, P3	9	
	ECMWF ERA-Interim	1991-2008	12	
ALADIN5.3_CNRM (Colin i sur., 2010.)	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	P0, P2, P3	10	<i>Tsr, Tmax, Tmin, RH, P, u i v komponenta vjetra na 10 m visine</i>
	ECMWF ERA-Interim	1981-2008	13	
ETHZ		1999-2008 2044-2053		<i>Tsr, Tmax, Tmin, RH, P, brzina vjetra na 10 m visine</i>

3.2.2 Statistički modeli za određivanje nastupa fenoloških faza

Četiri statistička modela opisana su u Tablici 3.4 te su korištena kako bi odredili početak određenih fenoloških faza. Prva dva modela baziraju se na određivanju iznosa GDD kojeg vinova loza mora dostići kako bi fenološka faza krenula. Prvi model za računanje GDD-a koristi osnovnu temperaturu 10 °C (Model 1), a drugi temperaturu 5 °C (Model 2). Princip modela je da u kalibracijskom razdoblju za svaku sortu računamo koliko GDD-a vinova loza skupi od 1. siječnja do početka fenofaze. GDD se računa po formuli:

$$GDD(^{\circ}Cjedinice) = \sum_{1.1.}^{nastupfenofaze} (T_{max} + T_{min})/2 - T_{osnovna}^{\circ}C, \quad (3.8)$$

gdje je $T_{osnovna}$ osnovna temperatura i iznosi 5 °C za model GDD5 (model 2, Tablica 3.4) i 10 °C za model GDD10 (model 1, Tablica 3.4). Zatim se određuje medijan praga GDD za kalibracijsko razdoblje i on se uzima kao relevantan i koristi se u validacijskom razdoblju. Na primjer, pupanje 'Graševine' u Daruvaru 2005. godine nastupilo je 15. travnja (105 dan u godini, DOY = 105) te je od 1. siječnja do toga datuma nakupljeno GDD5=178,55 °C jedinice, odnosno GDD10 = 46,95 °C jedinice. Ovaj postupak ponavlja se za svaku godinu u kalibracijskom razdoblju. Nakon toga računa se srednjak GDD5 i GDD10 u kalibracijskom razdoblju i koristi se za provjeru točnosti ova dva modela u validacijskom razdoblju.

Modeli 3 i 4 koriste višestruku linearnu regresiju kako bi odredili početak nastupa fenoloških faza, a kao ovisne varijable koriste:

- srednje vrijednosti minimalne, maksimalne i srednje dnevne temperature (Model 3)
- srednje vrijednosti minimalne, maksimalne, srednje dnevne temperature i ukupne dnevne količine oborine (Model 4)

usrednjenima u mjesecima neposredno prije nastupa fenološke faze. Ovaj model uzima u obzir da vinova loza miruje u zimskim mjesecima pa se za ovaj model u obzir uzima samo temperatura od ožujka do berbe. Prvi korak je računanje srednjeg dana početka svake fenološke faze. Ako je taj datum prije 15. u mjesecu, taj mjesec nije uključen u računanje višestruke linearne regresije, nego samo mjeseci koji su mu prethodili (od ožujka pa nadalje). Ako je srednjak datuma poslije 15. u mjesecu onda i taj mjesec ulazi u račun višestruke linearne regresije. Nakon toga provodi se višestruka linearna regresija sa svim kombinacijama prediktora. Linearna regresija s najvećim prilagođenim koeficijentom korelacije (eng. *adjusted coefficient of correlation, r_{adj}*) uzima se kao najbolja. Na primjer, ako u kalibracijskom razdoblju srednjak nastupa pupanja za 'Graševinu' u Daruvaru 13. travnja, za računanje višestruke linearne regresije koriste se samo meteorološki parametri u travnju. Računa se višestruka linearna regresija s prediktorima navedenim u tablici 3.4 i nakon toga u svim mogućim kombinacija (npr. za Model 3 koriste se sve moguće kombinacije T_{max} , T_{min} i T_{sr} , a to je ukupno 7 kombinacija). Ona s najvećim r_{adj} uzima se kao najbolja i s njom se radi daljnje testiranje u periodu validacije.

Svaki od ova četiri modela ima dva podtipa, podtipove A i B. Podtip A podrazumijeva da se svaka sorta može gledati općenito, odnosno da je za početak fenofaze za sortu potreban jednak GDD i ista linearna regresija, odnosno lokacija nije uzeta u obzir. Tada je kalibracija rađena cijelom dostupnom vremenskom nizu na pola postaja, tj. na onim lokacijama koje su označene s KAL u Tablicama 2.1. i 2.2, a validacija je rađena na drugoj polovici postaja. Podtip B uzima u obzir da su modeli ovisni o sorti, ali i o lokaciji na kojoj se sorta uzgaja. U ovom podtipu

za svaku sortu i lokaciju dostupan vremenski niz fenoloških opažanja podijeljen je na dva dijela, na prvom dijelu radi se kalibracija modela, a na drugoj polovici validacija. Za svaku lokaciju periodi kalibracije i validacije dani su u Tablicama 2.1 i 2.2. Budući da u Erdutu imamo samo četiri godine fenoloških opažanja, podatci ove vinarije nisu korišteni za podtip B. Na ovaj način, osim provjere utjecaja meteoroloških parametara na fenološke faze, moguće je ispitati mogu li se pragovi i parametri izračunani na jednoj lokaciji za određenu sortu također primijeniti na drugim lokacijama za tu istu sortu.

Tablica 3.4 Popis statističkih modela korištenih za određivanje početaka nastupa fenoloških faza.

MODEL	PRETPOSTAVKE MODELA
1	Računanje efektivne sume temperature s osnovnom temperaturom 10 °C (GDD10) od 1. siječnja do početka fenološke faze
2	Računanje efektivne sume temperature s osnovnom temperaturom 5 °C (GDD5) od 1. siječnja do početka fenološke faze
3	Model računa višestruku linearnu regresiju između početka fenoloških faza i srednjih mjesečnih vrijednosti meteoroloških elemenata (T_{min} , T_{max} i T_{sr}) u razdoblju od 1. ožujka do početka fenološke faze
4	Model računa višestruku linearnu regresiju između početka fenoloških faza i srednjih mjesečnih vrijednosti meteoroloških elemenata (T_{min} , T_{max} , T_{sr} i oborina) u razdoblju od 1. ožujka do početka fenološke faze
<hr/>	
PODTIP	
A	Isti prag ili ista višestruka linearna regresija korištena je za jednu sortu bez obzira na lokaciju
B	Prag i višestruka linearna regresija ovise o sorti i lokaciji

3.2.3 Model STICS (model razvoja biljaka)

Osim statističkih modela za procjenu nastupa fenoloških faza možemo koristiti i dinamičke modele. STICS je razvio Francuski nacionalni institut za Agronomska istraživanja (INRA) (Brisson, 2003.). STICS je model koji simulira odnose tlo-biljka-atmosfera temeljeći se na ravnoteži vode, ugljika i dušika potrebnih za rast i razvoj biljki. STICS simulira cjelokupni proces

rasta i razvoja biljke, uključujući ravnotežu vode i dušika. Kao ulazne parametre, STICS uzima dnevne vrijednosti vezane za klimu, tlo i biljku, a kao izlazne podatke daje informacije o urodu i parametrima vezanim za razvoj. U ovoj radnji model STICS koristit će se samo za prognozu fenoloških faza u sadašnjoj i budućoj klimi. Više detalja o biodinamičkim jednadžbama modela može se naći u Brisson i sur. (2003.), de Cortazar-Atauri (2006.), Fraga i sur. (2015.). Fenologija je modelirana akumulacijom temperature (model GDD, jednadžba 3.2.), ali u ovom slučaju i temperature zraka i temperature vinove loze, rast ploda definiran je dinamikom suhog nakupljanja tvari i sadržaja vode, datum berbe određuje se prema sadržaju vode u bobici, koji je u velikoj korelaciji sa šećerom. Prije izračuna traženih vrijednosti za svaku je sortu i lokaciju napravljena parametrizacija GDD vrijednosti kako bi dobiveni rezultati bili što točniji i kako bi se mogle modelirati fenološke faze i za sorte koje nisu dostupne u modelu STICS kao jedne od osnovnih ('Graševina' i 'Plavac mali'). Na temelju parametrizacije izračunavaju se pragovi GDD-a potrebni za početak svake fenofaze za određenu sortu. Isto tako, računa se vrijednost vode pri kojoj je uobičajena berba za svaku lokaciju.

3.2.4 Metode za analizu pojave mraza

Budući da mraz nije izlazni parametar klimatskih modela, da bi se što točnije procijenilo formiranje mraza u budućoj klimi potrebno je pronaći metodu koja najbolje opisuje vjerojatnost nastupa mraza. Pritom se koriste samo osnovna mjerenja dostupna na 2 m visine na svim meteorološkim postajama u Hrvatskoj. Iz tog je razloga testirano 10 različitih metoda za detekciju mraza, opisanih u tablici 3.5. Pet od njih (označenih brojevima 1-5) već je uvedeno u drugim studijama, ali nisu testirani na našem području. Ostalih pet metoda predloženo je u ovom radu.

Predložene metode temelje se na tome da temperatura rosišta mora biti ispod 0 °C da bi došlo do smrzavanja vode i stvaranja mraza. Ako je zrak zasićen, njegova se temperatura naziva temperaturom rosišta (T_d) jer svaki daljnji pad temperature uzrokuje kondenzaciju i stvaranje rose (npr., Lalić i sur., 2018.). Tada se može pretpostaviti da u slučaju ako je T_d ispod 0 °C, dolazi do formiranja kristalića leda. T_d izračunava se pomoću Clausius-Clapeyronove jednadžbe, a T_{min} se mjeri svako jutro na 2 m visine. Ovisno o metodi, relativna vlažnost zraka u 07 CET (RH_7) ili srednja dnevna relativna vlažnost zraka (RH_{sr}) korišteni su za izračun T_d jer ne postoje mjerenja relativne vlažnosti zraka u točno vrijeme kada temperatura zraka dosegne minimalnu vrijednost. U ovom istraživanju minimalni temperaturni prag za metode 6-10 nije zasebno izračunat, već je prag postavljen u rasponu od 2 °C do 3 °C svakih pola stupnja. Ova pretpostavka se slaže s rezultatima istraživanja Zaninović i Gajić Čapka (1999.) za postaju Zagreb-Maksimir za

10-godišnje razdoblje (1971.-1980.) u hladnom dijelu godine (rujan – svibanj). Spomenuta analiza je pokazala da su minimalne temperature zraka na visini od 5 cm niže za 2-3 °C od minimalnih temperatura zraka na visini od 2 m tijekom vedrih situacija popraćenih tišinama, vedrih/vjetrovitih uvjeta i djelomično oblačnih situacija popraćenih tišinama. Svih 10 metoda evaluirano je za tri razdoblja tijekom godine: cijela godina (siječanj - prosinac), proljeće (ožujak-svibanj) i jesen (rujan – studeni). Osim toga, postaje su podijeljene na četiri tipa: kontinentalne postaje (one koje pripadaju regijama Slavonija i Hrvatsko Podunavlje i Središnja bregovita Hrvatska, Slika 2.1), postaje sjevernog Jadrana (one koje pripadaju regiji Hrvatska Istra i Kvarner, Slika 2.1), južni Jadran (postaje pripadaju regiji Dalmacija, Slika 2.1) i gorske postaje (bez administrativne zone, Slika 2.1)

Tablica 3.5 Popis metoda za detekciju mraza.

METODA	OPIS
1	Mraz se pretpostavlja kada je minimalna temperatura zraka na 2 m iznad tla (T_{min}) < -2,2 °C
2	Mraz se pretpostavlja kada je minimalna temperatura zraka na 2 m iznad tla (T_{min}) < 0 °C
3	Mraz se pretpostavlja kada je na 2 m iznad tla zadovoljeno da je minimalna temperatura zraka (T_{min}) < -2 °C i srednja dnevna temperatura zraka (T_{sr}) < 2 °C
4	Mraz se pretpostavlja kada je minimalna temperatura zraka na 2 m iznad tla (T_{min}) < -1 °C
5	Mraz se pretpostavlja kada je minimalna temperatura zraka na 2 m iznad tla (T_{min}) < -2 °C
6	Mraz se pretpostavlja kada je minimalna temperatura zraka (T_{min}) < 3 °C i temperatura rosišta, (T_d) < 0 °C. T_d je izračunato pomoću T_{min} i relativne vlažnosti u 7 CET ($RH7$)
7	Mraz se pretpostavlja kada je minimalna temperatura zraka (T_{min}) < 3 °C i temperatura rosišta, (T_d) < 0 °C. T_d je izračunato pomoću T_{min} i srednje dnevne relativne vlažnosti (RH_{sr})
8	Mraz se pretpostavlja kada je minimalna temperatura (T_{min}) < 2 °C i temperatura rosišta, (T_d) < 0 °C. T_d je izračunato pomoću T_{min} i relativne vlažnosti u 7 CET ($RH7$)
9	Mraz se pretpostavlja kada je minimalna temperatura zraka (T_{min}) < 2 °C i temperatura rosišta, (T_d) < 0 °C. T_d je izračunato pomoću T_{min} i srednje dnevne relativne vlažnosti (RH_{sr})
10	Mraz se pretpostavlja kada je minimalna temperatura zraka (T_{min}) < 2.5 °C i temperatura rosišta, (T_d) < 0 °C. T_d je izračunato pomoću T_{min} i srednje dnevne relativne vlažnosti (RH_{sr})

3.3 Statističke metode za ocjenu točnosti

Kako bi se provjerili ispravnost metoda i modela, kako onih za procjenu nastupa fenoloških faza opisanih u poglavljima 3.2.2 i 3.2.3, tako i onih za procjenu nastupa mraza opisanih u poglavlju 3.2.4, korištene su statističke veličine opisane u idućim potpoglavljima.

3.3.1 Statističke veličine za procjenu točnosti nastupa fenoloških faza

Za procjenu točnosti fenoloških modela izračunane su dvije osnovne statističke veličine između modeliranih i stvarnih datuma nastupa fenoloških faza u validacijskom razdoblju: koeficijent korelacije (R_{cv}) i korijen srednje kvadratne pogreške (*eng. Root Mean Square Error, RMSE*). $RMSE$ daje dobar prikaz raspršenosti podataka. Koeficijent korelacije opisuje koliko modelirani datumi prate stvarne datume te može na jednostavan način dati informaciju koje je datume metoda teže procijenila (minimalne ili maksimalne). Veličine R_{cv} i $RMSE$ opisane su pripadnim jednadžbama (3.9) i (3.10):

$$R_{cv} = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}}, \quad (3.9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n}}, \quad (3.10)$$

gdje je P_i modelirani datum nastupa fenološke faze, O_i stvarni datum nastupa fenološke faze, a n je broj opažanja. Osim R_{cv} i $RMSE$ računat je i indeks slaganja (*eng. Index of agreement, IOA*; Willmott i sur. (2012.)) prikazan u jednadžbi (3.11).

$$IOA = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \right]. \quad (3.11)$$

3.3.2 Vjerojatnost nastupa i vjerojatnost krive detekcije

Najlakši način za evaluaciju metode je jednostavna da/ne kategorizacija temeljena na tablici kontigencije. Ovaj pristup je uobičajen za analizu vremenskih prognoza, a i drugdje u meteorologiji. Postoje dva ishoda prognoze (u našem slučaju mraz je predviđen metodom ili nije) i dva ishoda promatranja (mraz je uočen ili nije). Na taj način se vjerojatnost detekcije (eng. *Probability of detection, POD*, jednadžba (3.12)) definira kao omjer pogodaka i ukupnog broja pojavljivanja (pogodaka i promašaja). Vjerojatnost lažne detekcije (eng. *Probability of false detection, POFD*, jednadžba (3.13)) definirana je kao omjer krive predikcije (eng. *False alarm*) i ukupnog broja bez prognoze (kriva predikcija i točna prognoza negativnog ishoda).

$$POD = \frac{\text{Pogodci}}{\text{Pogodci} + \text{Promašaji}}, \quad (3.12)$$

$$POFD = \frac{\text{Krivapredikcija}}{\text{Krivapredikcija} + \text{č nanegativnaprognoza}} \quad (3.13)$$

3.3.3 Teorija detekcije signala

Teorija detekcije signala (eng. *Signal detection theory, SDT*) metoda je procjene koja se koristi za odvajanje točnosti prognoze od kriterija odluke. U meteorologiju ga je uveo Mason (1982.), koristi se u prognozi različitih vremenskih varijabli i događaja kao što su mraz (Knollhoff i sur., 2003.), tornado (Brooks, 2004.) ili oborina (Buizza i sur., 1999.). Da bismo primijenili teoriju detekcije signala na skup podataka gdje su podražaji signala bili prisutni ili odsutni, a promatrač je kategorizirao svaki pokušaj kao da je podražaj prisutan ili odsutan, opažanja su razvrstana u jednu od četiri kategorije: pogodak, promašaj, točno odbacivanje i lažni alarm. Na taj se način mogu izračunati indeksi uspješnosti metode s obzirom na opažanja.

Indeks točnosti (d) definiran je kao broj standardnih devijacija koje razdvajaju srednje vrijednosti dviju Gaussovih distribucija kriterija odluke koji prethode pojavljivanju i nepojavljivanju (Swets, 1973., 1988.; Green i Swets, 1974.). Ako su POD i $POFD$ jednaki, metoda nema vještine, a $d = 0$. Pristranost (β) odražava pristranost metode za pretjerano prognoziranje događaja mraza (što rezultira većom stopom pogodaka i većim lažnim alarmom, a β se približava 0) ili ih premalo prognozira (što rezultira niskim brojem lažnih uzbuna, ali i niskom stopom pogodaka, povećanjem β iznad 1, prema beskonačnosti). Nepristrana metoda imala bi β

vrijednost 1. Metoda SDT je provedena u programski jezik R (<https://www.r-project.org/>) sa psiho paketom (Makowski, 2018.).

3.3.4 Primjena Bayesove statistike

Budući da je od svih fenoloških faza najteže prognozirati berbu (jer ona ne predstavlja tipičnu fenološku fazu i može biti pod velikim utjecajem samih proizvođača), potreban nam je statistički alat koji će pomoći u procjeni promjena u datumu berbe pomoću parametara koje možemo predvidjeti. Bayesova statistika predstavlja jednostavan način procjene nastupa berbe, a već je korištena za neka druga fenološka istraživanja (npr., za jorgovan Hudson i Keatley, 2010.). Neka su istraživanja utvrdila povezanost između GST-a i datuma berbe (npr. Bock i sur., 2013.; Tomasi i sur., 2011.). Bayesov teorem bi mogao osigurati vjerojatnost $P(B)$ kasne ili rane berbe određivanjem uvjetne vjerojatnosti berbe ovisno o temperaturi zraka u sezoni vegetacije ,

$$P(B) = \frac{P(B_m \vee T_m)P(T)}{P(T_m \vee B_m)}, \quad (3.14)$$

Uvjetna vjerojatnost promatranog događaja B_m je vjerojatnost da će se događaj dogoditi, uzimajući u obzir činjenicu da se događaj T_m već dogodio,

$$P(B_m \vee T_m) = \frac{P(B_m \cap T_m)}{P(T_m)}, \quad (3.15)$$

$$P(T_m \vee B_m) = \frac{P(B_m \cap T_m)}{P(B_m)}, \quad (3.16)$$

Ovdje je T_m događaj vezan uz meteorologiju (srednja temperatura zraka u sezoni vegetacije iznad ili ispod nekog praga), a B_m predstavlja promatrani datum berbe. $P(T)$ je vjerojatnost temperature iznad ili ispod praga. Uvjetna vjerojatnost primijenjena je na mjerenja (do 2018.) kako bi se utvrdio odnos između datuma berbe i srednje temperature zraka u sezoni vegetacije ($GSTr$).

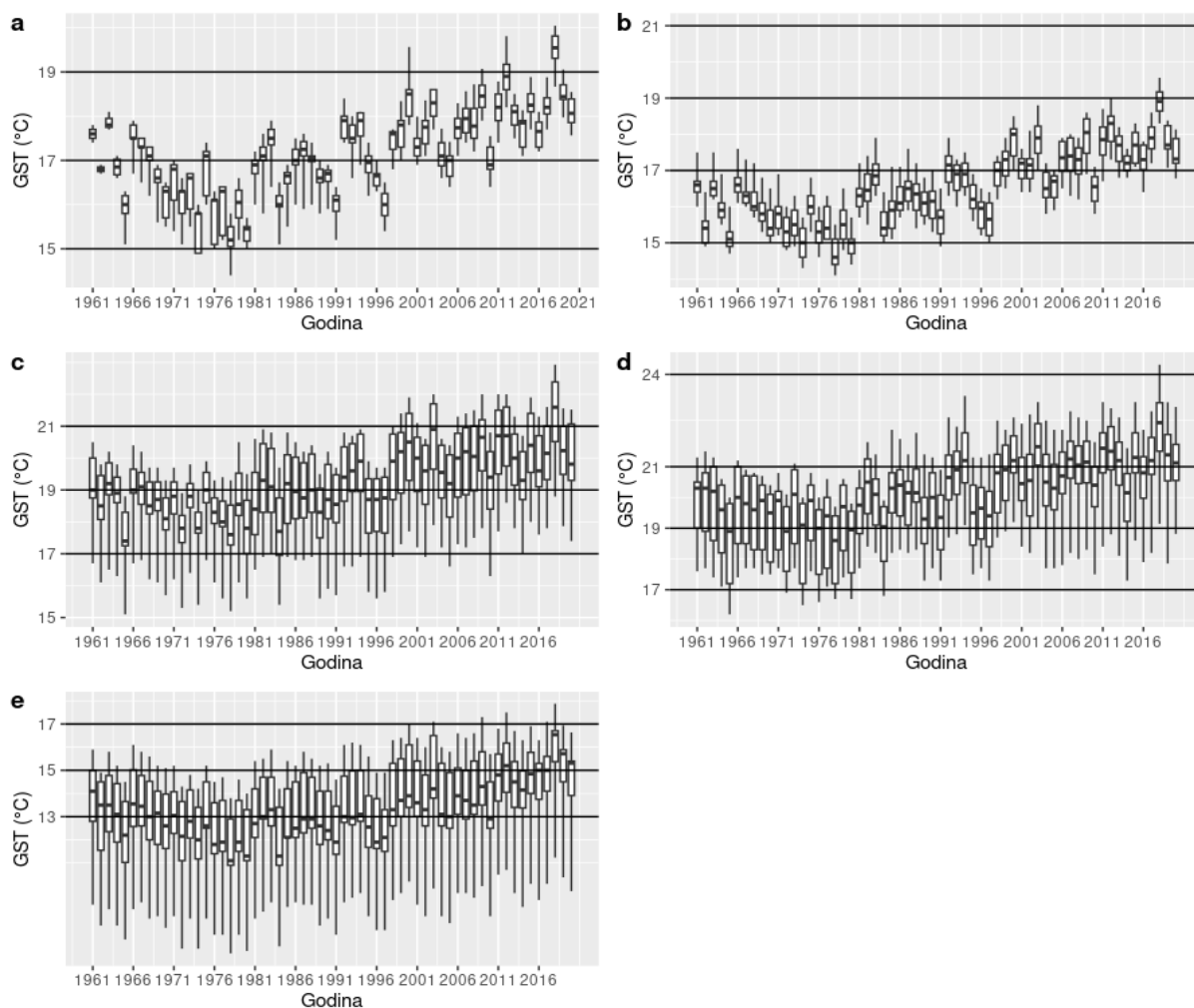
4 Rezultati

4.1 Analiza meteoroloških i fenoloških podataka u sadašnjim klimatskim uvjetima

4.1.1 Analiza bioklimatskih indeksa

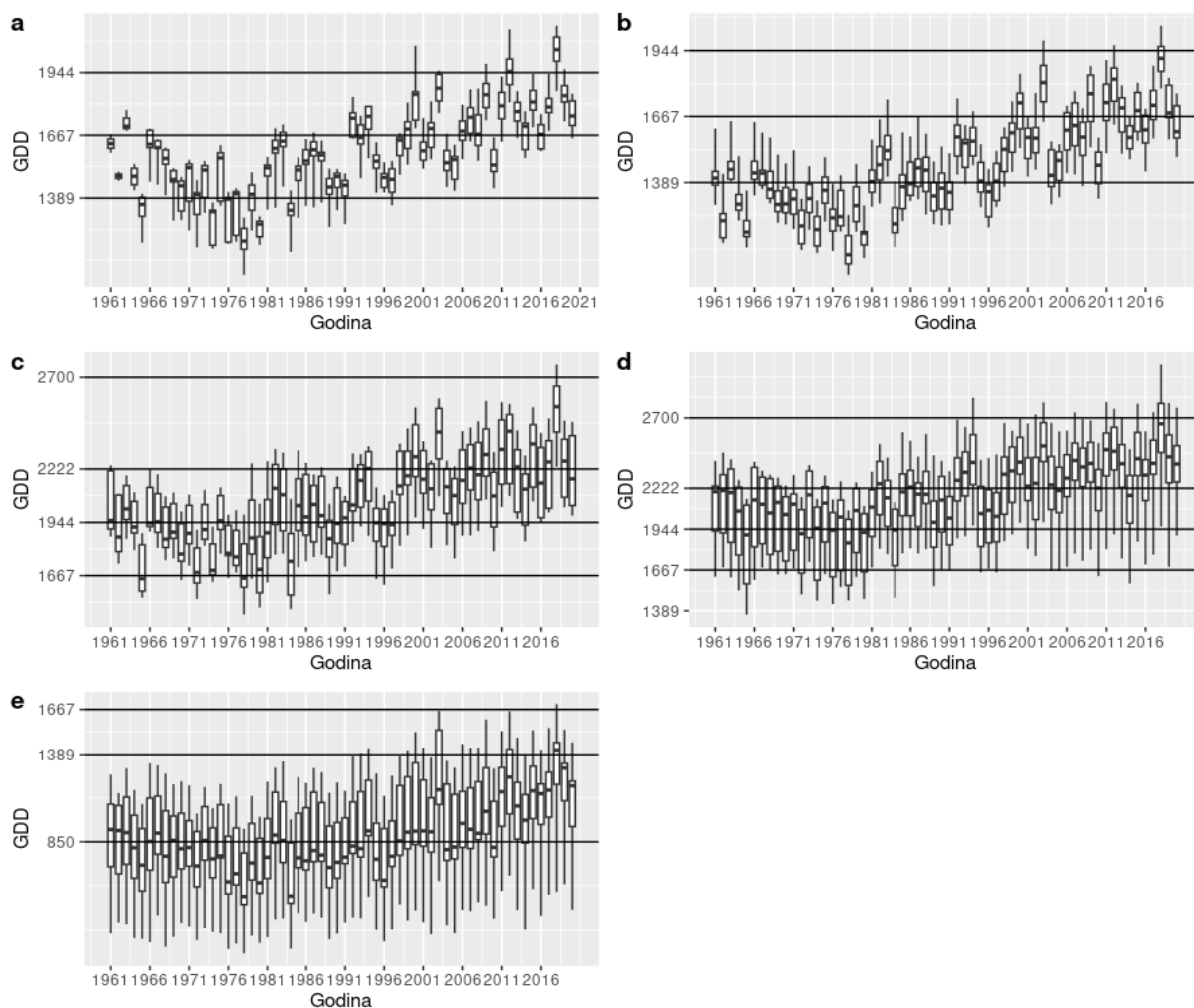
Pet bioklimatskih indeksa opisanih u poglavlju 3.1. izračunano je za postaje DHMZ-a i korišteno za detekciju klimatskih promjena i njihov utjecaj na uzgoj vinove loze. Višegodišnja varijabilnost indeksa prikazana je za četiri vinogradarske regije uz dodatak planinskog područja. U svim regijama, unatoč određenoj varijabilnosti iz godine u godinu, uočavaju se neke zajedničke osobine; primjetan je pad vrijednosti bioklimatskih indeksa (GDD, HI, GST) u razdoblju od sredine 1960-ih pa do kraja 1970-ih, te povećanje vrijednosti tih indeksa od 1980-ih pa do danas, koje je posebno izraženo od sredine 1990-ih.

Pad iznosa bioklimatskih indeksa temeljenih na temperaturnim podacima (GST, GDD, HI) u 60-im i 70-im godinama prošlog stoljeća izraženiji je na kontinentalnom području (Slike 4.1-4.3). Negativni trendove u tom razdoblju zabilježeni su i u drugim državama (npr. u Sloveniji (Vršič i sur., 2014.), Italiji (Fioravanti i sur., 2016.), Srbiji (Ruml i sur., 2022.)). Godina 1980. često se uzima kao prijelomna točka u vremenskom nizu kada trendovi temperature, a samim tim i u bioklimatskim indeksima, počinju rasti. Trend smanjenja temperature sredinom 20. stoljeća vjerojatno je bio posljedica široko rasprostranjenog smanjenja površinskog Sunčevog zračenja (globalnog zračenja solarne radijacije) između 1950-ih i 1980-ih (Wild, 2009.), što je utjecalo na promjenu globalne temperature (Broecker, 1975.). Broecker (1975.) je zaključio da je pad temperature sredinom prošlog stoljeća uzrokovan prirodnim klimatskim ciklusom koji je privremeno nadvladao doprinos zagrijavanja uslijed povećanja sadržaja CO₂ u atmosferi. Predvidio je da će učinak zagrijavanja atmosfere premašiti učinak hlađenja uzrokovan prirodnom varijabilnošću klime zbog daljnjeg eksponencijalnoga porasta koncentracije CO₂ prema kraju 20. stoljeća.



Slika 4.1 Kutijasti dijagrami GST (°C) za 80 meteoroloških postaja u razdoblju 1961.-2020. podijeljenih po vinogradarskim regijama u Hrvatskoj; (a) Slavonija i Hrvatsko Podunavlje (zona C I), (b) Središnja bregovita Hrvatska (zona B), (c) Hrvatska Istra i Kvarner (zona C II), (d) Dalmacija (zona C II i C III), (e) planinski dio Hrvatske. Linije kutijastih dijagrama označavaju medijane, gornji i donji dio okvira prikazuju 75. i 25. percentil. Horizontalne linije označavaju klase GST-a (vidi Tablicu 3.1).

Kao što je već spomenuto, većina predjela Hrvatske pogodna je za uzgoj vinove loze, a to se može potvrditi i promatranjem bioklimatskih indeksa. Najniže vrijednosti srednje temperature zraka u sezoni vegetacije (GST) zabilježene su u planinskom području (Slika 4.1e). Od početka 1980-ih GST je uglavnom između 13 °C i 15 °C te se ova regija može svrstati u klasu hladno (vidi Tablicu 3.1). Ostala dva pokazatelja potvrđuju mogućnost uzgoja nekih ranih sorti na ovom području. Od sredine 1990-ih, većina postaja u ovoj regiji imala je GDD veći od 850 °C jedinica (Slika 4.2e). Ove vrijednosti odgovaraju zoni I/zoni A (Tablica 3.1), a u posljednjih 10 godina sve veći broj postaja ima GDD veći od 1389 °C jedinica što odgovara zoni II/zoni B. Slično tome, možemo vidjeti da je gotovo svake godine od 1961. barem jedna postaja zabilježila vrijednost HI veću od 1500 °C jedinica (Slika 4.3e), što ukazuje na potencijal uzgoja vinove loze. Isto je tako vidljiv trend u kojem sve veći broj postaja prelazi 1800 °C jedinica (tj. prelaze u sljedeći razred – umjereno hladno Tablica 3.1).



Slika 4.2 Kutijasti dijagram GDD (°C jedinice) za 80 meteoroloških postaja u razdoblju 1961.-2020. podijeljenih po vinogradarskim regijama u Hrvatskoj; (a) Slavonija i Hrvatsko Podunavlje (zona C I), (b) Središnja bregovita Hrvatska (zona B), (c) Hrvatska Istra i Kvarner (zona C II), (d) Dalmacija (zona C II i C III), (e) planinski dio Hrvatske. Linije kutijastih dijagrama označavaju medijane, gornji i donji dio okvira prikazuju 75. i 25. percentil. Horizontalne linije označavaju klase GDD-a (vidi Tablicu 3.1).

Promatrajući sva tri bioklimatska indeksa, druge dvije kontinentalne regije (Slavonija i Hrvatsko Podunavlje (zona C I) i Središnja bregovita Hrvatska (zona B)) također su pokazale značajne pomake iz jednog temperaturnog režima u drugi u posljednjih 60 godina. U oba vinogradarska područja većini postaja pripadaju vrijednosti GST-a između 15 i 17 °C do početka 1990-ih. Od 1992. gotovo sve postaje u Slavoniji i Hrvatskom Podunavlju imaju GST veći od 17 °C (Slika 4.1a). Iznimka je razdoblje od 1995. do 1997. i 2010. kada je većina postaja imala GST ispod 17 °C. U 2018. je indeks GST-a na gotovo svim postajama u Slavoniji i Hrvatskom Podunavlju premašio 19 °C (na dvije postaje preko 20 °C). Prije toga bile su samo tri godine (2000., 2009., 2012.) s GST-om većim od 19 °C. Slična situacija uočena je za postaje u Središnjoj bregovitoj Hrvatskoj, Slika 4.1b. Temperature u sezoni rasta veće od 17 °C zabilježene su 10 puta na više od 50 % postaja tijekom posljednjih 13 godina, a pet puta u tom razdoblju GST je premašio 17 °C na svim postajama. Slični rezultati vidljivi su i za vrijednosti GDD-a (Slika 4.2).

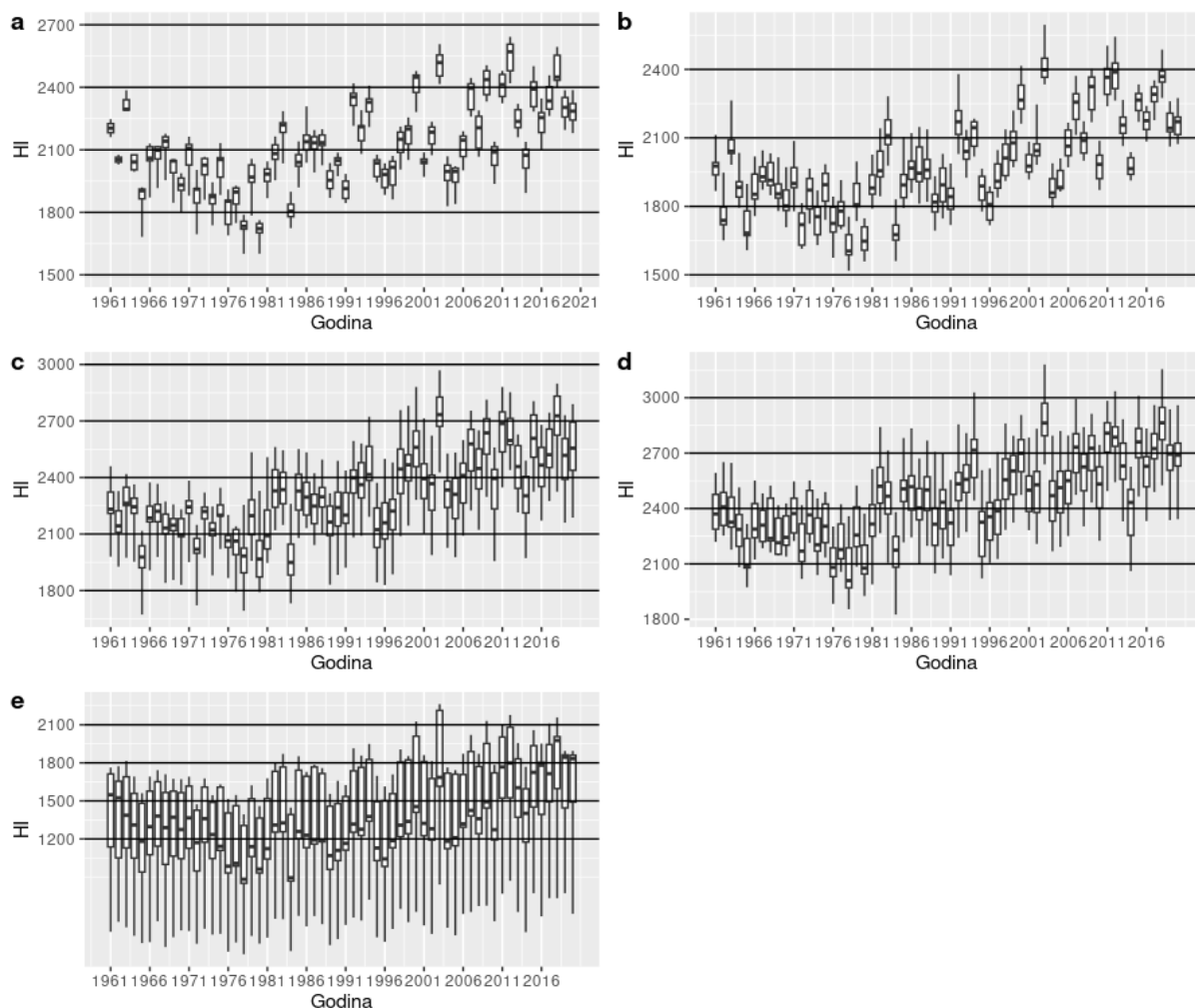
Regiji Slavonija i Hrvatsko Podunavlje od 1960. do 2000. odgovaraju vrijednosti koje se odnose na zonu II/zonu B (Tablica 3.1, Slika 4.2a). Od 2000. godine vidljiv je prijelaz u topliju klasu, a većina postaja u 2012. i 2018. ima vrijednosti GDD-a tipične za zonu III (zonu C I). Još veći skok vidljiv je u Središnjoj bregovitoj Hrvatskoj (Slika 4.2b), gdje su neke od postaja u 40 godina promijenile tri zone (iz zone I u zonu III, odnosno od zone A do zone C I). Prijelaz u toplije razrede vidljiv je i za indeks HI (Slika 4.3). Ovdje su neke postaje u dvije kontinentalne regije promijenile tri razreda u zadnjih 30 godina. U 2003., 2012. i 2018. sve postaje u Slavoniji i Hrvatskom Podunavlju imale su indeks HI tipičan za klasu vruće (2400-2700 °C jedinica). U Središnjoj bregovitoj Hrvatskoj tijekom posljednjih 15 godina, 11 puta je na većini postaja premašena vrijednost od 2100 °C jedinica.

Prijelaz iz jednog razreda u drugi tijekom promatranog razdoblja vidljiv je i u obalnim regijama (Hrvatska Istra i Kvarner te Dalmacija). U prvih 30 godina smanjenje GST-a nije toliko zamjetno u ove dvije regije (Slike 4.1c, d) te se one uglavnom nalaze unutar granica jedne klase po definiciji GST-a (toplo za Hrvatsku Istru i Kvarner te vruće za Dalmaciju; Slike 4.2c, d). Od 1999. svake godine u Hrvatskoj Istri i Kvarneru većina postaja ima vrijednosti GST-a veće od 19 °C, a ponekad i veće od 21 °C. U Dalmaciji su u zadnjih 10 godina učestale vrijednosti GST-a veće od 21 °C.

Za vrijednosti GDD-a u regiji Dalmacija (Slika 4.2d), treba napomenuti da se 1994. prvi put dogodilo da je neka postaja zabilježila vrijednost GDD-a iznad 2700 °C jedinica, što je klasificirano kao ekstremno vruće (Tablica 3.1). U idućih devet godina barem na jednoj postaji vrijednost GDD-a prelaze navedenu granicu, a 2018. na postaji Govedari na Mljetu prelazi 3000 °C jedinica (ljubičasti trokut na Slici 2.1).

Značajne promjene vidljive su i za indeks HI. Osam puta tijekom posljednjih 10 godina, barem jedna postaja u Dalmaciji imala je vrijednosti HI > 2700 °C, što se opisuje razredom ekstremno vruće (Tablica 3.1). Uzimajući u obzir veliku pozitivnu korelaciju između vrijednosti HI-a i nastupa fenoloških faza šare i berbe (Jones i sur., 2005.), ovaj rezultat ukazuje na još kraću vegetacijsku sezonu i na kontinentu i na obali. Takve promjene u regijama zabilježene su u brojnim studijama diljem Europe posljednjih godina. Koufos i sur. (2018.) pokazali su da je trend porasta GST-a za sadašnje klimatske uvjete (1981.-2010.) u Grčkoj na 16 od 19 postaja bio značajan, u rasponu od 0,02 do 0,07 °C/god. Nadalje, trend porasta za vrijednosti GDD bio je od 28 do 140 °C jedinica/10 godina, a za HI od 7 do 123 °C jedinica/10 godina. Vršič i sur. (2014.) dobili su vrijednosti HI-a u tri regije u Sloveniji koje su bile veće od 169 do 199 °C jedinica tijekom 1980.-2009. u usporedbi s razdobljem 1950.-1979. U sjeveroistočnoj Španjolskoj (Ramos i sur., 2008.), vidljiv je pozitivan trend i HI-a i GDD-a za ta područja. Promjene su bile

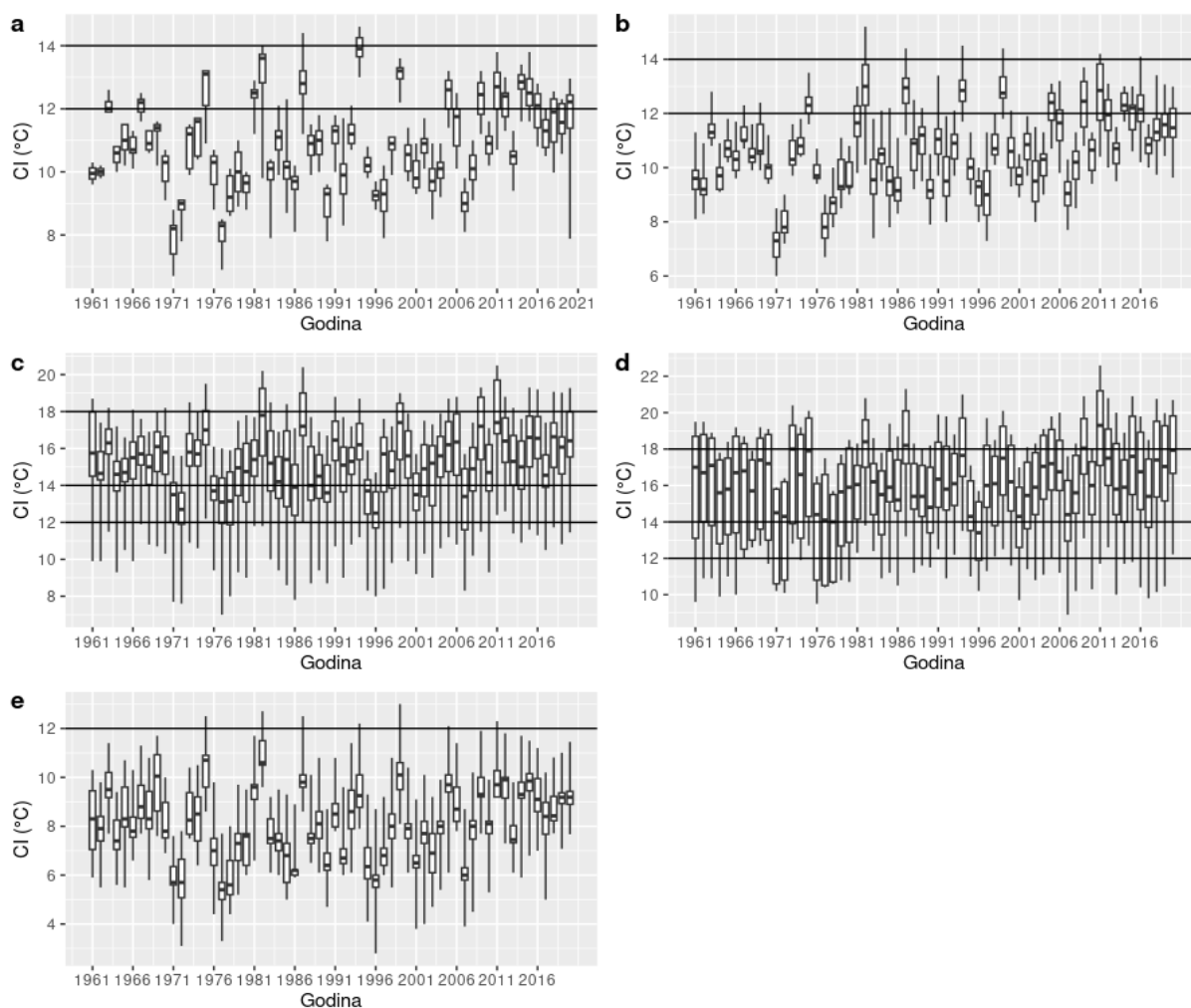
veće za HI jer daje veću težinu maksimalnoj temperaturi. Istraživanja na našem području pokazuju porast indeksa, u zadnjih desetak godina (Karoglan i sur., 2018.; Prša i sur., 2022.), i to osobito za Dalmaciju. Time se ukazalo na važnost usklađivanja postojeće administrativne vinogradarske podjele na zone s novonastalom klimatskom situacijom (Prša, 2022.).



Slika 4.3 Kutijasti dijagrami za indeks HI (°C jedinice) izračunat za 80 meteoroloških postaja u razdoblju 1961.-2020. podijeljenih po vinogradarskim regijama u Hrvatskoj; (a) Slavonija i Hrvatsko Podunavlje (zona C I), (b) Središnja bregovita Hrvatska (zona B), (c) Hrvatska Istra i Kvarner (zona C II), (d) Dalmacija (zona C II i C III), (e) planinski dio Hrvatske. Linije kutijastih dijagrama označavaju medijane, gornji i donji dio okvira prikazuju 75. i 25. percentil. Horizontalne linije označavaju klase HI (vidi Tablicu 3.1).

Za razliku od ova tri bioklimatska indeksa, Indeks hladnih noći (CI) nije pokazao značajniji porast ili velike promjene u zadnjih nekoliko godina. Ono što je vidljivo jest da Središnja bregovita Hrvatska te Slavonija i Hrvatsko Podunavlje pripadaju područjima s hladnim noćima (Slike 4.4a, b). Za Hrvatsku Istru i Primorje u većini promatranih godina i za većinu postaja su izračunane vrijednosti (na temelju rujanskih T_{min}) u razredu umjereno toplih noći (Slika 4.4c). Dalmacija pripada području s vrućim noćima (Slika 4.4d). Ipak, zbog značajnog pomicanja berbe prema početku rujna, a za neke sorte i u kolovoz (više o tome u poglavlju 4.3),

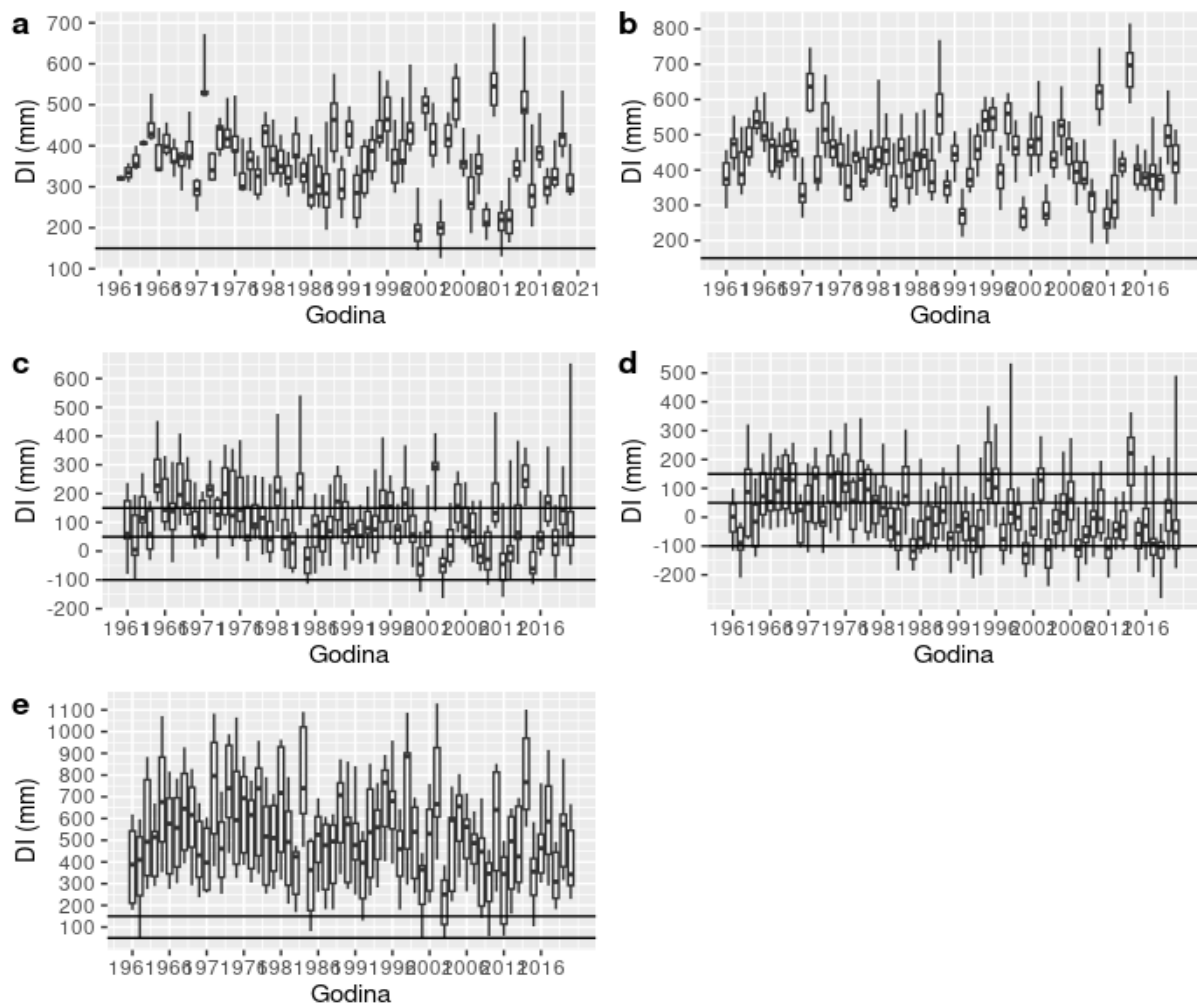
preispituje se upotreba/važnost ovog indeksa kao indikatora u sadašnjim i budućim klimatskim uvjetima. CI definiran jednadžbom (3.4) daje mjeru zrelosti bobica nakon provedene berbe te bi njegova modifikacija svakako bila od koristi.



Slika 4.4 a) Kutijasti dijagrami za CI (°C) izračunatog za 80 meteoroloških postaja u razdoblju 1961.-2020. podijeljenih po vinogradarskim regijama u Hrvatskoj; (a) Slavonija i Hrvatsko Podunavlje (zona C I), (b) Središnja bregovita Hrvatska (zona B), (c) Hrvatska Istra i Kvarner (zona C II), (d) Dalmacija (zona C II i C III), (e) planinski dio Hrvatske. Linije kutijastih dijagrama označavaju medijane, gornji i donji dio okvira prikazuju 75. i 25. percentil. Horizontalne linije označavaju klase CI (vidi Tablicu 3.1).

DI je jedini ovdje korišteni indeks koji osim temperature zraka koristi i oborinu, a u promatranom razdoblju ne pokazuje prelaske iz jednog razreda u drugi za dvije kontinentalne regije. Vrijednosti indeksa u obje regije pokazuju da postoji dovoljna količina vode za uspješan uzgoj vinove loze (Slike 4.5a, b). Situacija je nešto drukčija u obalnim regijama. Od početka 80-ih godina prošlog stoljeća, Dalmacija uglavnom ima vrijednosti koje ju svrstavaju u razred umjereno suho. Ipak treba naglasiti da u određenim godinama neke postaje u ovom području imaju vrijednosti koje odgovaraju klasi vrlo suho (2018. godine više od polovice postaja imalo je vrijednosti karakteristične za razred vrlo suho, Slika 4.5d). Regija Hrvatska Istra i Primorje imaju

vrijednosti DI koje su između dva razreda: umjereno vlažno i umjereno suho (Slika 4.5c). Uvjeti sušnog razdoblja sve su češći od sredine 90-ih, kad je u devet godina većina postaja imala obilježja razreda umjereno suho. Ovo još ne ukazuje na veliku potrebu za navodnjavanjem u ovoj regiji, ali svakako ukazuje na potrebu posebnog promatranja klime u budućnosti kako bi se na vrijeme moglo krenuti s prilagodbom na godine s mogućom izraženijom sušom nego što su bile u prošlosti.



Slika 4.5 Kutijasti dijagrami indeksa DI (mm) za 80 meteoroloških postaja u razdoblju 1961.-2020. podijeljenih po vinogradarskim regijama u Hrvatskoj; (a) Slavonija i Hrvatsko Podunavlje (zona C I), (b) Središnja bregovita Hrvatska (zona B), (c) Hrvatska Istra i Kvarner (zona C II), (d) Dalmacija (zona C II i C III), (e) planinski dio Hrvatske. Linije kutijastih dijagrama označavaju medijane, gornji i donji dio okvira prikazuju 75. i 25. percentil. Horizontalne linije označavaju klase DI (vidi Tablicu 3.1).

4.1.2 Analiza meteoroloških parametara u vegetacijskoj sezoni

Dosadašnja vinogradarska praksa uglavnom je pretpostavljala da vegetacija vinove loze počinje u travnju, a završava u listopadu. Nedavne promjene temperature zraka uzrokovale su raniju

berbu, tako da je berba u listopadu sve rjeđa. Osim toga, pupanje se sve češće događa u ožujku umjesto u travnju. Zbog ovog ranijeg početka izbijanja pupova ova je studija analizirala trendove temperatura zraka (T_{min} , T_{max} i T_{sr}) tijekom vegetacijske sezone (travanj-listopad; AO) tijekom posljednjih 30 godina, kao i temperature u pomaknutom razdoblju rasta (ožujak-rujan; MS). Za statističku analizu odabrane su meteorološke postaje najbliže odabranim vinogradima (Tablice 2.1 i 2.2), a svaka meteorološka postaja nosi oznaku vinarije na koju se odnosi.

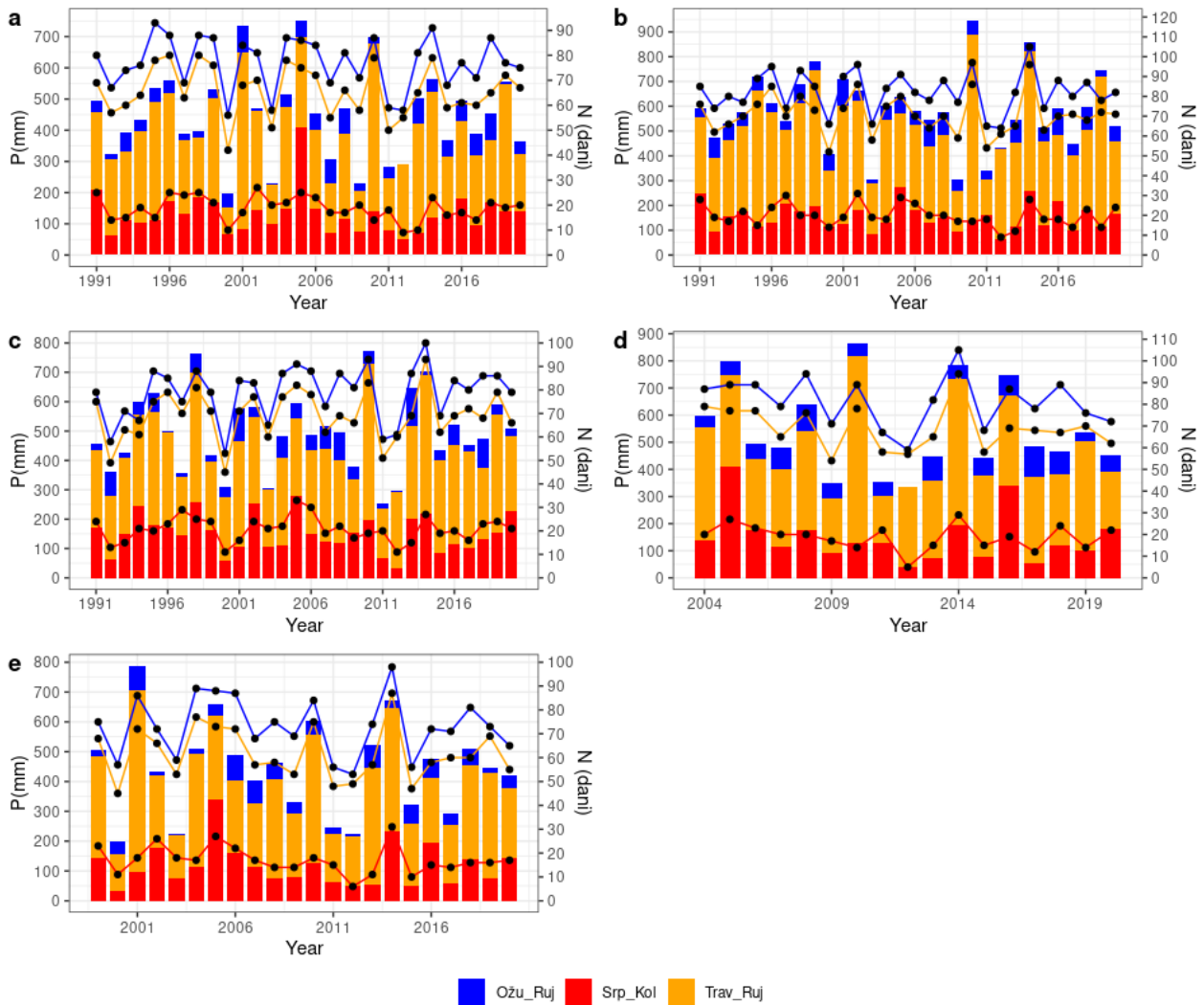
Tablica 4.1 Trendovi temperature zraka ($^{\circ}\text{C}/10$ godina) na odabranim postajama u vegetacijskom razdoblju (travanj-listopad, AO) i pomaknutom vegetacijskom razdoblju (ožujak-rujan, MS). Podebljani su značajni trendovi na razini značajnosti $p < 0,05$ (izračunato pomoću Studentovog t-testa).

POSTAJA	RAZDOBLJE	T_{min}		T_{sr}		T_{max}	
		travanj- listopad	ožujak- rujan	travanj- listopad	ožujak- rujan	travanj- listopad	ožujak- rujan
KUTJEVO_V1	2003.–2020.	0,9	0,7	0,8	0,6	0,8	0,5
DARUVAR_V2	1991.–2020.	0,1	0,1	0,3	0,3	0,7	0,7
KRIŽEVCI_V6	1991.–2020.	0,9	0,9	0,7	0,7	0,7	0,6
OSIJEK_V5	1991.–2020.	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,6
ILOK_V3	1999.–2020.	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,4
ZADAR_V9	1991.–2020.	0,6	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5
POREČ_V7	1991.–2020.	0,5	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6
HVAR_V11	1991.–2020.	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7
LASTOVO_V12	1991.–2020.	0,4	0,4	0,4	0,5	0,4	0,5
KORČULA_V10	1991.–2020.	0,5	0,5	0,3	0,4	0,5	0,5

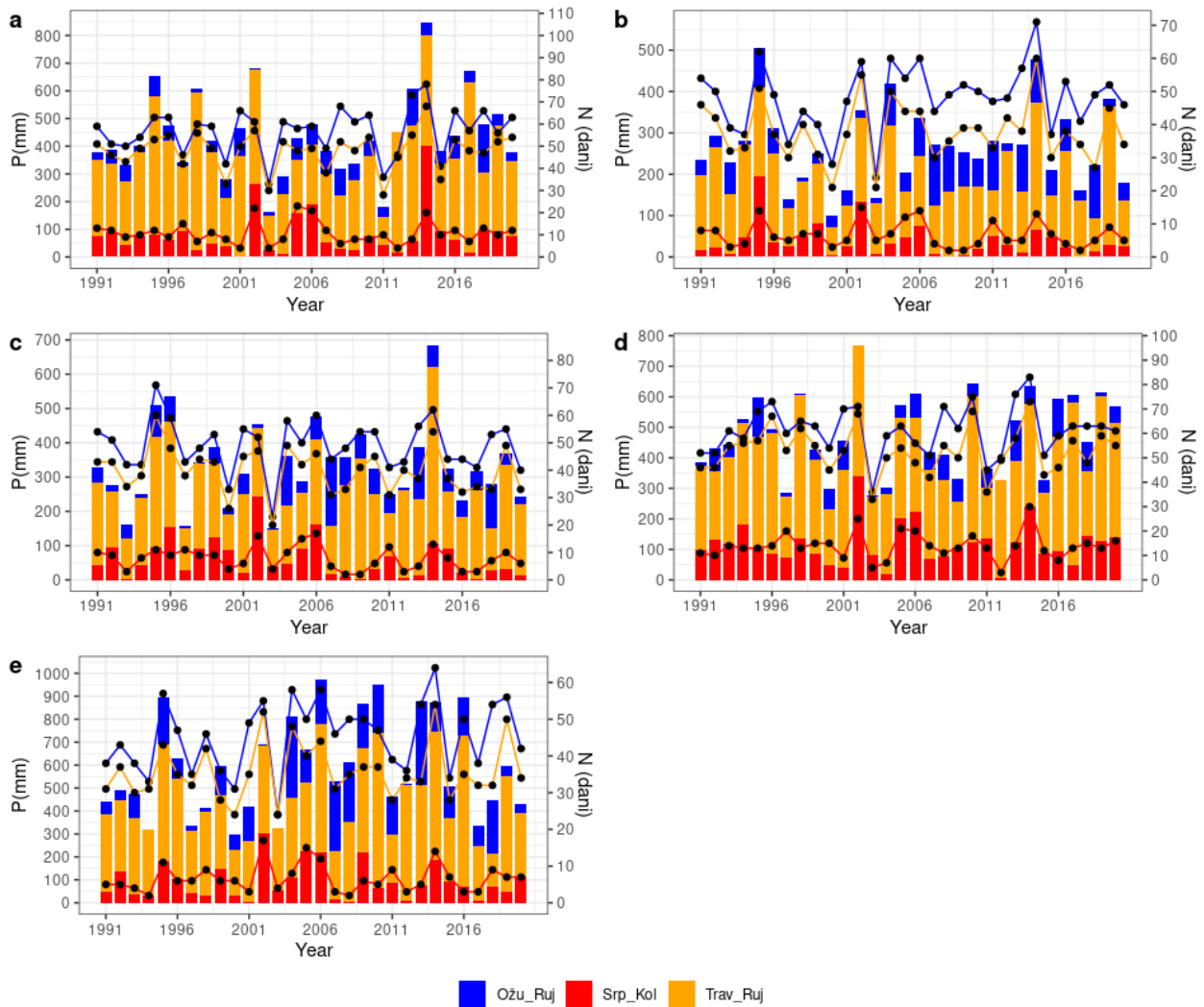
Svi trendovi temperature zraka bili su vrlo slični neovisno o odabranom razdoblju vegetacije. U unutrašnjosti su trendovi bili najizraženiji za T_{min} u Križevcima_V6 (0,9 $^{\circ}\text{C}/10$ godina) za oba promatrana razdoblja (AO i MS). Isti trend T_{min} primijećen je u Kutjevu_V1 u vegetacijskoj sezoni, ali je manji u pomaknutoj (MS) vegetacijskoj sezoni (0,7 $^{\circ}\text{C}/10$ godina). Prema istoku Hrvatske trendovi T_{min} bili su znatno manje izraženi, posebno u Daruvaru_V2 i Iloku_V3, gdje nisu značajni bez obzira na razdoblje (0,1 $^{\circ}\text{C}/10$ godina). Za postaju smještenu u središnjem dijelu Hrvatske (Križevci_V6) trend je bio veći za T_{min} , dok je na istoku zemlje (Daruvar_V2, Osijek_V5 i Ilok_V3) trend bio viši za T_{sr} i T_{max} (Tablica 4.1). Trendovi

temperatura zraka (T_{min} , T_{max} i T_{sr}) bili su ujednačeniji za obalne postaje s vrijednostima u rasponu od 0,4 do 0,7 °C/10 godina. Trendovi T_{min} i T_{sr} bili su najveći za postaje Zadar_V9 i Poreč_V7. Za T_{min} i T_{max} , trendovi su nešto više naglašeni za pomaknuto MS razdoblje, što znači da temperatura zraka u ožujku više povećava trendove od one u listopadu. To pridonosi promjeni same vegetacije.

Ovaj rezultat je u potpunosti u skladu s rezultatima drugih studija. Ruml i sur. (2022.) pokazali su da su u Srbiji tijekom razdoblja 1981. – 2010. T_{sr} , T_{max} i T_{min} pokazale slične veličine porasta, s nacionalnim prosjekom od 0,52, 0,55 i 0,49 °C po desetljeću. Trendovi su bili značajni na većini postaja. Spinoni i sur. (2015.) pokazali su da se trendovi dnevnih temperatura zraka u širem području Karpata (uključujući i panonski dio Hrvatske) u razdoblju 1981.-2010. za ljetno i proljetno kreću od 0,33 do 0,86 °C/10 godina. Ovaj trend bio je izraženiji tijekom ljetnog razdoblja u odnosu na proljeće te za T_{max} u odnosu na T_{sr} i T_{min} .



Slika 4.6 Histogram ukupne oborine (mm) i broja dana s oborinom > 0 mm (puna linija) u razdobljima ožujak – rujan, travanj – rujan i srpanj – kolovoz za a) Osijek_V5, b) Daruvar_V3, c) Križevce_V6, d) Ilok_V2, 5) Kutjevo_V1.



Slika 4.7 Histogram ukupne oborine (mm) i broja dana s oborinom > 0 mm (puna linija) u razdobljima ožujak – rujan, travanj – rujan i srpanj – kolovoz za a) Zadar_V9, b) Lastovo_V12, c) Hvar_V11, d) Poreč_V7, 5) Korčula_V10.

Dok temperatura zraka jasno pokazuje postojanje trenda, sličan trend nije vidljiv u slučaju ukupne količine oborine i broja dana s oborinom > 0 mm u vegetacijskom razdoblju (Slika 4.6). Bonacci i sur. (2021.) analizirali su i dobili da postoji značajan trend pada broja dana s oborinom većom od 0 mm godišnje (2-4 dana/10 godina) za četiri postaje u Hrvatskoj (Split, Zagreb, Hvar, Lastovo) od 1961. do 2020. godine. Međutim, nisu pronašli značajan trend ukupne količine oborine. Gledajući samo vegetacijsku sezonu, za postaje smještene na otocima (tj. Hvar_V11, Lastovo_V12, Korčula_V10), značajan dio sezonske oborine padne u ožujku (Slika 4.7). Ljetna količina oborine na većini obalnih postaja uglavnom je manja od 100 mm, što je često nedovoljno za optimalan rast i razvoj vinove loze, a tijekom ljetnih mjeseci ima manje od 10 dana oborine. Iako često sušne, postoje godine poput 2002. i 2014. kada je tijekom ljetnih mjeseci pala značajna količina oborine. Ipak, na obalnim postajama prevladava relativno mali broj dana s oborinom, kao i općenito mala količina oborine u ljetnim mjesecima. Manjak oborine

i visoke temperature stvaraju na ovim postajama okruženje u kojem zahtjevi biljaka za vodom uvelike premašuju njihovu raspoloživost.

Oborine su ujednačenije na kontinentalnim postajama (Slika 4.6), gdje često padne više od 100 mm oborine tijekom ljeta, a više od 400 mm u vegetacijskoj sezoni. No, u posljednjih 20 godina primjećuje se da češće padne manje od 300 mm oborine. Osim toga, u ožujku ima manje oborina pa vegetacija kreće nakon sušnog razdoblja. Rezultati se podudaraju s onima za Sloveniju gdje su De Luis i sur. (2014.) pokazali da postoji negativan trend zimskih oborina od 1951. do 2012., ali za većinu dijelova zemlje nije bilo vidljivog trenda za ljeto i proljeće.

4.1.3 Analiza fenoloških faza

Promatramo li vrijeme pojave svih fenoloških faza općenito, možemo ustvrditi da se uglavnom javljaju sve ranije (Tablica 4.2). Iako su sami trendovi rijetko značajni (razlog može biti i relativno mali broj podataka/godina te nemeteorološki utjecaj), vidljivo je da su oni najznačajniji za berbu i pupanje. Najdominantniji trend za pupanje zabilježen je u Erdutu_V4 za 'Graševinu' (-1.5 dana/godina što znači -15 dana/10 godina), ali treba uzeti u obzir kratki niz opažanja od samo 4 godine. Za 'Graševinu' trend je također negativan i u Kutjevu_V1 i Križevcima_V6 i nešto manji od -1 dan/god. Jedina postaja na kojoj se trend za 'Graševinu' ne primjećuje je Daruvar_V2. Za 'Chardonnay' su ti trendovi slični, čak na nekim lokacijama izraženiji u odnosu na 'Graševinu'. Na jedinoj obalnoj postaji gdje su dostupni podatci za 'Chardonnay' (Poreč_V7), trend je najizraženiji (-1,1 dan/god). Treba naglasiti da se kod 'Chardonnaya' pupanje uglavnom javlja nekoliko dana ranije nego kod ostalih sorti. Značajniji negativni trend za 'Chardonnay' usporediv je s trendovima 'Graševine' zabilježenima u Srbiji (Ruml i sur., 2012.). Slični su rezultati kod pupanja dobiveni i za crne sorte. Za 'Merlot', jedna postaja (Poreč_V7) ima pozitivan trend, a druga postaja (Zadar_V9) negativan. Za 'Plavac mali' vremenski niz podataka je najduži, a na obje obalne postaje u Dalmaciji, Hvaru i Lastovu, trend je negativan, ipak, na Hvaru je izraženiji i jedini značajan (-0,39 dana/god). Sve ovo ukazuje da je jedno od dominantnih obilježja raniji početak pupanja na gotovo svim postajama, neovisno o sorti. Raniji početak pupanja u ožujku u kontinentalnim regijama povećava rizik od oštećenja vinove loze uzrokovanih kasnim proljetnim mrazom. Temperature u kontinentalnoj Hrvatskoj u ožujku često padaju ispod nule, a posebno su ugrožena područja središnje Hrvatske. Nadalje, Jelić i sur. (2020.) ukazali su na preraspodjelu aktivnosti tuče iz ljetnih mjeseci u proljetno razdoblje na sjeveroistočnom Jadranu, osobito iznad Istre, što može dovesti do oštećenja ili uništenja tek izraslih mladica vinove loze.

Tablica 4.2 Trendovi početka fenoloških faza za vinovu lozu (DOY/godina). Podebljani su značajni trendovi na razini značajnosti $p < 0,05$ (izračunato pomoću Studentovog t-testa).

SORTA	LOKACIJA	PUPANJE	CVATNJA	ŠARA	BERBA	PUPANJE —BERBA	ŠARA— BERBA
	KUTJEVO_V1	-0,21	-0,44	0,036	-1,40	-1,19	-1,4
	KRIŽEVCI_V6	-0,55	-0,04	-0,627	-1,14	-0,23	-0,106
'Graševina'	DARUVAR_V2	0,01	0,03	-0,594	-0,94	-1,11	0,163
	ERDUT_V4	-1,50	2,40	3,500	1,40	5	-2,100
	ILOK_V3				-0,96		
	KUTJEVO_V1	-0,69	-0,14	-0,418	-0,55	0,14	-0,136
	POREČ_V7	-1,11	-0,29	-0,390	0,23	1,34	0,621
	DARUVAR_V2	-0,06	0,12	-0,491	-1,36	-1,6	-0,651
'Chardonnay'	ILOK_V3	0,22	0,16	-0,126	-0,45	-0,82	-0,613
	ERDUT_V4	-0,80	0,90	4,5	3,80	4,6	-0,700
	BELJE_V5				-0,90		
	POREČ_V7	-0,86	-0,09	-0,27	0,61	1,47	0,88
	KORLAT_V9	-0,16	-0,01	-0,08	-0,28	-0,12	-0,2
	AGROLAGUNA_V8				-0,25		
'Merlot'	KORČULA_V10				-0,07		
	BELJE_V5				-2,29		
	KUTJEVO_V1				-1,29		
	HVAR_V11	-0,39	-0,23	0,23	-0,13	0,26	-0,36
'Plavac mali'	LASTOVO_V12	-0,06	-0,09	-0,22	-0,20	-0,13	0,03
	KORČULA_V10				-0,54		

Kod cvatnje su trendovi promjenjivi i mijenjaju se od negativnih do pozitivnih od postaje do postaje i različito za (osobito bijele) sorte. Ipak, trendovi su negativni za većinu postaja (8 od 13), ali nikada nisu veći od $-0,5$ dana/godina (ili -5 dana/10 godina, Tablica 4.2). Negativniji trend u usporedbi s pupanjem zabilježen je samo u Kutjevu_V1 za 'Graševinu'. Također, za 'Chardonnay' u Iloku_V3 trend cvatnje je manje izražen nego kod pupanja, ali su oba trenda

pozitivna. Stoga su, u slučajevima kada postoji negativan trend u pupanju i pozitivan trend u cvatnji (npr. bijeli kultivari u kontinentalnom dijelu), dobiveni rezultati u suprotnosti sa studijama u susjednim zemljama gdje je razdoblje između pupanja i cvatnje skraćeno (npr. Kovács i sur., 2018.; Ruml i sur., 2016.).

Trendovi šare negativni su na većini postaja (osim Erdut_V4 za 'Graševinu' i 'Chardonnay', Kutjevo_V1 za 'Graševinu' i Hvar_V11 za 'Plavac mali'). Trend je nešto veći za bijele sorte, posebno za 'Graševinu' (~ -0,6 dana/godina na dvije postaje, Tablica 4.2).

Berba bijelih sorata pokazala je uglavnom negativan trend (Tablica 4.2), što znači raniji početak berbe. Kod bijelih sorti trendovi su izraženiji kod 'Graševine' nego kod sorte 'Chardonnay'. Trendovi za 'Graševinu' su uglavnom do -1,4 dana godišnje (ili do ~ -14 dana/10 godina). Iznimke su postaje Poreč_V7 i Erdut_V4. Razlozi na postaji Erdut_V4 mogli bi biti zbog kratkog razdoblja motrenja (samo 4 godine opažanja), a u Poreču_V7 zbog virusnih bolesti koje su se u vinogradu pojavile posljednjih godina.

Trendovi za crne sorte značajno su izraženiji za 'Merlot' na kontinentalnim postajama (-2,29 dana/godina u Belju_V5 i -1,29 dana/godina u Kutjevu_V1, Tablica 4.2). Berba sorte 'Merlot' sve se više pomiče prema početku rujna i na postajama bliže moru. Ovi rezultati pokazuju da je povećanje temperature pomoglo kasnim sortama da brže dozriju u uvjetima kontinentalne Hrvatske i smanjilo mogućnost oštećenja plodova ranim jesenskim mrazom ili niskim temperaturama tijekom kasnog rujna i listopada. Trend je najmanje izražen za postaju Korčula_V10. Moguće je da je ovakav slabiji odziv posljedica visokih ljetnih temperatura, koje često prelaze temperaturu od 30 °C, što dovodi do usporavanja fizioloških procesa vinove loze. Pomicanje berbe na ranije datume znači da se ključno razdoblje sazrijevanja događa u kolovozu umjesto u rujnu. Ovi pomaci u berbi ukazuju na skraćivanje vegetacijskog razdoblja (od pupanja do berbe) na većini postaja i sorti (Tablica 4.2). Skraćivanje je najizraženije kod 'Graševine' (do 2,1 dan/godina ili 21 dan/10 godina), ali je uočeno i kod drugih sorti. Skraćivanje trajanja između dva fenološka stadija utvrđeno je u mnogim studijama diljem Europe. U Njemačkoj, u području Frankonija, Bock i sur. (2011.) uočili su sličan negativan trend u razdoblju između pupanja i berbe za 'Rizling', 'Silvanac' i 'Mueller-Thurgau' (od -0,31 dana/godina do -0,24 dana/godina). U Italiji je za grad Montepulciano u Toskani uočen negativan trend u razdoblju od pupanja do berbe za više sorti na sve tri istraživane lokacije (od -0,67 dana/godina do -0,36 dana/godina), a na dvije je taj trend bio značajan (Di Lena i sur., 2019.).

Posebno se ističe skraćivanje perioda sazrijevanja od šare do berbe. Skraćivanje razdoblja između šare i berbe također je uočeno u Coneglianu smještenom u području Veneto u Italiji, gdje je primijećen značajan godišnji trend od -0,14 dana/godina u razdoblju od 1964. do

2009. (Tomasi i sur., 2011.). Autori smatraju da je razlog ovom smanjenju taj što vinari žele proizvesti grožđe sličnih kemijskih parametara ili sličnog kemijskog sastava. Uslijed porasta ljetnih temperatura ti se parametri postižu ranije, tako da se željeni kemijski parametri grožđa mogu postići samo ranijim rokovima berbe.

4.2 Testiranje modela za procjenu nastupa fenoloških faza

4.2.1 Statistički modeli

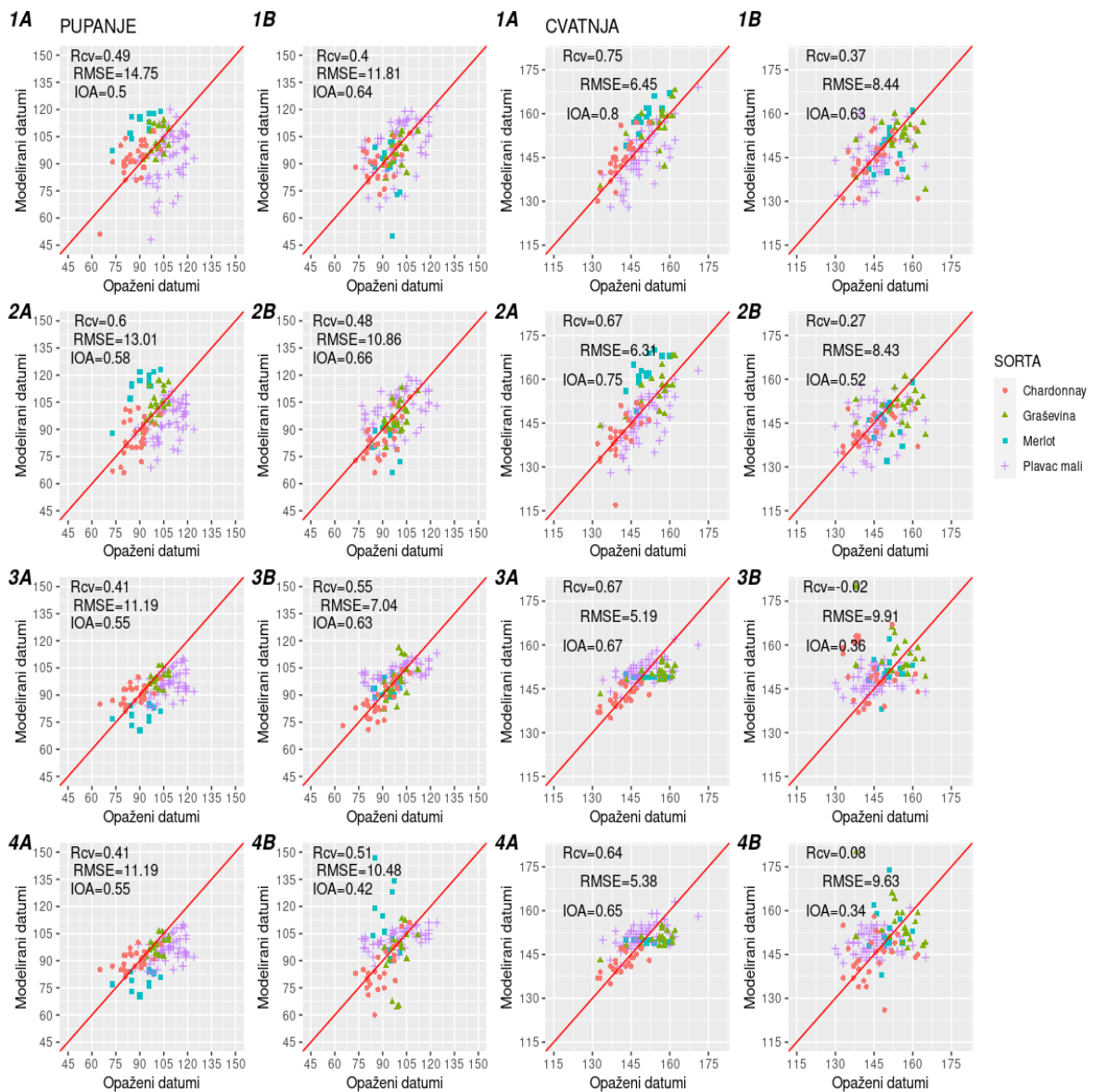
Za određivanje početka fenoloških faza (podaci iz Tablice 2.1) korišteno je osam statističkih fenoloških modela, opisanih u Tablici 3.4. Njihova analiza prikazana je u Tablici 4.3 i Slikama 4.8 i 4.9 za svaku sortu i fenološku fazu. Sveobuhvatno, GDD pristup (modeli od 1 i 2) daju bolje rezultate od višestruke linearne regresije (Tablica 4.3). Gledajući samo modele GDD-a, korelacijski koeficijenti bolji su za modele u kojima se pretpostavlja jedan prag bez obzira na lokaciju (modeli 1A i 2A u Tablici 4.3) za pupanje i cvatnju i kada prag ovisi o svakoj lokaciji zasebno za šaru i berbu (modeli 1B i 2B u Tablici 4.3). To bi sugeriralo da je približno ista količina topline potrebna da određena sorta započne fenološki stadij bez obzira na lokaciju, ali da za kasnije fenološke stadije lokacija, a možda i sam proizvođač vina, igra značajnu ulogu. To je donekle i očekivano za berbu jer berba ovisi o odlukama proizvođača (raspoloživost radnika, željena količina šećera i kiselina, vremenski uvjeti za provedbu berbe). Gledajući rezultate za svaku fazu posebno, najbolja korelacija između modeliranog i promatranog datuma pupanja povezana je s modelom 3 koji koristi osnovnu temperaturu od 5 °C (R_{cv} između 0,4 i 0,82). De Cortázar-Atauri i sur. (2009.) pronašli su sličnu korelaciju između statističkog modela i opaženog datuma pupanja u Francuskoj kada su koristili modele temeljene na GDD-u. Bolji rezultati prognoziranih datuma pupanja za metodu GDD5 (model 2) u usporedbi s GDD10 (model 1) mogu značiti da je osnovna temperatura od 10 °C, za koju se tradicionalno smatra kao temperatura na kojoj loza postaje aktivna, previsoka. Nekoliko drugih autora pokazalo je da je osnovna temperatura za pupanje slična ovoj vrijednosti za nekoliko kultivara (Moncur i sur., 1989). Drugi razlog zašto su rezultati bolji s nižom osnovnom temperaturom može biti to što se pravo razdoblje mirovanja ne uzima u obzir, a određivanje datuma početka može uzrokovati pogreške (u našem slučaju primjena GDD-a kreće 1. siječnja). Neke studije smatraju ovo određivanje fiksnog datuma početka dobrom osnovom za izračun (npr. za cvatnju marelica Ruml i sur. (2011.)), dok drugi razmatraju važnost simulacije datuma prekida mirovanja (Hänninen i sur. (2007.)). Ovaj model precjenjuje datum pupanja za 'Merlot' (modelira kasnije datume pupanja od opaženih), a podcjenjuje za 'Plavac mali' (modelira ranije datume pupanja od

opaženih, Slika 4.8). Kod bijelih sorti bolje je modeliran početak pupanja, iako se kod sorte 'Chardonnay' vidi da model simulira nešto ranije nastupe pupanja. Iako mu je koeficijent korelacije za pupanje nešto niži (R_{cv} je u rasponu od 0,19 do 0,78), model 6 ima najmanji $RMSE$ i najbolji IOA za pupanje. Na većini postaja koje se koriste za određivanje simuliranog datuma otvaranja pupova, model 6 koristi srednju dnevnu temperaturu zraka u ožujku s negativnim predznakom (Tablica A3, A4 i A5 u Dodatku A). Kako napredujemo u fenološkom ciklusu, rezultati modela GDD-a s osnovnom temperaturom od 10 °C se poboljšavaju.

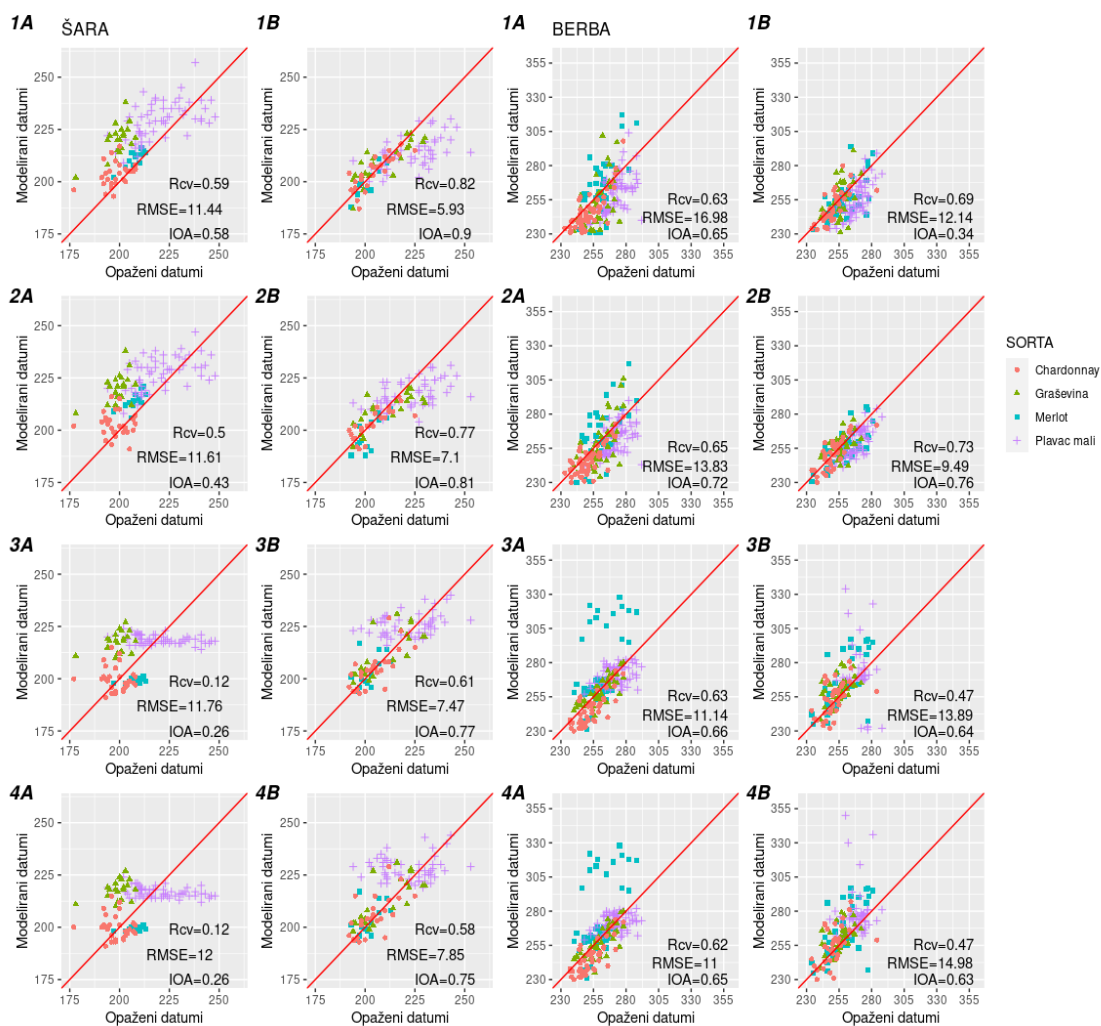
Za cvatnju, model 1 daje najbolje ukupne rezultate, s visokim R_{cv} (0,65-0,87) i IOA (0,55-0,8) i relativno malim $RMSE$ (5,29-9,52). Ovaj rezultat pokazuje da je potreban ukupni GDD potreban za početak cvatnje približno 300-350 °C jedinica za bijele sorte i 370-470 °C jedinica za crne sorte (Tablica A1 i Tablica A2 u Dodatku A). Kao i model 2A za pupanje, i ovaj model daje nešto kasnije datum cvatnje za 'Merlot' od opaženih, a ranije datum za 'Plavac mali'. Model 3A također je dobro simulirao početak cvatnje kod svih kultivara osim sorte 'Merlot'. Posebno je dobro modelirana cvatnja 'Plavca malog' (Slika 4.8). Višestruka linearna regresija također je dala dobre rezultate za šaru (model 6 u tablici 4.3), ali uz ranije nastupe kod sorte 'Plavac mali' (Slika 4.9). Iako su Fraga i sur. (2016.) istaknuli da modeli s temperaturnim pragovima poput modela GDD-a nisu prikladni za simulaciju šare, dobiveni rezultati u ovoj studiji sugeriraju obrnuto. Berba je također dobro modelirana bez obzira na to koji se model koristi. Na Slici 4.9 jasno je da modeli A simuliraju kasnije datume berbe za 'Merlot'. Iako modeli GDD-a ne simuliraju berbu u tako kasnom razdoblju, i kod njih je vidljivo određeno odstupanje. Višestruka linearna regresija mnogo bolje simulira berbu bijelih sorti. S druge strane, B modeli dobro simuliraju berbu, iako opet modeli GDD-a daju nešto bolje rezultate. Kod višestruke linearne regresije vidljiv je problem simulacije berbe za sortu 'Plavac mali' (višestruka linearna regresija daje nepostojeće kasne datume berbe).

Tablica 4.3 Statistička korelacija modela (*Rcv*), korijen srednje kvadratne pogreške (*RMSE*) i indeks slaganja (*IOA*) za sve modele i fenološke faze za četiri sorte vinove loze (G – 'Graševina', C – 'Chardonnay', M- 'Merlot' i PM – 'Plavac mali'). Podebljano su označene vrijednosti modela s najboljim rezultatima.

SORTA	MODEL	PUPANJE			CVATNJA			ŠARA			BERBA		
		Rcv	RMSE	IOA	Rcv	RMSE	IOA	Rcv	RMSE	IOA	Rcv	RMSE	IOA
G	1A	0,28	7,89	0,54	0,65	6,24	0,80	0,62	21,61	0,30	0,50	17,04	0,62
	1B	0,50	7,17	0,68	0,05	10,11	0,44	0,83	6,85	0,89	0,38	13,20	0,57
	2A	0,57	7,35	0,65	0,66	5,85	0,80	0,49	22,15	0,28	0,63	13,43	0,75
	2B	0,55	7,13	0,69	0,06	9,28	0,41	0,77	7,93	0,83	0,38	9,83	0,60
	3A	0,53	4,96	0,68	0,67	7,15	0,63	0,36	19,28	0,30	0,76	7,53	0,86
	3B	0,53	7,66	0,66	-0,46	12,09	0,14	0,78	8,05	0,87	0,40	11,56	0,59
	4A	0,53	4,96	0,68	0,67	7,15	0,63	0,36	19,28	0,30	0,74	8,31	0,84
	4B	0,51	30,95	0,27	-0,47	12,69	0,16	0,78	8,05	0,87	0,43	11,28	0,60
C	1A	0,59	10,01	0,71	0,78	5,29	0,79	0,33	8,69	0,52	0,79	10,06	0,82
	1B	0,34	9,87	0,63	0,42	8,09	0,68	0,82	5,01	0,90	0,73	8,40	0,82
	2A	0,64	10,16	0,75	0,60	5,52	0,73	-0,07	9,94	0,32	0,76	8,90	0,82
	2B	0,63	9,12	0,74	0,46	7,19	0,66	0,79	5,39	0,86	0,78	6,63	0,88
	3A	0,48	7,68	0,60	0,70	3,55	0,78	-0,11	9,31	0,22	0,78	12,84	0,73
	3B	0,78	6,41	0,87	-0,23	14,12	0,28	0,71	6,53	0,84	0,54	10,76	0,70
	4A	0,48	7,68	0,60	0,70	3,55	0,78	-0,11	9,31	0,22	0,78	12,84	0,73
	4B	0,52	14,97	0,57	0,19	9,52	0,47	0,65	7,66	0,80	0,52	13,32	0,65
M	1A	0,74	21,29	0,41	0,87	9,01	0,55	0,82	4,40	0,75	0,71	18,27	0,68
	1B	-0,39	17,52	0,10	0,50	6,04	0,69	0,89	3,43	0,92	0,70	11,08	0,81
	2A	0,82	23,48	0,41	0,68	12,62	0,43	0,69	7,21	0,54	0,67	17,77	0,69
	2B	-0,24	13,52	0,29	0,22	8,36	0,47	0,77	6,27	0,78	0,76	9,15	0,85
	3A	0,35	14,82	0,45	-0,50	4,80	0,28	0,59	9,16	0,41	0,51	25,04	0,51
	3B	0,19	5,99	0,47	0,20	6,15	0,43	0,51	6,88	0,70	0,64	16,23	0,72
	4A	0,35	14,82	0,45	-0,54	4,73	0,16	0,59	9,16	0,41	0,51	25,04	0,51
	4B	-0,40	25,99	0,14	0,03	9,73	0,29	0,51	6,88	0,70	0,61	16,58	0,71
PM	1A	0,40	19,49	0,47	0,73	6,65	0,80	0,55	14,18	0,64	0,54	16,92	0,57
	1B	0,45	13,75	0,66	0,32	8,79	0,58	0,58	14,09	0,64	0,69	15,36	0,60
	2A	0,40	15,87	0,52	0,68	6,77	0,78	0,51	13,27	0,62	0,54	14,22	0,60
	2B	0,41	12,60	0,62	0,32	8,51	0,58	0,52	12,76	0,62	0,69	11,34	0,68
	3A	0,33	14,71	0,51	0,67	5,57	0,71	-0,40	14,21	0,12	0,30	9,44	0,60
	3B	0,57	10,98	0,59	0,23	7,73	0,45	0,34	12,54	0,50	0,14	32,31	0,27
	4A	0,33	14,71	0,51	0,61	6,03	0,68	-0,39	14,69	0,21	0,29	9,15	0,56
	4B	0,58	11,04	0,58	0,13	8,52	0,40	0,08	14,65	0,44	0,09	19,57	0,31



Slika 4.8 Usporedba modeliranih i opaženih datuma nastupa pupanja (lijeva dva stupca) i cvatnje (desna dva stupca) za četiri sorte. Crvena puna linija je linija 1:1. Brojevi u gornjem lijevom kutu označavaju statističke modele iz Tablice 3.4. Brojevi na slikama označavaju srednje vrijednosti statističkih parametara za ocjenu točnosti.



Slika 4.9 Usporedba modeliranih i opaženih datuma nastupa šare (lijeva dva stupca) i berbe (desna dva stupca) za četiri sorte. Crvena puna linija je linija 1:1. Brojevi u gornjem lijevom kutu označavaju statističke modele iz Tablice 3.4. Brojevi na slikama označavaju srednje vrijednosti statističkih parametara za ocjenu točnosti.

4.2.2 Model STICS

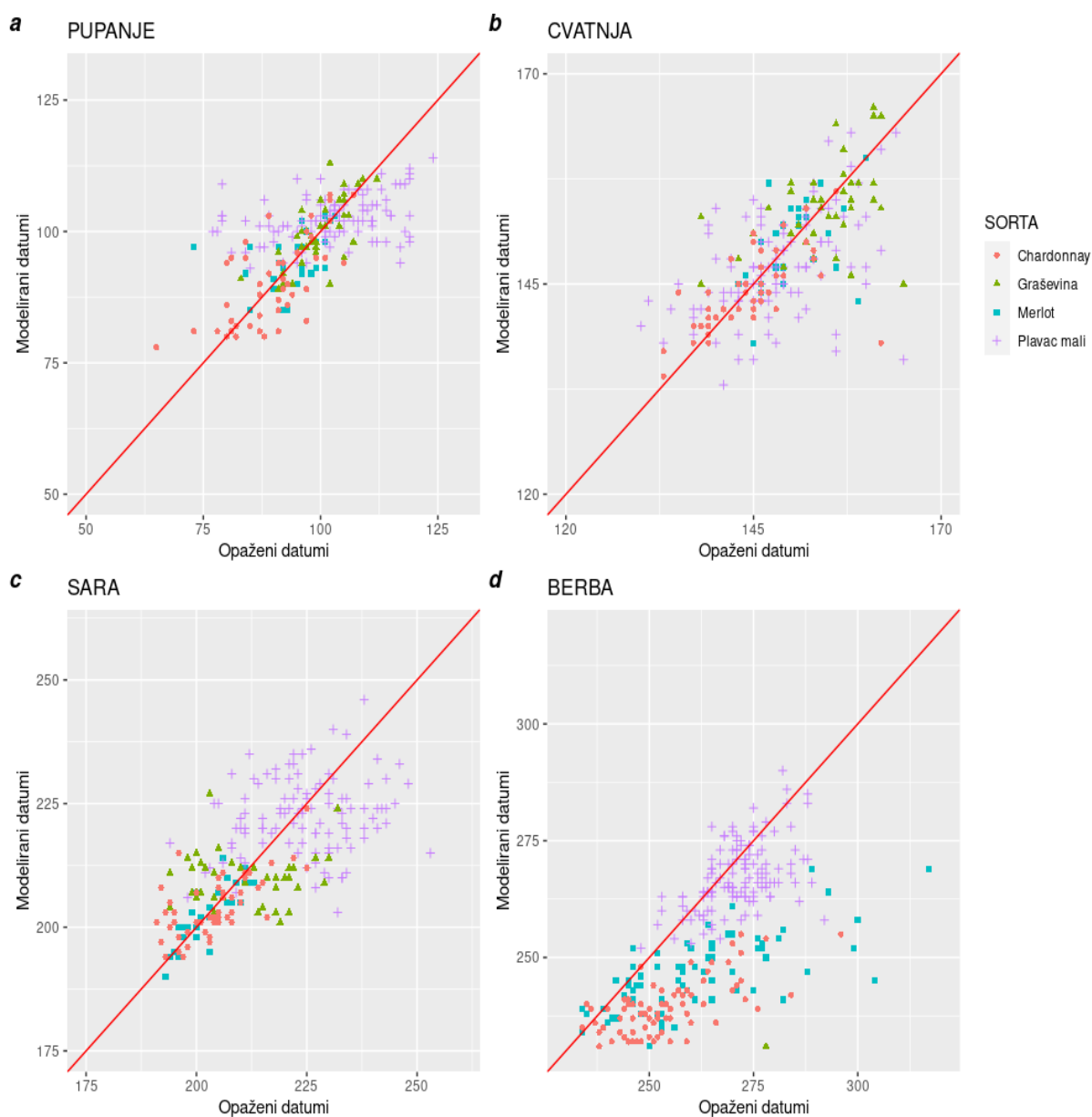
Ista analiza koja je primijenjena na statističke modele korištena je i za analizu uspješnosti biodinamičkog modela za razvoj biljaka, STICS. Na modelu je prvo napravljena optimizacija kako bi se po prvi puta mogao koristiti na našem području i za domaće sorte. Do sada se pomoću modela STICS nije pokušalo dobiti promjene u nastupu fenoloških faza sorti koje se tradicionalno uzgajaju na ovom području ('Graševina' i 'Plavac mali'). Za vrijednosti ulaznih podataka do kojih nismo mogli doći (poput tipa tla i njegovog fizikalno-kemijskog sastava) uzete su vrijednosti koje model uzimao kao zadane. Ovakvim pretpostavkama unosimo određenu vrstu pristranosti i nepouzdanosti u sami model, ali se samom optimizacijom spomenuta pogreška pokušava smanjiti. Budući da model koristi iste jednadžbe kao i statistički GDD model, ali u ovom slučaju računa i GDD same biljke, razdoblja nakon optimizacije nisu posebno dijeljena

na kalibracijski i validacijski, nego je u cjelokupnom nizu za svaku postaju i sortu napravljeno 1000 simulacija. Nakon dobivenih optimalnih pragova potrebnih za nastupe fenoloških faza, kao i akumulaciju vode u bobici i ostalih parametara koji definiraju samo berbu, model je primijenjen, a izlazni rezultati su uspoređeni s opažanjima.

Iz dobivenih rezultata vidljivo je da su prve dvije fenološke faze značajno bolje simulirane za bijele sorte (Tablica 4.4, Slika 4.10). I dok su koeficijenti korelacije kod bijelih sorti oko 0,7, crne sorte pokazuju znatno lošije rezultate. Koeficijenti korelacije su 0,37 za 'Merlot' i 0,35 za 'Plavac mali' te IOA nešto veći od 0,5 kod 'Plavca malog', odnosno 0,6 za sortu 'Merlot'. Model STICS dao je bolje rezultate za pupanje 'Graševine' od svih statističkih modela, dok su kod ostalih sorti statistički modeli dali nešto bolje rezultate nego model STICS. Prema kraju fenološkog ciklusa, rezultati modela STICS su lošiji za 'Graševinu', dok su za 'Chardonnay' slični kao kod pupanja ($R_{cv} > 0,6$, $IOA > 0,5$). Rezultati modela STICS za sortu 'Merlot' su najbolji upravo u kasnijim fazama (šara i berba), a berba je nešto bolje simulirana i kod 'Plavca malog'. Generalno uspoređujući rezultate modela STICS s rezultatima statističkih modela vidimo da su oni nešto lošiji. Ipak, zadovoljavajuće vrijednosti koeficijenta korelacije i IOA daju mogućnost korištenja ovog modela kao jednog od modela za predikciju fenoloških faza u budućnosti. Pritom se može kombinirati zajedno s modelima GDD10 (Model 1) i GDD5 (Model 2) (koji su se pokazali kao najbolji kod statističkih) čineći jedan sveobuhvatan pristup. Svi ovi modeli zajedno mogu dati jasniju sliku o mogućim promjenama u fenološkim fazama i predstavljaju dobar ansambl prognoza fenologije u budućoj klimi.

Tablica 4.4 Usporedba modela STICS i mjerenja; statistička korelacija (R_{cv}), korijen srednje kvadratne pogreške ($RMSE$) i indeks slaganja (IOA) za sve fenološke faze i četiri odabrane sorte.

SORTA	PUPANJE			CVATNJA			ŠARA			BERBA		
	R_{cv}	$RMSE$	IOA	R_{cv}	$RMSE$	IOA	R_{cv}	$RMSE$	IOA	R_{cv}	$RMSE$	IOA
'Graševina'	0,71	4,59	0,84	0,42	6,13	0,65	0,07	11,46	0,39	0,59	44,63	0,29
'Chardonnay'	0,69	6,53	0,83	0,64	4,74	0,79	0,66	6,33	0,79	0,65	17,14	0,53
'Merlot'	0,37	6,66	0,61	0,47	4,94	0,71	0,83	3,46	0,91	0,69	19,99	0,6
'Plavac mali'	0,35	10,29	0,51	0,06	6,86	0,72	0,18	13,06	0,48	0,51	8,77	0,69



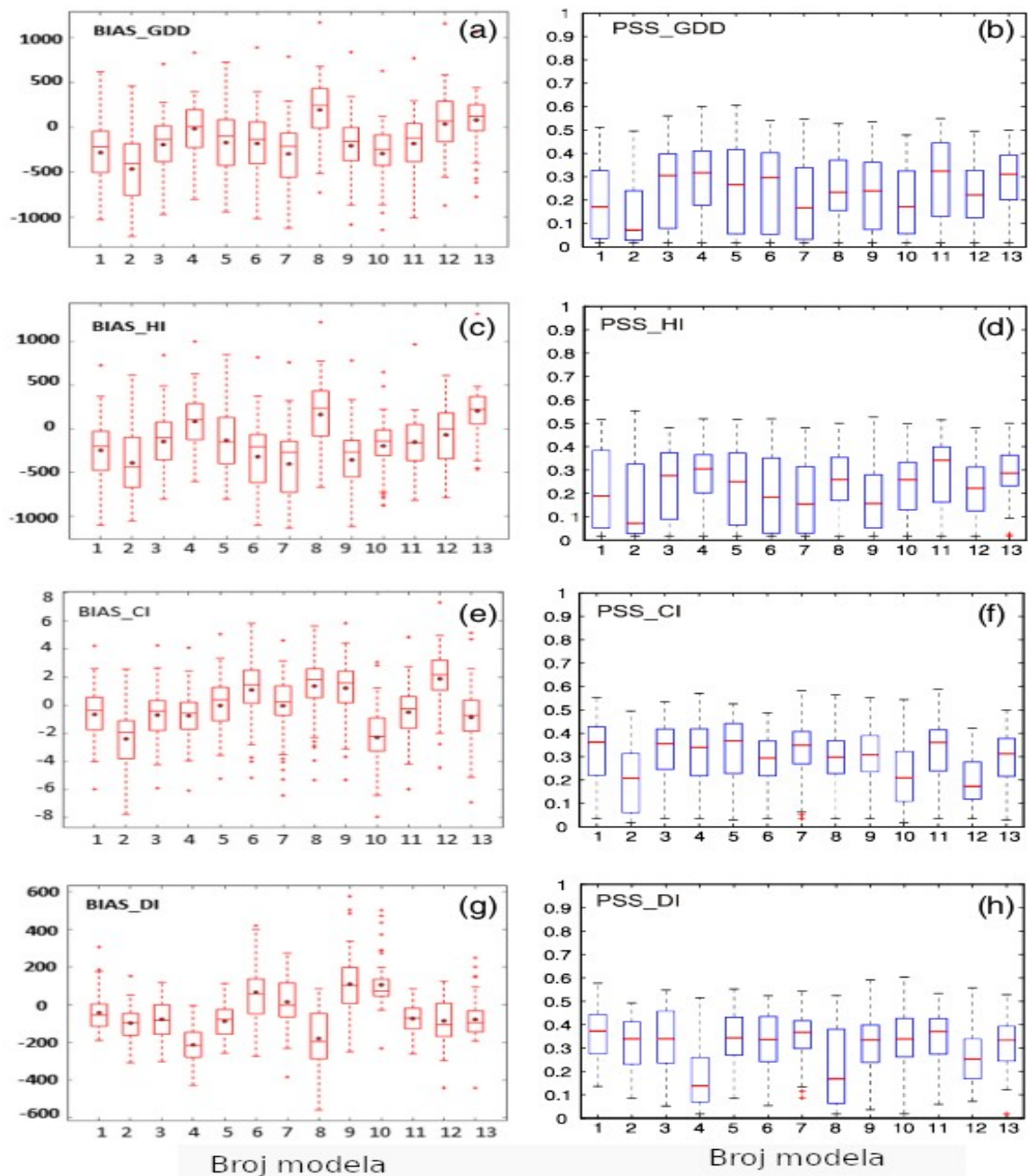
Slika 4.10 Usporedba opaženih i modeliranih vrijednosti modelom STICS datuma: (a) pupanja, (b) cvatnje, (c) šare i (d) berbe za četiri sorte vinove loze. Crvena puna linija je linija 1:1.

4.3 Analiza očekivanih promjena u budućim klimatskim uvjetima

4.3.1 Analiza bioklimatskih indeksa

S obzirom na uočene trendove u mjerenjima bioklimatskih indeksa, kao i na uočene trendove u fenološkim fazama, potrebno je utvrditi kakva se projekcija bioklimatskih indeksa očekuje u budućnosti. U tu svrhu koriste se simulirani klimatski nizovi meteoroloških veličina za povijesno (P0) i buduće razdoblje (podijeljeno kroz P1, P2 i P3). Preuzeti su iz skupa kojeg čini 10 kombinacija više regionalnih i globalnih klimatskih modela (Tablica 3.3) s horizontalnom

razlučivošću od 12,5 km. Sam rezultat prikazan je kao medijan skupa klimatskih simulacija za umjereni i ekstremni klimatski scenarij. Dodatno je, kako bi se prevladali problemi pristranosti koji se javljaju unutar klimatskih simulacija, fokus bio na prikazu razlika između dva odabrana razdoblja (npr. P2-P0) za medijan 10 klimatskih simulacija za sve indekse.



Slika 4.11 Kutijasti dijagrami pristranosti (lijevo) i Perkinsove uspješnosti vještine (PSS, desno) za pet bioklimatskih indeksa: (a) i (b) GDD (°C jedinica), (c) i (d) HI (°C jedinica), (e) i (f) CI (°C) te (g) i (h) DI (mm) na točkama modela koje odgovaraju meteorološkim postajama u Hrvatskoj. Svaki kutijasti dijagram predstavlja raspodjelu indeksa za simulaciju modela navedenu u Tablici 3.3 (brojevi 1-13 u koloni *Broj modela*) za razdoblje P0 (u slučaju da je RCM tjeran GCM) ili razdoblje navedeno u Tablici 3.3 (u slučaju da je tjerano ERA-Interim reanalizom). Linije kutijastih dijagrama označavaju medijane, točkice srednjake, gornji i donji dio okvira prikazuju 75. i 25. percentil.

Prije same analize raspodjele bioklimatskih indeksa bilo je potrebno vidjeti uspješnost klimatskih modela u simuliranju indeksa u razdobljima P0 (1971-2000) kad su regionalni klimatski modeli tjerani globalnim klimatskim modelima (brojevi modela 1-10) te u dostupnom razdoblju u kojem su RCM tjerani ERA-Interim reanalizom (11-13). Za ocjenu uspješnosti modela korištena su dva parametra: pristranost (simulacije-mjerenja) te mjera uspješnosti prema Perkinsu (eng. *Perkins skill score, PSS*) koju su definirali Perkins, Pitman, Holbrook i McAneney (Perkins i sur., 2007.). Ova veličina računa površinu preklapanja između dviju procjena gustoće vjerojatnosti, jedne izračunane iz mjerenja, a druge iz modela. U slučaju potpunog preklapanja PSS ima vrijednost 1. Kutijasti dijagrami GST-a nisu prikazani jer im je raspodjela izrazito slična onoj za GDD, što je i za očekivati zbog sličnosti jednadžbe za oba indeksa i istih temperatura koje ulaze u izračun. Za GDD indeks srednjaci i medijani su uglavnom negativni za sve simulacije s iznimkom one pod brojem 8 (Slika 4.11a). Za zadnje tri simulacije, tjerane ERA-Interim reanalizom, medijan pristranosti je gotovo 0. Slični rezultati vidljivi su i za pristranost HI (Slika 4.11c), uz razliku što pozitivan medijan pristranosti osim za simulaciju 8 vidimo i za simulaciju 4. Dok se kod ova dva indeksa može primijetiti određeni obrazac u simulacijama klimatskih modela te reći da oni uglavnom podcjenjuju vrijednosti indeksa, za CI to nije slučaj. Ovdje vidimo da su medijani i srednjaci pristranosti za neke modele veći od 0, a za neke manji, a ta situacija vrijedi i za simulacije tjerane ERA-Interim reanalizom. Uočena pristranost prema toplijoj klimi za simulacije 4 i 8, koja vjerojatno dolazi od precjenjivanja T_{max} , vidljiva je i u evaluaciji DI. Modeli simuliraju manje oborine nego što je opaženo, a vrijednosti DI pokazuju sušu klimu (negativna pristranost, Slika 4.11g). Kada se RCM kombinira s ERA-Interim reanalizom dijagrami DI su relativno usklađeni.

Rezultati PSS analize za svih pet indeksa ne pokazuju vrijednosti veće od 0,6, što znači da se simulirane i opažene distribucije preklapaju na otprilike polovici područja. Ovi rezultati pokazuju lošiju izvedbu modela za indekse u usporedbi s temperaturom ili oborinom (Perkins i sur., 2007.), što je očekivano jer se pogreške modela umnažaju tijekom izračuna bioklimatskog indeksa.

Pothlađenost modela, koja se očituje negativnom pristranošću bioklimatskih indeksa, dolazi od pogrešaka GCM-a koja utječe na RCM kroz inicijalne i rubne uvjete (Belušić Vozila i sur., 2019.) i od pogrešaka samih RCM-a. Pogreške RCM-a mogu biti uzrokovane rezolucijom, modeliranjem pokrova i odnosa kopno/more u modelu, topografijom, itd. Osim toga, pri računanju indeksa uglavnom se koriste varijable T_{min} i T_{max} koje su često simulirane lošije od T_{sr} . Zbog svega navedenog, za proučavanje klimatskih uvjeta u budućnosti ne koristi se samo jedan RCM, nego se fokus stavlja na medijan ansambla simulacija.

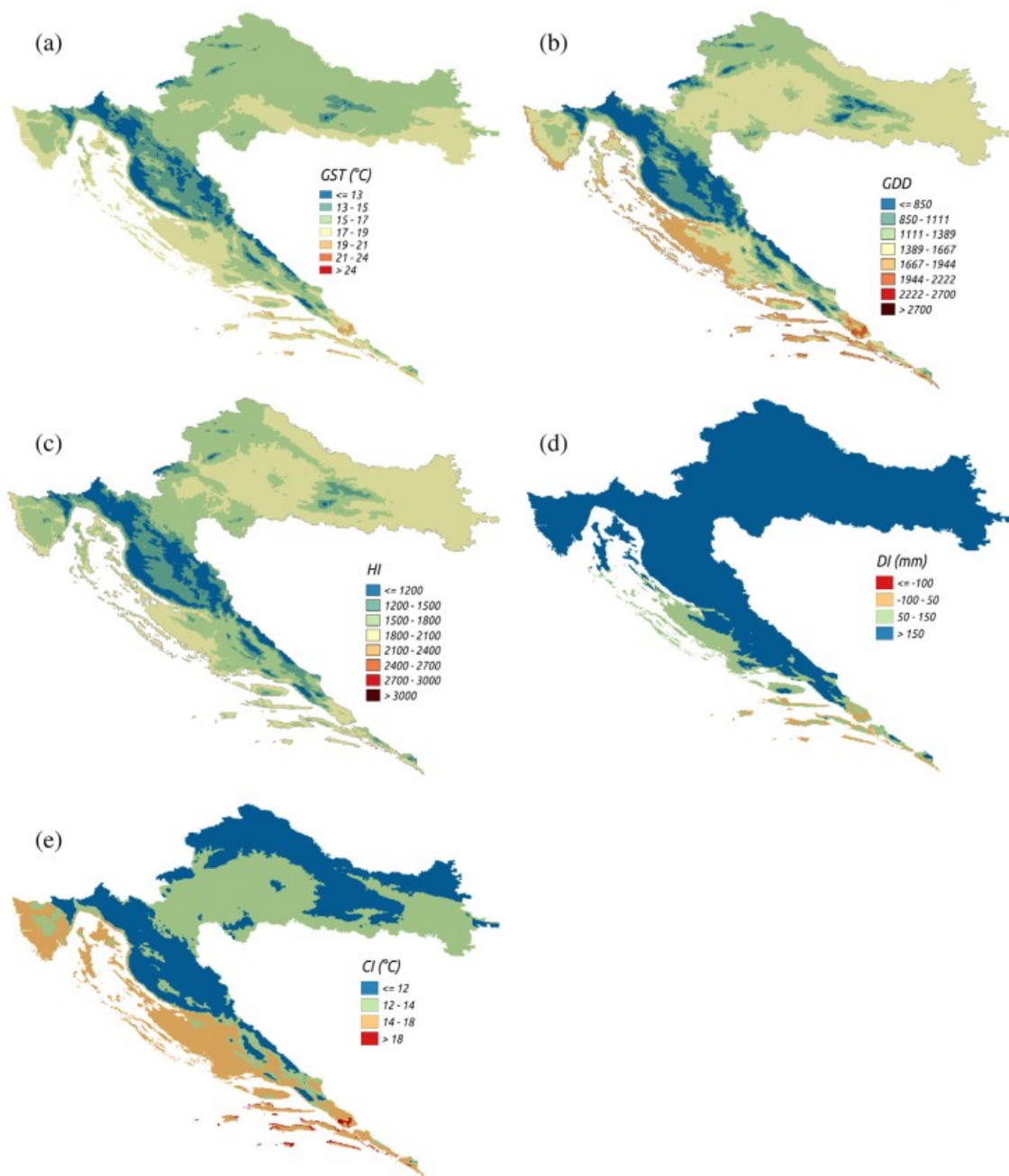
Klimatski modeli za povijesno razdoblje P0 (1971.-2000.) pokazuju sličnu prostornu raspodjelu i zaključke, vidljive i iz mjerenja. Većina dijelova kontinentalne Hrvatske u tom razdoblju ima vrijednosti GST-a između 15 °C i 17 °C (Slika 4.12a). Nešto više temperature zabilježene su na istoku Hrvatske. Ovakve vrijednosti indeksa u skladu su s mjerenjima (Slika 4.1 a i b). Na obalnom području GST je u istom razdoblju uglavnom bio između 17 °C i 19 °C. Gledajući indeks GDD, većina kontinentalnog područja pripada zoni II (odnosno zona B, Slika 4.11b), dok se obalne regije svrstavaju u zone II i III (zone B i C I) u Istri i Primorju te zone III i IV (zone C I i C II) u Dalmaciji. Ovo pokazuje blago podcjenjivanje vrijednosti indeksa iz modela u odnosu na mjerenja. Treba naglasiti da se radi o medijanu klimatskih simulacija. Raspodjela indeksa HI ne odstupa značajno od prostorne raspodjele prethodno opisanih bioklimatskih indeksa (Slika 4.12c). Osim uočavanja razreda hladno (uglavnom povezanog s višom nadmorskom visinom i sjevernim dijelovima Hrvatske), dominantan razred je umjereno hladno ($HI > 1800$ °C jedinica) i u kontinentalnom i obalnom području.

Za razdoblje P2 (2041.-2070., Slika 4.13) i scenarij RCP8.5, vrijednosti GST-a su u prosjeku porasle za približno 2,5 °C (Slika 4.14a). Manji porast je u sjevernim područjima, a veći prema istoku zemlje i središnjim dijelovima obale, koji u tom razdoblju pripada u klasu vruće (Slika 4.13a). Najveće zagrijavanje (razred vrlo vruće) uočava se u južnom dijelu Hrvatske. Modelirane vrijednosti razlika GST-a (Slika 4.14a) odgovaraju onima za Srbiju. Ruml i sur. (2012.) dobili su vrijednosti promjena u rasponu od 1,2–4,4 °C, za dva scenarija kroz 21. stoljeće. Slična prostorna raspodjela uočava se i za druge indekse, odnosno GDD, HI i CI. Samo najviši vrhovi planina ne bilježe promjene u razredima GDD-a (slike 4.13b i 4.14b), dok ostala područja ukazuju na posljedice zagrijavanja. Većina kontinentalnih područja Hrvatske prelazi iz razreda zone II (zona B) u zonu III (zona C I), a poneki dijelovi i u zonu IV (zona C II) osobito duž dolina rijeke Save u južnom dijelu Panonske nizine. Uz priobalje, a posebno na otocima, vrijednosti GDD-a također rastu. Razlike su veće od 450 °C jedinica u sjevernim dijelovima i idu prema 575 °C jedinica na jugu Hrvatske. Vrijednosti indeksa HI (Slike 4.13c i 4.14c) također sugeriraju da bi tijekom razdoblja P2 dominirali umjereni uvjeti (razred umjereno toplo) za uzgoj vinove loze, a razlike $HI(P2)-HI(P0)$ bi bile u rasponu od 425 do 550 °C jedinica (Slika 4.14c). I indeks GDD i indeks HI pokazuju značajan porast na površinama koje se mogu koristiti za uzgoj vinove loze. Oba indeksa pokazuju na mogući pomak/povećanje površine pogodne za uzgoj s obzirom na nadmorsku visinu. Veće nadmorske visine mogle bi postati pogodne za uzgoj vinove loze, ali zbog velike dostupne površine za podizanje novih vinograda na nižim nadmorskim visinama, pitanje je koliko je potrebno širenje vinogradarskih zona na više nadmorske visine. Primjetni pomaci u vrijednosti indeksa (najmanje jednom višom klasom) pojavljuju se i drugdje u Europi. Koufos i sur. (2018.) pokazali su da moguće promjene za Grčku, Ruml i sur. (2012.) za Srbiju te Eccel i sur. (2016.) za talijanske Alpe mogu biti i do dva razreda, naglašavajući prostornu

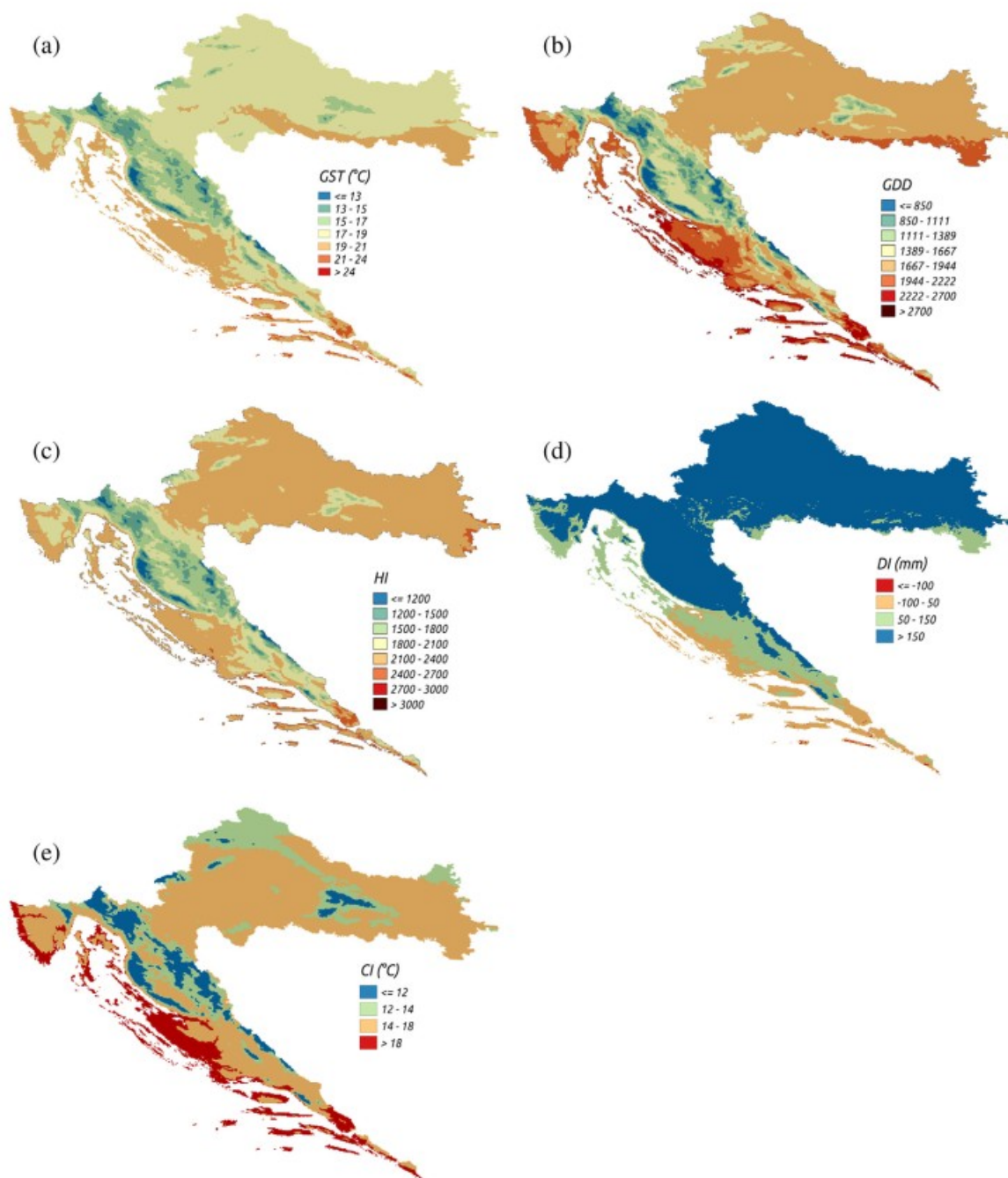
nehomogenost klime u zagrijavanju. Fraga i sur. (2014.) su uočili, kombinirajući tri bioklimatska indeksa HI, CI i DI kao jedan združeni indeks nazvan CatI, daljnji pomak prema višim razredima u uvjetima buduće klime u Portugalu. Naznačene klimatske promjene mogu biti problem za površine koje se trenutno obrađuju kod sorti ranog sazrijevanja, osobito zbog nepovoljnih omjera šećera/kiselina u bobicama grožđa (npr., Neethling i sur., 2012.).

Prostorna raspodjela indeksa CI (Slika 4.13e) u razdoblju P2 otkriva da nad Hrvatskom uglavnom postoje uvjeti koji odgovaraju dvjema klasama: umjerenih noći i toplih noći. Takvi uvjeti u kojima se CI ne spušta ispod 14 °C mogu značajno utjecati na svojstva bobica i soka od grožđa kao i kvalitetu vina u budućoj klimi. Međutim, zbog opažene ranije berbe i daljnjeg zagrijavanja atmosfere (porast indeksa CI od najmanje 2,5 °C; Slika 4.14e i 4.15e), pitanje je koliko će ovaj indeks ostati prihvatljiv kao mjera za kvalitetu dozrijevanje bobica i vina na ovim geografskim širinama.

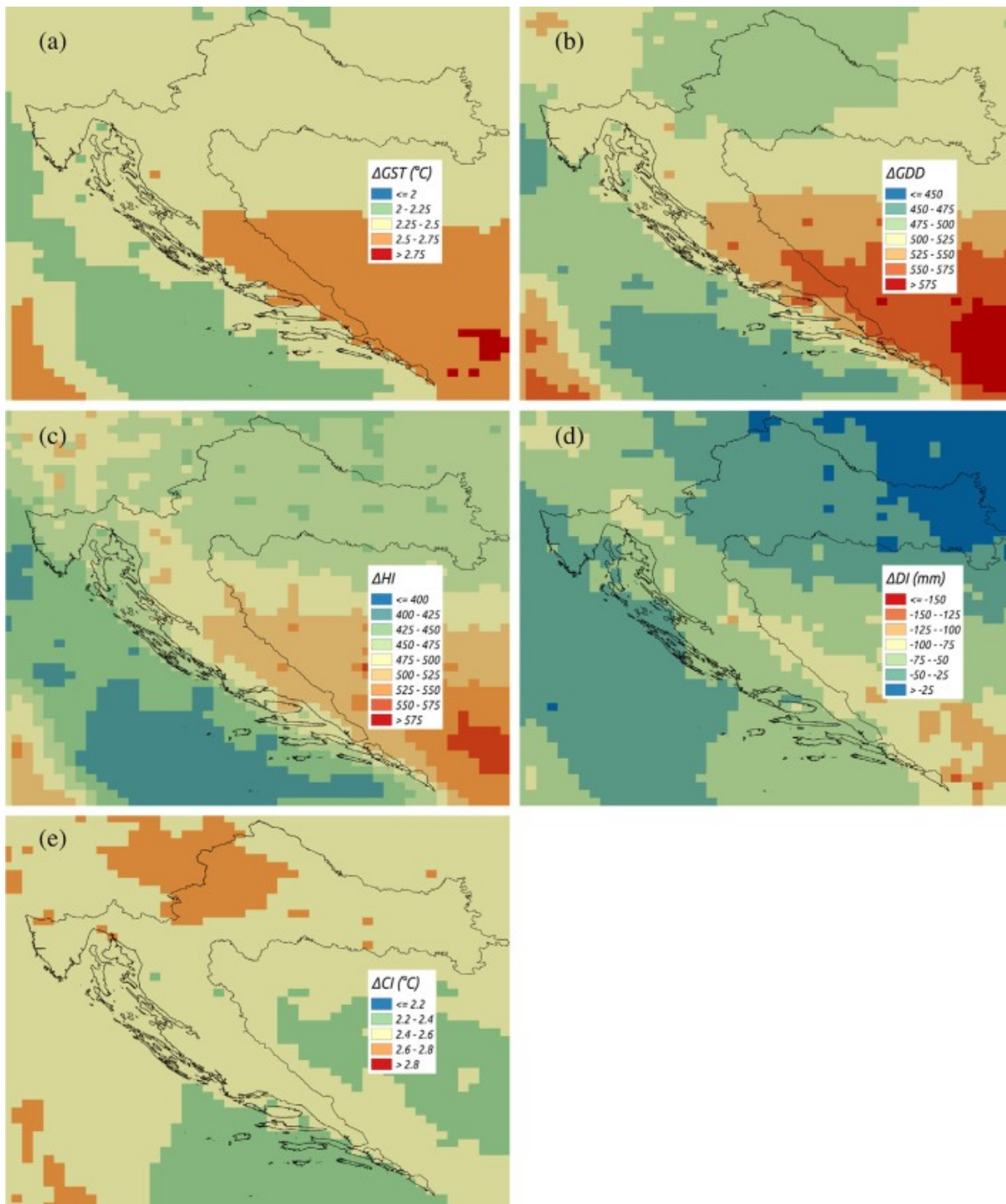
Područja zahvaćena uvjetima suše prikazano kroz prostornu raspodjelu indeksa DI uočena je i za područje doline rijeke Save (granica između Hrvatske te Bosne i Hercegovine) i uz obalni pojas, osobito središnji i južni dio Dalmacije (Slika 4.13d). Vrijednosti indeksa DI-a u obalnom području, često su manje od -50 mm, što svrstava obalno područje u klase umjereno suho i vrlo suho. Područje opisano negativnim vrijednostima DI-a povećava se zbog promjena klime i sugerira sve češću pojavu suše duž hrvatskog obalnog područja (Slike 4.13d – 4.15d). Uočeno širenje područja negativnih vrijednosti DI-a (kao mjere dostupnosti vode u tlu) podudara se također s rezultatima u drugim zemljama Balkanskog poluotoka (Ruml i sur., 2012.; Koufos i sur., 2018.).



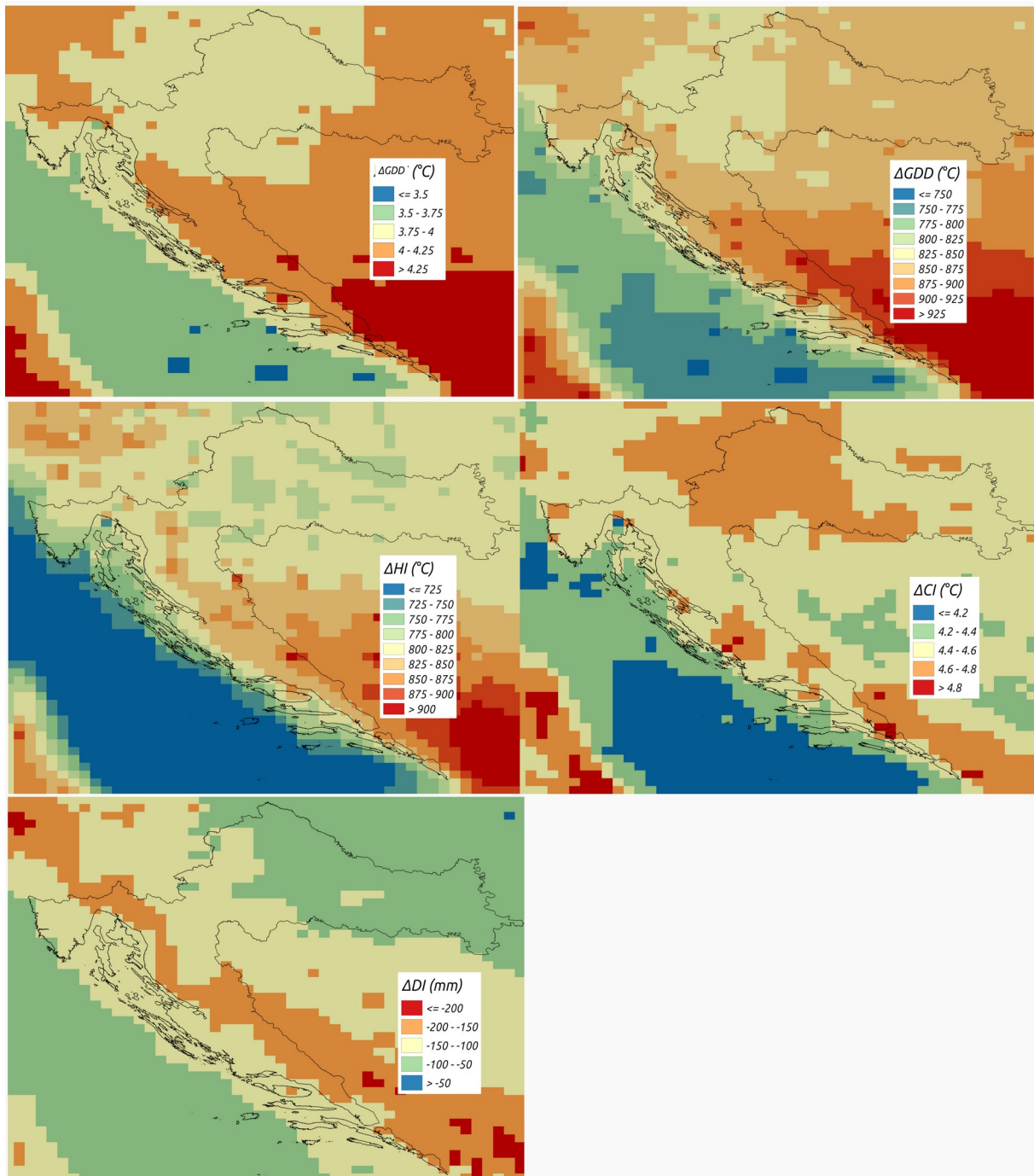
Slika 4.12 Prostorne raspodjele pet bioklimatskih indeksa: (a) GST (°C), (b) GDD (°C jedinica), (c) HI (°C jedinica), (d) DI (°C) te (e) CI (°C) za Hrvatsku, dobivene kao medijan 10 klimatskih simulacija (vidi tablicu 3.3) za povijesno razdoblje P0 (1971.–2000.).



Slika 4.13 Prostorne raspodjele pet bioklimatskih indeksa: (a) GST (°C), (b) GDD (°C jedinica), (c) HI (°C jedinica), (d) DI (°C) te (e) CI (°C) za Hrvatsku, dobivene kao medijan 10 klimatskih simulacija (vidi tablicu 3.3) za buduće razdoblje P2(2041.–2070.) i najpesimističniji scenarij RCP8.5.



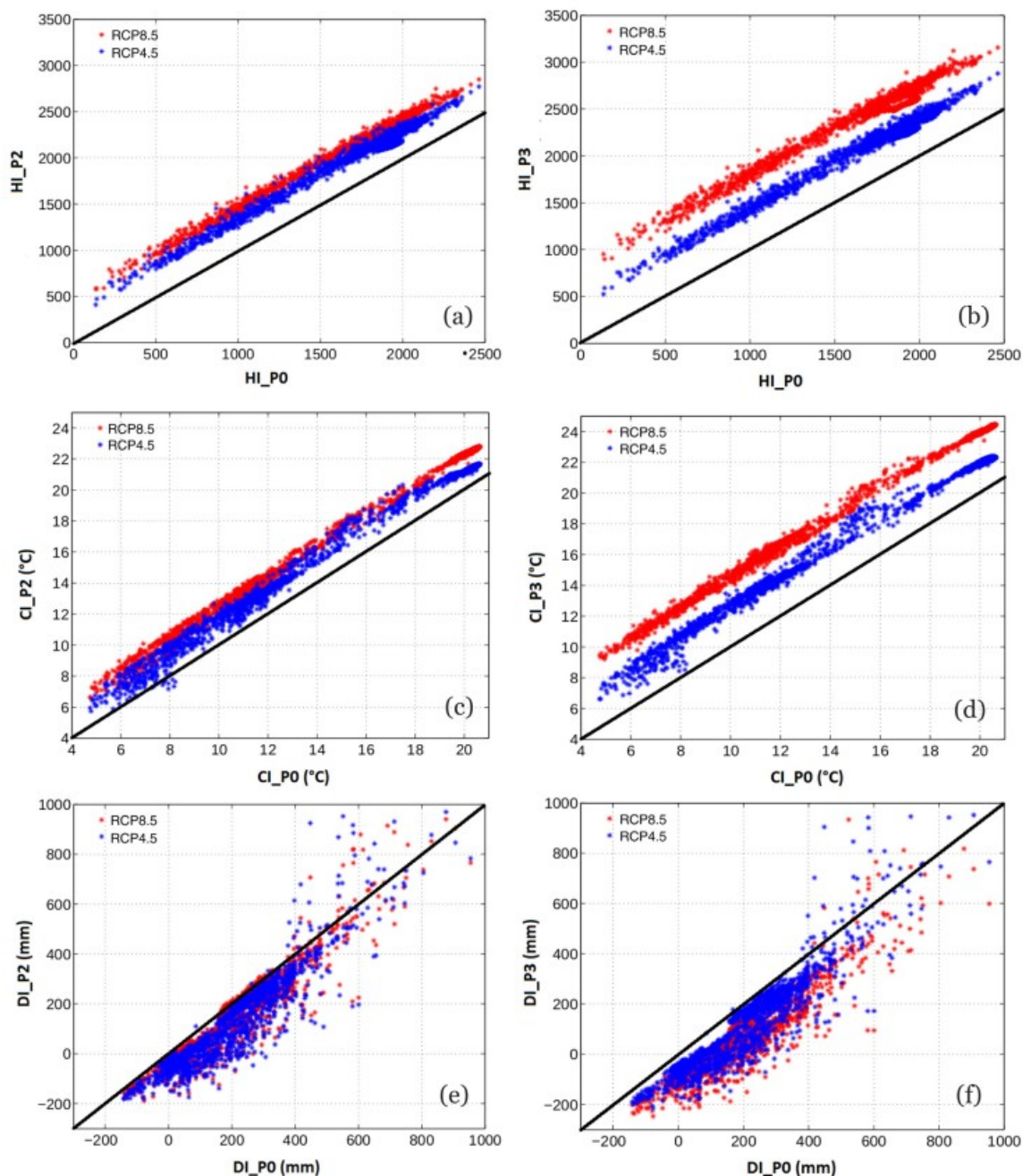
Slika 4.14 Prostorne raspodjele razlika između razdoblja P2 i P0 za svih pet bioklimatskih indeksa: (a) GST (°C), (b) GDD (°C jedinica), (c) HI (°C jedinica), (d) DI (°C) te (e) CI (°C) za Hrvatsku prikazane kao medijan razlika za 10 klimatskih simulacija za scenarij RCP8.5.



Slika 4.15 Prostorne raspodjele razlika između razdoblja P3 i P0 za svih pet bioklimatskih indeksa: (a) GST (°C), (b) GDD (°C jedinica), (c) HI (°C jedinica), (d) DI (°C) te (e) CI (°C) za Hrvatsku prikazane kao medijan razlika za 10 klimatskih simulacija za scenarij RCP8.5.

Sveobuhvatnija procjena klimatskih promjena može se provesti usporedbom indeksa (ovdje HI, CI i DI) za sve točke mreže klimatskih modela nad Hrvatskom između razdoblja P2 i P0 te razdoblja P3 u odnosu na P0. Razlike između razdoblja (P2-P0 i P3-P0) su prikazane na Slici 4.16 gdje plave točke na Q-Q prikazu odgovaraju razlikama između razdoblja u slučaju umjerenog scenarija RCP4.5, a crvene točke u slučaju pesimističnijeg (*high-end*) scenarij RCP8.5. Crna linija označava liniju za iste klimatske uvjete u budućnosti kao i u razdoblju P0. Očekivano, vrijednosti HI-a pokazuju zagrijavanje atmosfere u razdoblju P2 (Slika 4.16a), ali manje u

umjerenom scenariju u usporedbi s onim u *high-end* scenariju prikazanom na Slici 4.13. Razlike su vrlo usporedive i za male i velike HI vrijednosti. Do kraja 21. stoljeća, umjereni scenarij pokazuje sličan i usporedivi raspon vrijednosti u razlikama P2 i P3 razdoblja prema povijesnoj klimi (Slika 4.16a i b). Razlike između dva scenarija u razdoblju P3 dosta su izražene, a vrijednosti HI-a za *high-end* scenarij dvostruko su veće od one za umjereni RCP4.5. Ovaj rezultat znači da će buduća prikladnost uzgoja vinove loze diljem Hrvatske vjerojatno biti izložena velikim varijacijama klimatskih uvjeta u usporedbi s trenutnom klimom. Usporedba vrijednosti indeksa CI-a po razdobljima i scenarijima pokazuje sličan odnos kao indeks HI. Prema raspodjeli u razdoblju P2, točke mreže s nižim vrijednostima indeksa CI-a (manje od 12 °C) bliže su dijagonali što znači da na njih manje utječe zagrijavanje atmosfere, najvjerojatnije zbog ovisnosti o topografiji. Vrijednosti indeksa CI koje su veće od 12 °C, opisuju točke klimatskih modela koje odgovaraju nižoj nadmorskoj visini i posljedično s toplijim noćima. Razlike u scenarijima (Slika 4.16c) su relativno male. Dok scenarij RCP4.5 u razdoblju P3 (Slika 4.16d) prikazuje uzorak relativno sličan onome za isti scenarij u razdoblju P2, zagrijavanje je jače i za slučaj scenarija RCP8.5. Vrijednosti DI (kao mjere vlažnosti) ukazuju na isušivanje područja Hrvatske i na nedostatak vlage u tlu (osobito na jugu gdje su vrijednosti DI < 200 mm). Smanjenje dostupne vode u tlu relativno je jednako bez obzira na scenarij u razdoblju P2; međutim, očitije je u *high-end* scenariju kako se približavamo kraju 21. stoljeća (Slike 4.16e, f). Nedavne studije (npr. Mori i sur., 2007.; Vršič i sur., 2014.; Koufos i sur., 2018.) ukazale su na to da je pojava suše i broj dana s temperaturom većom od 30 °C u nekim fazama izrazito važan za koncentraciju šećera i ukupnih kiselina u bobicama grožđa. Budući da rezultati ovdje ukazuju na daljnje zagrijavanje klime koje bi moglo biti povezano s češćim i dugotrajnim razdobljima temperature iznad 30 °C i češćim sušama (smanjenje DI), moglo bi doći do značajne promjene kemijskih svojstava grožđa (šećera, kiselina i njihovog omjera).



Slika 4.16 Q-Q dijagrami bioklimatskih indeksa: (a) i (b) Huglinov indeks ($^{\circ}\text{C}$ jedinice), (c) i (d) CI ($^{\circ}\text{C}$), (e) i (f) DI (mm) za dva klimatska scenarija: RCP4.5 (plavo) i RCP8.5 (crveno) i dva razdoblja; P0 naspram P2 (lijevo) i P0 naspram P3 (desno). Crna puna linija je linija 1:1.

4.3.2 Nastup fenoloških faza primjenom statističkih modela u budućim klimatskim uvjetima

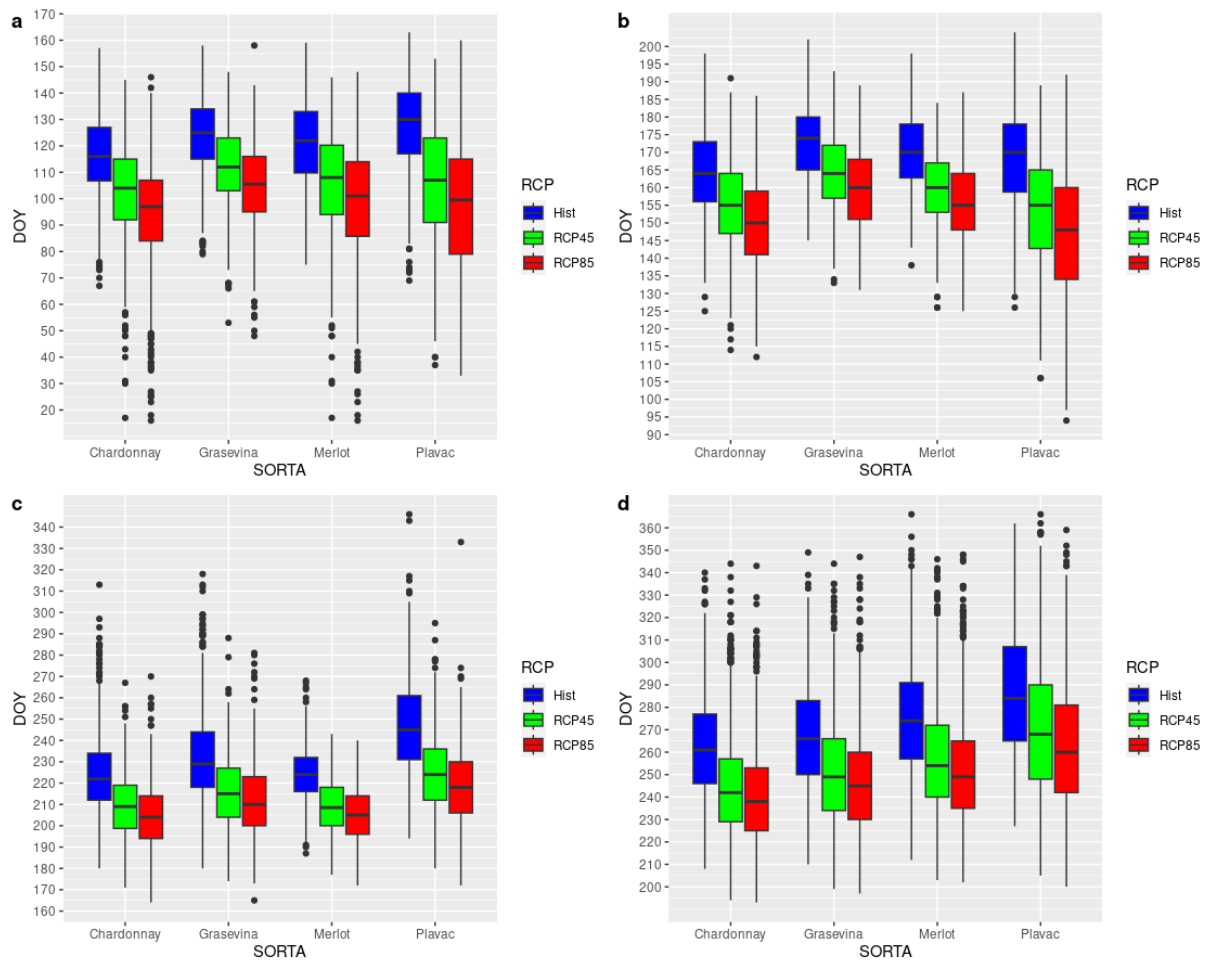
Kao što je prikazano u prijašnjim poglavljima, jedan od utjecaja klimatskih promjena na vinovu lozu je i samo pomicanje nastupa fenoloških faza prema početku godine. Pomaci su vidljivi u sadašnjoj klimi, a uz korištenje klimatskih modela proučavane su promjene i u budućim klimatskim uvjetima. Za procjenu promjene nastupa fenoloških faza korišteni su klimatski

modeli navedeni u Tablici 3.3. Pritom se ovdje koristio združeni pristup sa statističkim modelima koji su se pokazali kao najpouzdaniji u analizi i dali najbolje rezultate. To su modeli GGD10 i GDD5, točnije modeli 1B i 2B iz Tablice 3.4, a združivanje se radilo za točke modela koje odgovaraju geografskim koordinatama vinarija. Početak fenološke faze simuliran je kad se u klimatskom regionalnom modelu (RCM-u) na određenoj točki nakupi dovoljno topline, odnosno kada GDD dosegne temperaturni prag naveden u Tablici A2. Dobiveni rezultati ukazuju na daljnje pomicanje nastupa fenoloških faza prema početku godine (odnosno raniji nastup). Očekivani pomaci pupanja u razdoblju P2 u odnosu na razdoblje P0 (Slika 4.17a) izraženiji su za tradicionalne sorte ('Graševina' i 'Plavac mali') gdje razlike medijana sugeriraju pomake od 15 dana prema početku godine, neovisno o RCP scenariju. Rezultati nagoviještaju pomicanje nastupa pupanja početkom ožujka što je posebna ugroza za bijele sorte koje se većinom uzgajaju u kontinentalnim vinogradima na kojima niske temperature i mraz u ožujku mogu smanjiti veći dio uroda. Pomaci su vidljivi i u drugim fenološkim fazama pa tako modeli sugeriraju raniju cvatnju od 10 do 20 dana, ovisno o sorti i RCP scenariju (razlike medijana razdoblja P0 i P2). Najveći pomak (tj. najraniji nastup) uočava se kod sorte 'Plavac mali' i RCP8.5 scenarija. Posebno su izraženi pomaci nastupa šare, gdje su razlike medijana nastupa između razdoblja P0 i P2 veće i od 20 dana (što sugerira srednju promjenu od 20 dana). Nastupi šare oko 200. dana u godini (a to je druga polovica srpnja) mogli bi značajno utjecati na kvalitetu grožđa i kemijski sastav. Naime, pomicanje nastupa šare u potencijalno topliji dio godine značilo bi da trajanje između šare i berbe, u kojem se akumuliraju šećeri, nastupa kad su i noćne temperature nerijetko iznad 20 °C. Takvi meteorološki uvjeti mogu značajno mijenjati kemijski sastav grožđa, a moguće je i povećanje šećera utjecalo na povećanje sadržaja alkohola u vinu.

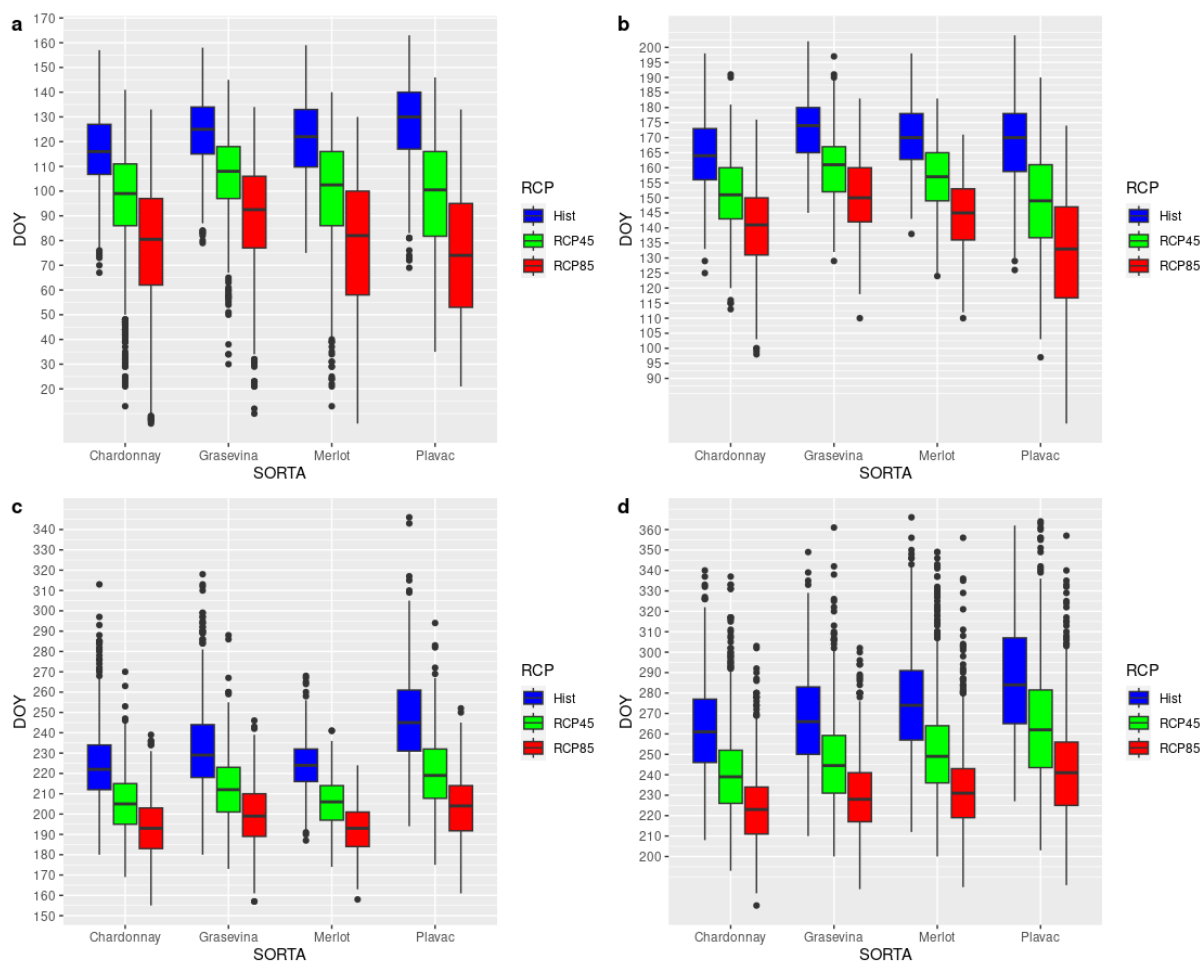
Pomicanje nastupa (odnosno raniji nastup) vidljivo je i kod berbe (Slika 4.17d). Pritom treba uzeti u obzir da medijan ansambla klimatskih modela daje hladnije klimatske uvijete od opaženih za sadašnju klimu (klimatski modeli su „pothlađeni“). Zbog toga u određenim godinama nisu dosegnuti temperaturni pragovi pomoću GDD-a iz medijana ansambla klimatskih modela potrebni za početak berbe. Takve su simulacije isključene iz analize, odnosno, godine u kojima u 365 dana nije dosegnut prag izbačene su iz ansambl prognoze. Ovo je učestalije u P0 razdoblju. Da su ove simulacije uključene u analizu razlika između P0 i P2 ili P3 razdoblja bila bi još i veća.

Promjene su još naglašenije gledajući razdoblje P3 (Slika 4.18). Najveće razlike nastupa pupanja očekuju se za crne sorte, gdje je nastup pupanja projicirano za sredinu ožujka. Ovi rezultati ukazuju na ujednačavanje nastupa pupanja za sve promatrane sorte, odnosno da bi se pupanje svih sorti događalo u približno isto vrijeme, što nije slučaj u sadašnjim klimatskim uvjetima. Ovakvo stanje vidljivo je i kod drugih fenoloških faza. Slični rezultati već i ranije su

dobiveni u brojnim istraživanjima u različitim zemljama Europe. U Njemačkoj su na primjer, korištenjem klimatskih modela s različitim klimatskim scenarijima uočili mogućnost ranijeg nastupa svih glavnih fenoloških faza, od 11 ± 3 dana ranije, a berba 13 ± 1 dan ranije u godini do kraja stoljeća (Kartschall i sur., 2015.). U Portugalu združeni pristup korištenja statističkih fenoloških modela i klimatskih modela pokazali su ranije nastupe fenofaza za 16 sorti (Fraga i sur., 2016.). Posebno je značajno pomicanje ranijeg nastupa šare koja za određene sorte prelazi i 20 dana.



Slika 4.17 Kutijasti dijagram nastupa četiri fenološke faze: (a) pupanje, (b) cvatnja, (c) šara i (d) berba dobivenih združenim korištenjem klimatskih modela (Tablica 3.3) i statističkih modela GDD10 i GDD5 (Tablica 3.4) za razdoblja P0 (1971.-2000., plava boja) te P2 (2041.-2070.) i dva klimatska scenarija: RCP4.5 (zeleno) i RCP8.5 (crveno).

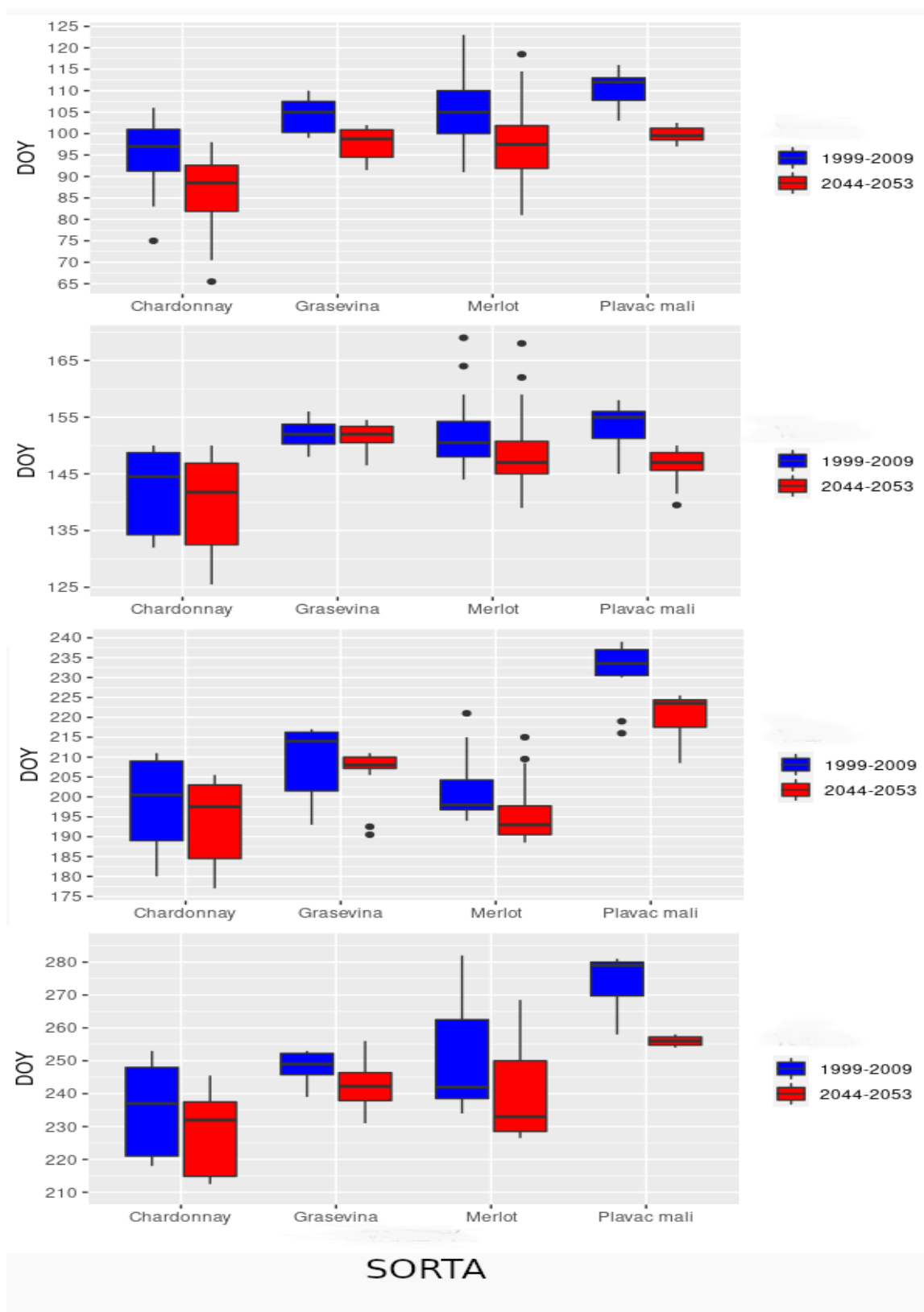


Slika 4.18 Kutijasti dijagram nastupa četiri fenološke faze: (a) pupanje, (b) cvatnja, (c) šara i (d) berba dobivenih dobivenih združenim korištenjem klimatskih modela (Tablica 3.3) i statističkih modela GDD10 i GDD5 (Tablica 3.4) za razdoblja P0 (1971.-2000., plava boja) te P3 (2071.-2100.) i dva klimatska scenarija: RCP4.5 (zeleno) i RCP8.5 (crveno).

Zbog dobre linearne ovisnosti berbe o temperaturi zraka u vegetacijskom razdoblju, kao još jedan od statističkih načina na koji se može promatrati pomicanje berbe odabrana je Bayesova statistika. Prvo se izračunava *GSTr* prema definiciji GST-a, ali za kraće vremensko razdoblje. Datumi berbe i *GSTr* podijeljeni su u tri kategorije: rana berba (slučajevi ispod 25. percentila), normalna berba i kasna berba (slučajevi iznad 75. percentila) na promatranim postajama i *GSTr* iznad ili ispod određenih vrijednosti. Primjer se može vidjeti u Tablici A6 u Dodatku A, gdje su dane klasifikacije između rane i kasne berbe za 'Graševinu' i 'Plavac mali' na postajama Kutjevo_V1 i Korčula_10. U Kutjevu, primjerice, vjerojatnost da je berba 'Graševine' prije 18. rujna ako je *GSTr* u sezoni vegetacije (travanj–kolovoz) iznad 18,3 °C iznosila je 71 %. Za 'Plavac mali' u Korčuli ako je *GSTr* iznad 23,3 °C u 50 % godina, tada je berba prije 23. rujna. Dodatno, postoji visoka korelacija između kasne berbe i niskog GST-a. U ovoj studiji, pretpostavljeno je da se uvjetne vjerojatnosti (dobivene mjerenjima, $P(B_m | T_m)$ i $P(T_m | B_m)$) ne mijenjaju. Pretpostavka o očuvanoj uvjetnoj vjerojatnosti omogućuje nam da na temelju srednje vrijednosti *Tsr* u vegetacijskom ciklusu procijenimo karakter berbe u sadašnjoj i budućoj klimi iz

klimatskih modela. Vjerojatnost da se dogodi događaj niske ili visoke temperature $GSTr$ ($P(T)$) izračunava se između P0 i P2 razdoblja RCM-a u kontrolnom razdoblju P0 (1971.-2000.) i budućem razdoblju P2 (2041.-2070.). Fokus je na procjeni učestalosti rane i kasne berbe ($P(B)$) u budućnosti za razdoblje P2 i njihovu razliku u odnosu na razdoblje P0 ($\Delta P = P(B)_{P0} - P(B)_{P2}$). Tablica A7 prikazuje medijan razlika između razdoblja P0 i P2 koji predstavlja broj godina s ranijim ili kasnijim berbama, ovisno o $GSTr$ dobivenom iz svake RCM simulacije i RCP8.5 scenarija. Sve četiri sorte prikazane su u tablici, što ukazuje na povećanje broja ranih berbi i smanjenje broja kasnijih berbi, bez obzira na položaj i sortu. Smanjenje kasnijih berbi je najznačajnije i može se očekivati u rasponu od približno 30-75 %. Dakle, prema rezultatima, u 30-godišnjem razdoblju 30-75 % godina više neće imati kasniju berbu, što je u skladu s rezultatima Koufosa i sur. (2018.) i Ruml i sur. (2012.) koji su predvidjeli da će berba biti i do mjesec dana ranije jer se približavamo kraju 21. stoljeća.

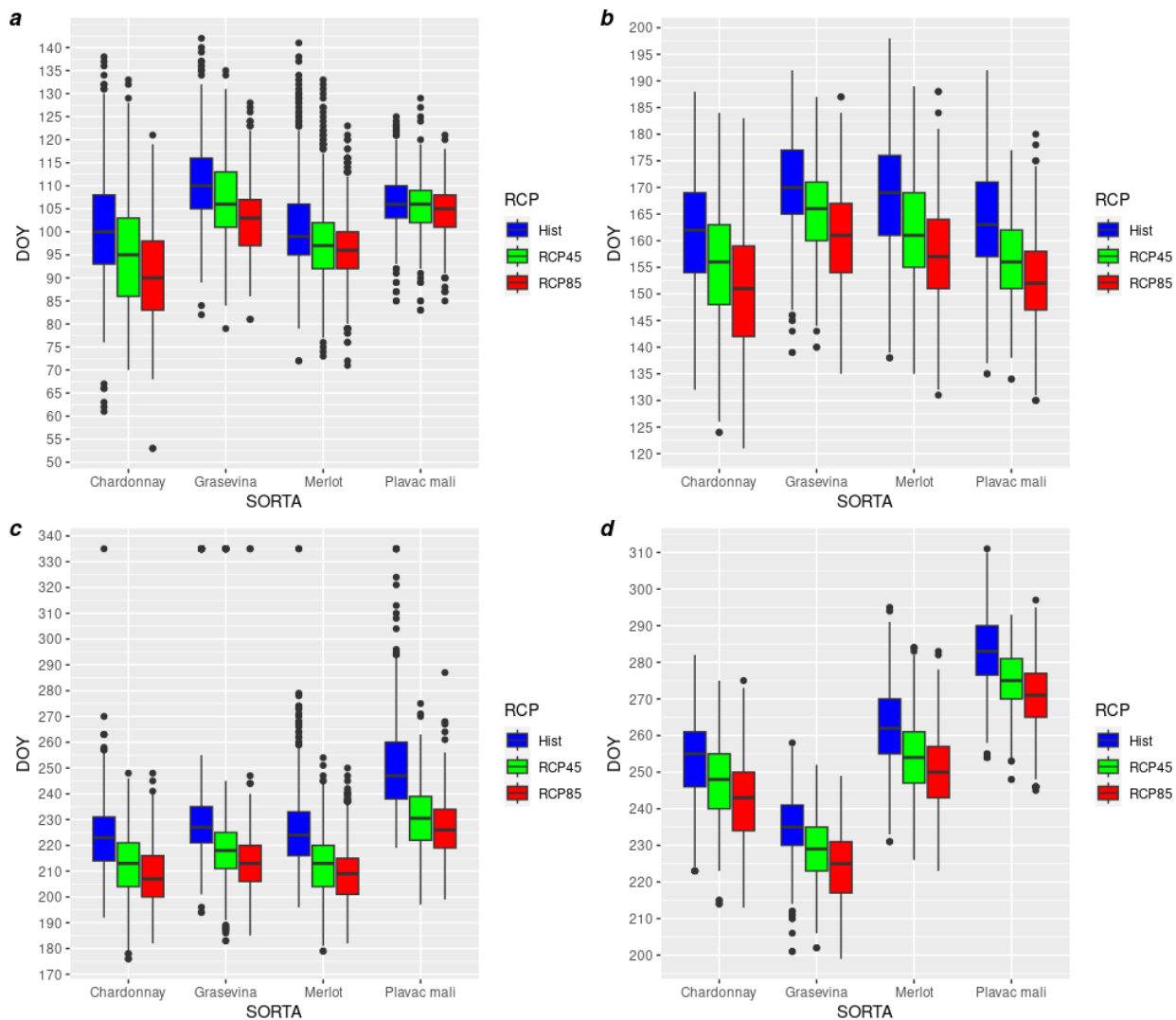
Statistički modeli združeno su analizirani i sa simulacijama regionalnog klimatskog modela ETHZ-CCLM-02 s prostornim korakom $0,02^\circ$ (Tablica 3.3). Poboljšanje razlučivosti ovog klimatskog modela u odnosu na modele iz EURO-CORDEX inicijative sa sobom povlači i kraća simulirana razdoblja. Zbog toga je analiza nužno rađena na 10-godišnjim intervalima; sadašnje klime (POC; 1999.-2009.) i 10 godina budućeg razdoblja (P2C; 2044.-2053.) za ekstremni scenarij RCP8.5. Rezultati pupanja ukazuju na očekivani raniji nastup od 5-10 dana ovisno o sorti (Slika 4.19). Pomak je najveći za 'Plavac mali'. Ono što je još vidljivije je veliki pomak u datumu berbe za 'Plavac mali' dobiven ETHZ-CCLM-02 modelom. Razlika medijana iz dva razdoblja (P2C-POC) prelazi i 20 dana te združeni modelski sustav daje naznaku za raniju berbu 'Plavca malog', i to početkom rujna.



Slika 4.19 Kutijasti dijagram nastupa četiriju fenoloških faza: (a) pupanje, (b) cvatnja, (c) šara i (d) berba dobivenih združenim korištenjem klimatskog modela ETHZ-CCLM-02 (Tablica 3.3) i statističkih modela GDD10 i GDD5 (Tablica 3.4) za razdoblje 1999.-2009. (plavo) i 2044.-2053. (crveno) i najpesimističniji scenarij RCP8.5.

4.3.3 *Nastup fenoloških faza primjenom modela STICS u budućim klimatskim uvjetima*

Osim statističkih modela, za procjenu promjena nastupa fenoloških faza u budućnosti korišten je i model STICS s parametrima dobivenim optimizacijom u sadašnjoj klimi i za odabrane sorte vinove loze. Rezultati modela STICS za bijele sorte prate rezultate dobivene združivanjem statističkih modela i klimatskih modela. Budući da tri regionalna klimatska modela nemaju pune nizove podataka (CCLM4_CLMcom-MOHC i SMHI-MOHC uzimaju da svaka godina ima 360 dana, a SMHI-IPSL da godina ima 365 dana bila ona prijestupna ili ne) model STICS nije se uspio združiti s navedenim klimatskim modelima. Ipak, ansambl od sedam regionalnih klimatskih modela (RCM-ova) daje dobru mogućnost usporedbe nastupa fenoloških faza u budućim i sadašnjim klimatskim uvjetima. Kod bijelih sorti, u razdoblju P2 (2041.-2070.) vidljivo je pomicanje medijana svih simulacija za sve četiri fenološke faze u odnosu na razdoblje P0 za 7-10 dana što je nešto manje od razlika koje su dali statistički modeli (Slika 4.17 i Slika 4.20). Za razliku od bijelih sorti, kod crnih sorti se ne vide velike razlike u P2 razdoblju za nastup pupanja što je suprotno onom što su dali statistički modeli (naročito za sortu 'Plavac mali' gdje je razlika medijana između razdoblja P2 i P0 bila veća od 20 dana za isti period, Slika 4.17 i Slika 4.20). Ipak u ovom slučaju, razumnije je dati veću težinu statističkim modelima koji su u ovom slučaju ipak imali veći koeficijent korelacije za pupanje u sadašnjoj klimi (osobito za 'Merlot', Tablica 4.3 i 4.4). Veće razlike ne vide se u modeliranju cvatnje koristeći model STICS ili statističke modele. Cvatnja u budućoj klimi modelirana je između 150. i 160. dana u godini za 'Chardonnay' za RCP4.5 scenarij i 145 do 160 dana za RCP8.5 scenarij neovisno o korištenju statističkih modela ili modela STICS u razdoblju P2 (Slika 4.17 i Slika 4.20). Datumi za cvatnju 'Graševine' nešto su kasniji od 'Chardonnaya' ali se isto podudaraju izlazi STICS i statističkih modela. Opet, najveće razlike između statističkih i modela STICS vidljive su za sortu 'Plavac mali' koja je u modelu STICS najlošije parametrizirana (Tablica 4.4, Slika 4.20). Najveće razlike između statističkih i modela STICS je u modeliranju datumima berbe. Iako i jedni i drugi prognoziraju u P2 razdoblju pomicanje berbe 10-20 dana ovisno o sorti (Slika 4.17 i 4.20) model STICS modelira berbu 10-ak dana kasnije u odnosu na statističke modele. Razlog tomu je što model STICS berbu definira i kada se u bobici nakupi dostupna količina vode, a ne koristi temperaturne sume. Korištenjem modela STICS i modela GDD može se ustvrditi da se očekuje promjena u nastupu svih fenoloških faza u budućnosti. Svi modeli ukazuju na promjene veće i od 10-ak dana za određene fenofaze.



Slika 4.20 Kutijasti dijagram nastupa četiriju fenoloških faza: (a) pupanje, (b) cvatnja, (c) šara i (d) berba združenim korištenjem klimatskih modela (Tablica 3.3) i biodinamičkog modela STICS za razdoblja P0 (1971.-2000., plava boja) te P2 (2041.-2070.) i dva klimatska scenarija: RCP4.5 (zeleno) i RCP8.5 (crveno).

4.4 Nastup pojave mraza u sadašnjim i budućim klimatskim uvjetima

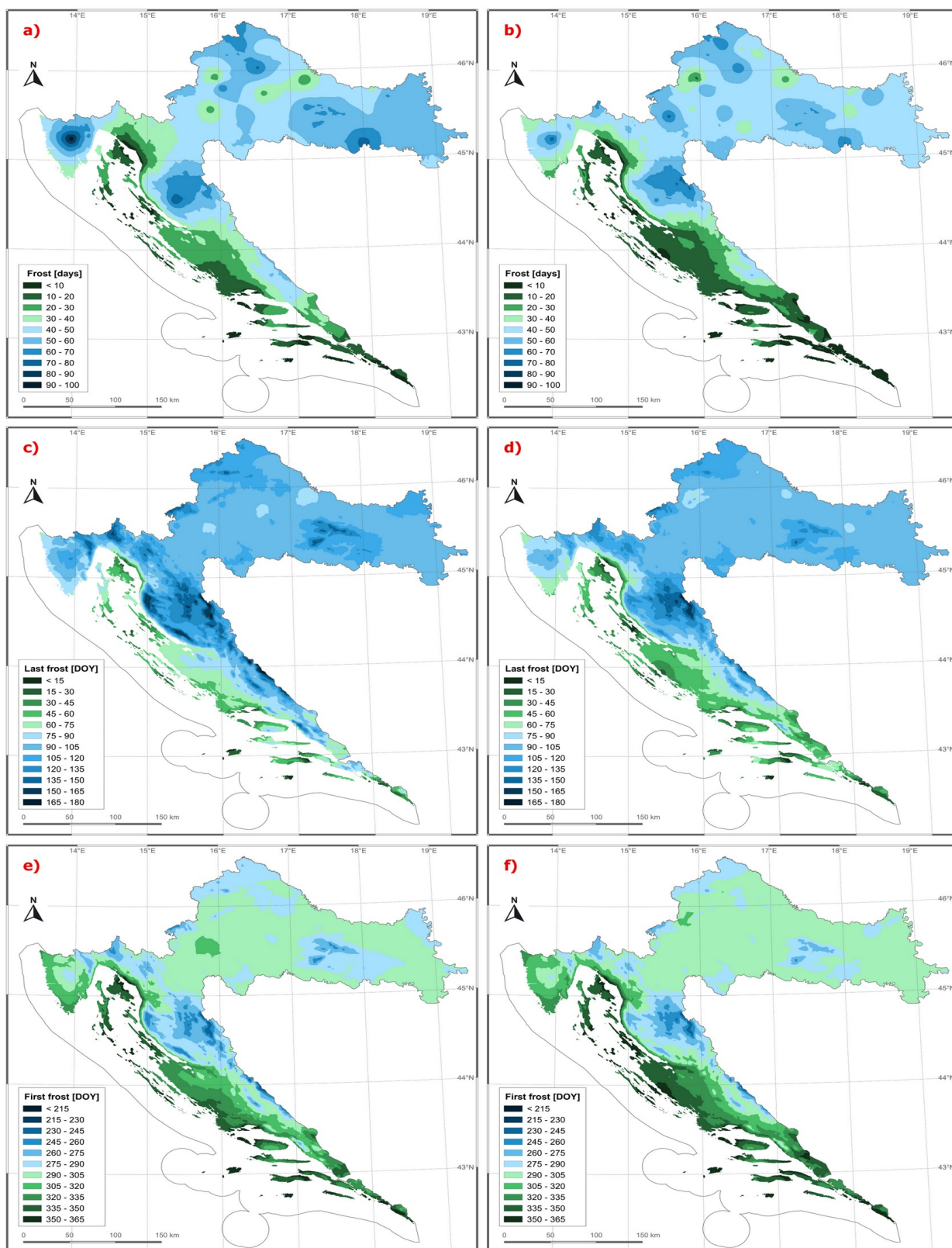
4.4.1 Rizik od nastupa mraza u sadašnjim klimatskim uvjetima

Hrvatske regije nisu podjednako ugrožene mrazom zbog klimatske raznolikosti Hrvatske. Najveći broj dana s mrazom zabilježen je u unutrašnjosti Istre, oko 90 dana godišnje ($\sim 45.3^\circ\text{N}$, 14°E na Slikama 4.20a,b za postaju Pazin). U kontinentalnom području prosječan godišnji broj dana s mrazom uglavnom je između 40 i 90 dana, dok u obalnim područjima ima i do 40 dana s mrazom u dva 20-godišnja razdoblja (Slike 4.21a, b). Primjetno je da je u gorskim dijelovima Hrvatske broj dana s mrazom isti kao i u istočnim dijelovima kontinentalne Hrvatske. Razlog manjeg broja dana s mrazom u planinskim područjima je taj što motritelji ne uočavaju mraz kada je tlo prekriveno snijegom. Upravo zbog toga planinska područja imaju mali broj dana s

mrazom u zimskim mjesecima i u rano proljeće. Također, evidentno je da u planinskom području imaju kratku vegetacijsku sezonu zbog male razlike između posljednjeg proljetnog dana s mrazom i prvog jesenskog dana s mrazom (Slike 4.21c-f). Smanjenje broja dana s mrazom u razdoblju 2001. – 2020. u odnosu na razdoblje 1981. – 2000. vidljivo je u priobalju, kao i u istočnom dijelu Hrvatske. Na ovim područjima uočava se da je u posljednjem razdoblju bilo 10-20 dana manje s mrazom. Smanjenje godišnjeg broja dana s mrazom zabilježeno je i u drugim zemljama. Kozminski i sur. (2021.) uočili su da je broj dana s mrazom u Poljskoj u višegodišnjem razdoblju (1971. – 2020.) od travnja do listopada pokazao značajno smanjenje, dok je broj dana s mrazom zabilježen u termičkoj vegetacijskoj sezoni prilikom čega srednje dnevne temperature zraka moraju biti iznad 5 °C, ostala nepromijenjena. Erlat i Turkes (2011.) ukazali su na opće smanjenje godišnjeg broja dana s mrazom na većini postaja u Turskoj u razdoblju 1950.-2010.

Osim smanjenja godišnjeg broja dana s mrazom, u Hrvatskoj je također vidljiv nešto raniji nastup zadnjeg proljetnog mraza tijekom kalendarske godine (Slike 4.21c i d). Slike 4.21c i d pokazuju mali rizik od pojave kasnog proljetnog mraza u priobalju, gdje se posljednji proljetni dan s mrazom javlja uglavnom do sredine ožujka. Rizik od pojave proljetnog mraza veći je u kontinentalnom području, gdje se, unatoč smanjenju broja dana u posljednjem razdoblju 2001.-2020., zadnji dan s mrazom u proljeće najčešće javlja sredinom travnja (Slika 4.21d). Gledajući kraj godine, prvi jesenski dan s mrazom u većem dijelu Hrvatske obično ne nastupa prije kraja listopada, što omogućuje dugu vegetacijsku sezonu (Slike 4.21e i f).

Slični datumi posljednjeg proljetnog mraza (od 4. travnja do 20. travnja), kao i opadajući trendovi (od -2,67 do -0,4 dana po desetljeću), uočeni su u Srbiji u razdoblju od 1961. do 2010. (Malinović-Miličević i sur., 2018.). Jasan i statistički značajan trend koji ukazuje na raniju pojavu posljednjeg proljetnog mraza također je uočen u Poljskoj u razdoblju 1961.-2020. (Graczyk i Szwed, 2020.).



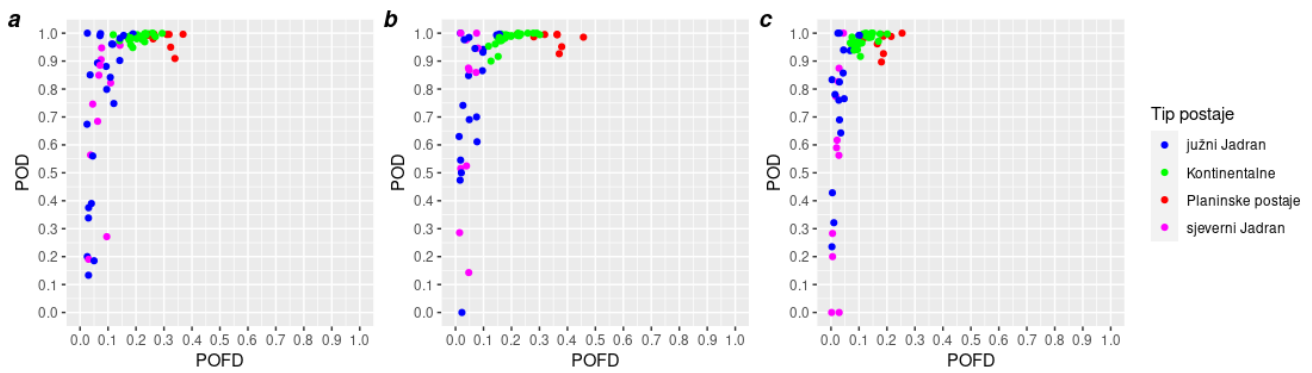
Slika 4.21 Prostorne raspodjele opaženih srednjih vrijednosti broja dana s mrazom u godini za razdoblja (a) 1981.-2000. i (b) 2001.-2020, posljednjeg dana s mrazom u prvoj polovici godine za razdoblja (c) 1981.-2000. i (d) 2001.-2020., i prvog dana s mrazom u drugoj polovici godine za razdoblja (e) 1981.-2000. i (f) 2001.-2020.

Ipak, ove promjene u pojavi mraza nemaju toliki učinak na smanjenje opasnosti od oštećenja uzrokovanih mrazom. Ma i sur. (2019.) su združenim korištenjem klimatskih podataka iz meteoroloških baza podataka i 1 489 000 fenoloških opažanja s postaja za 27 vrsta drveća s 5565 fenoloških promatračkih mjesta u Europi pokazali da biljne vrste čija je fenologija bila posebno osjetljiva na klimatsko zagrijavanje imaju tendenciju povećanja rizika od oštećenja mrazom. Cuxart i Guijarro (2010.) pokazali su da postoji značajan trend porasta temperature na otoku Mallorca, kao i skraćivanje sezone s danima s temperaturom ispod 0 °C i 7 °C. Nisu, međutim, uočili promjene odnosno negativan trend u pojavi prvog i zadnjeg zabilježenog dana s vrijednostima ispod 0 °C i 7 °C. S obzirom na očekivano daljnje povećanje temperature zbog klimatskih promjena, kao i njihov utjecaj na uzgoj pojedinih vrsta voća, očekuje se produljenje sezone bez mraza (Charalampopoulos i Droulia, 2022.). Upravo je zbog toga potrebno je pronaći metodu koja će na najbolji način moći opisati pojavu mraza, kako bi se mogla koristiti i na izlaznim rezultatima klimatskih modela i odrediti područja s povećanim ili smanjenim rizikom od mraza u budućnosti.

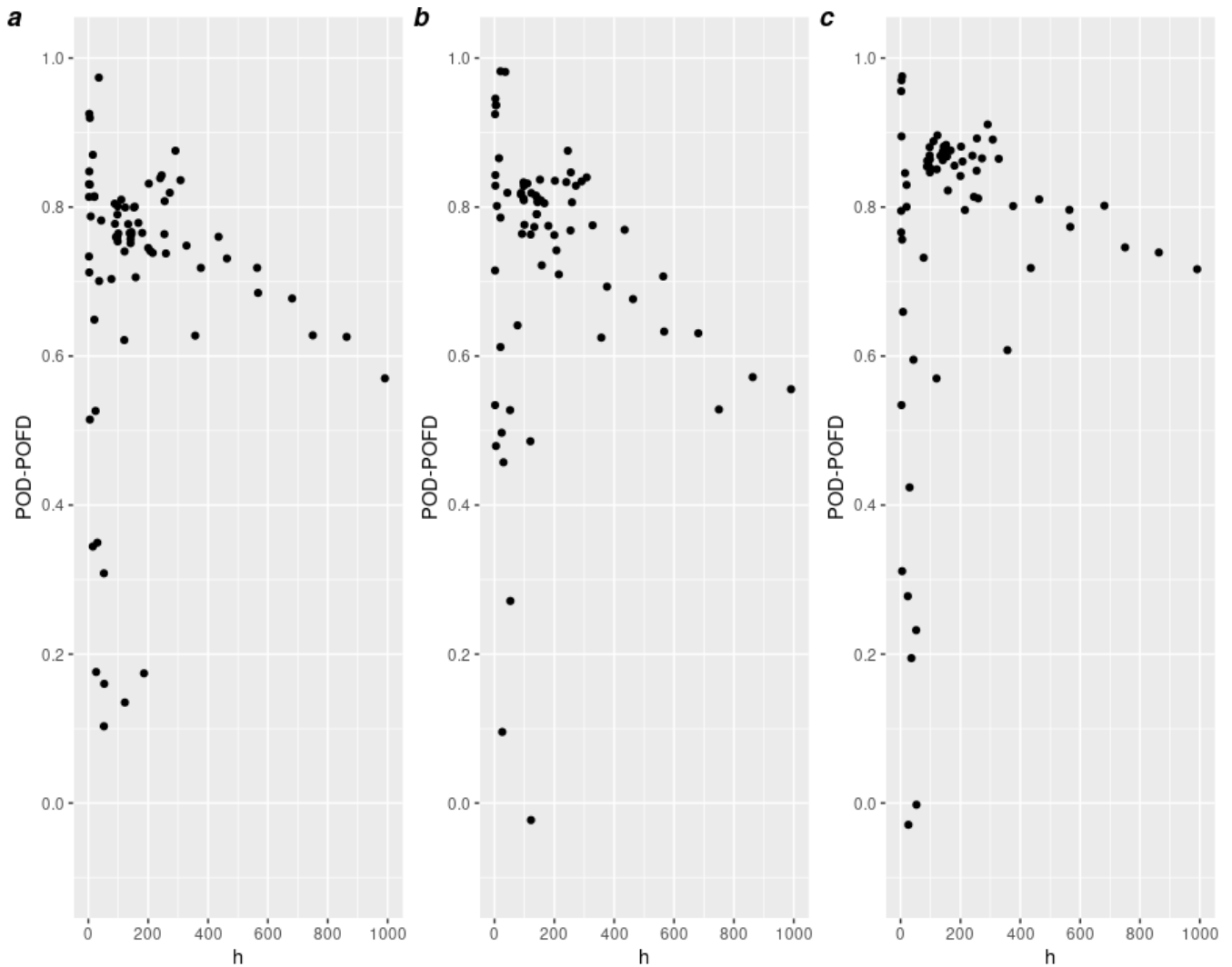
4.4.2 Validacija metoda za procjenu vjerojatnosti pojave mraza

Rezultat validacije 10 metoda, opisanih u Tablici 3.5, prikazan je u Tablici 4.5. Rezultati jasno pokazuju da metoda 7 (Tablica 3.5) ima najveći POD i razliku između POD i POFD. Isto tako, pokazalo se da korištenje temperature rosišta poboljšava metode detekcije mraza.

Rezultati metode 7 (Slika 4.21) pokazuju da kontinentalne postaje imaju visok POD ($> 0,9$) i relativno mali POFD ($< 0,3$). Za kontinentalne postaje POFD nešto je manji u jesen (Slika 4.22c) u odnosu na proljeće (Slika 4.22b) i tijekom cijele godine (Slika 4.21a). Metoda 7 ima visok POD i za planinske postaje ($> 0,9$), ali one također imaju relativno visok POFD (između 0,3 i 0,4). Visoke vrijednosti POFD-a posebno su prisutne u proljeće (Slika 4.22b).



Slika 4.22 POD i POFD za meteorološke postaje podijeljene u četiri kategorije: kontinentalne postaje (zeleno), planinske postaje (crveno), postaje sjevernog Jadrana (ružičasto) i postaje južnog Jadrana (plavo), za tri vremenska razdoblja: (a) tijekom cijele godine, (b) proljeće i (c) jesen.



Slika 4.23 Promjena razlike POD-POFD s nadmorskom visinom (h) u tri vremenska razdoblja: (a) tijekom cijele godine, (b) proljeće i (c) jesen.

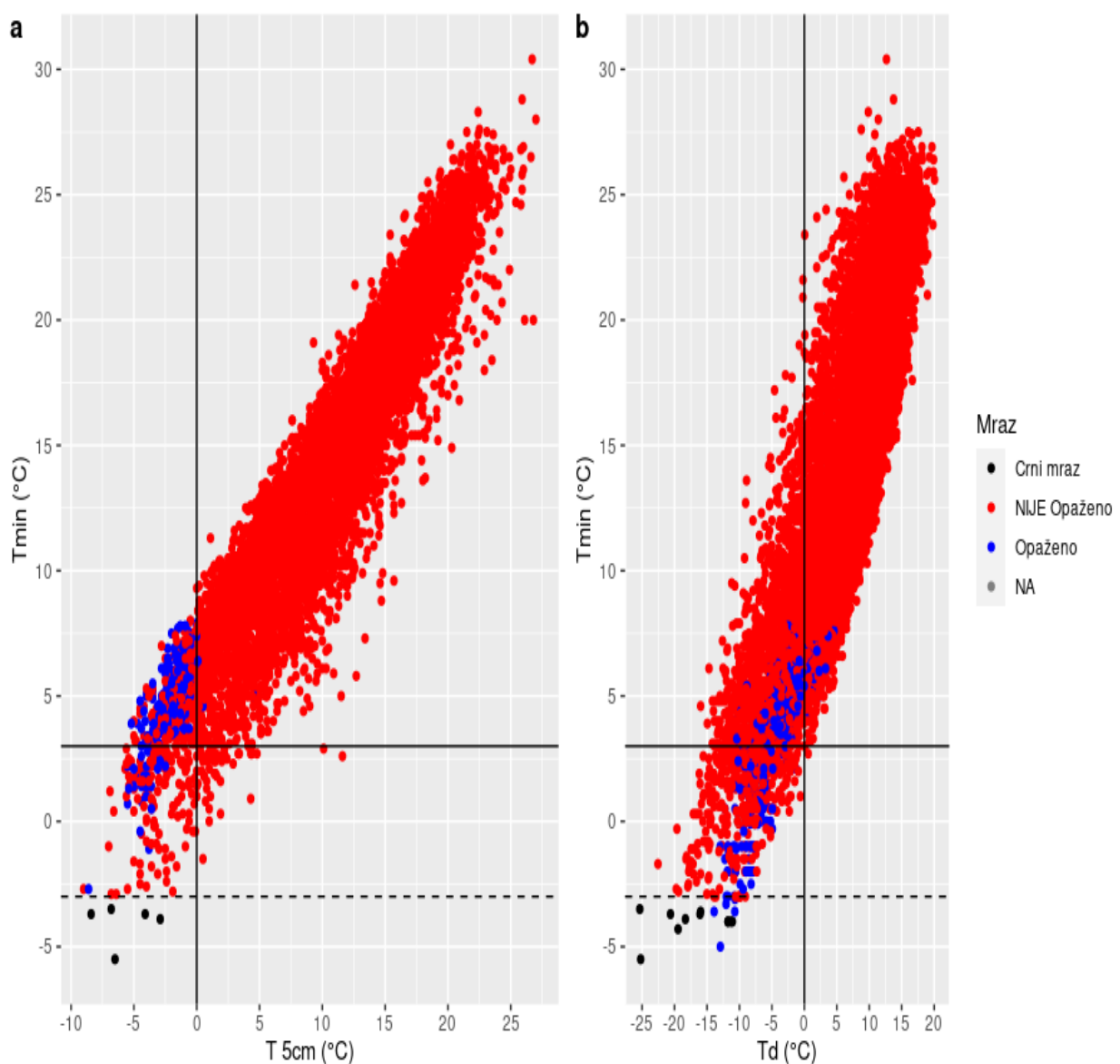
Tablica 4.5 Medijan POD i POFD, te njihova razlika (POD - POFD) u tri vremenska razdoblja, za 10 metoda detekcije mraza opisanih u Tablici 3.5, izračunano za podatke postaja DHMZ-a. Podebljane su vrijednosti najboljih rezultata.

METODA	CIJELA GODINA			PROLJEĆE			JESEN		
	POD	POFD	POD- POFD	POD	POFD	POD- POFD	POD	POFD	POD- POFD
1	0,42	0,05	0,34	0,28	0,01	0,25	0,32	0,01	0,30
2	0,77	0,09	0,65	0,67	0,03	0,61	0,69	0,02	0,66
3	0,34	0,04	0,22	0,10	0,01	0,08	0,24	0,01	0,21
4	0,61	0,06	0,51	0,47	0,02	0,43	0,52	0,01	0,48
5	0,45	0,05	0,37	0,30	0,01	0,27	0,36	0,01	0,33
6	0,91	0,13	0,74	0,90	0,10	0,76	0,83	0,05	0,77
7	0,98	0,18	0,76	0,98	0,15	0,79	0,96	0,08	0,85
8	0,89	0,13	0,73	0,85	0,08	0,74	0,82	0,04	0,76
9	0,95	0,15	0,76	0,93	0,10	0,78	0,92	0,06	0,84
10	0,97	0,17	0,76	0,96	0,13	0,8	0,95	0,08	0,85

Smanjenje razlike između POD i POFD za metodu 7, kako se nadmorska visina povećava, također je vidljivo na Slici 4.22, gdje na visinama većim od 400 m razlika naglo opada. Opet, ovaj pad je značajniji u proljeće (Slika 4.23b). Jedan od razloga za veliki POFD, posebno u proljeće, vjerojatno proizlazi iz nemogućnosti promatrača da razluče mraz kad je tlo prekriveno snijegom. Na tri od osam planinskih postaja, do 70 % lažnih alarma dogodilo se kada je tlo bilo prekriveno snijegom. Također se može primijetiti da se POD za metodu 7 smanjio za neke postaje blizu obale (Slika 4.22). Na obalnim postajama mraz se javlja kada je minimalna temperatura znatno iznad 3 °C, što značajno smanjuje POD vrijednosti na tim lokacijama bez obzira na položaj uz obalu (Slika 4.22). Minimalna temperatura na 10 cm iznad tla na tom je mjestu znatno niža,

ponekad i za 7 °C (npr., za Makarsku, Slika 4.24). Povećanje praga za minimalnu temperaturu, u ovom slučaju, poboljšalo bi rezultate za POD za metodu 7, ali bi također uvelike povećalo lažni alarm, a time i POFD, koji je za obalne postaje relativno nizak (do 0,2, Slika 4.22).

Slični rezultati vidljivi su i ako pogledamo rezultate SDT analize. Neovisno o godišnjem dobu, metoda 7 ima najveći indeks točnosti (d), s vrijednostima približno 3 (Tablica 4.6), što ukazuje na visoku uspješnost metode. Metoda 7 ovdje ima β vrijednosti malo ispod 1, nižu od ostalih metoda koje koriste temperaturu rosišta (metode 6-10 u Tablici 3.5). Ovo ukazuje na pristranost u procjeni događaja mraza (više vrijednosti pogodaka, ali i veće vrijednosti lažnih alarma). β je najbliža 1 za jesenske slučajeve (0,58).



Slika 4.24 Raspodjela dana s mrazom na južnojadranskoj postaji Makarska ovisno o a) T_{min} i T_{5cm} i b) T_{min} i T_d . Crne linije označavaju granične vrijednosti T_{min} i T_d ispod kojih dolazi do smrzavanja prema metodi 7 (Tablica 3.5). Isprekidana linija označava graničnu vrijednost za crni mraz (-3 °C).

Tablica 4.6 Medijan indeksa točnosti (d) i kriterija pristranosti (β) u tri vremenska razdoblja, za 10 metoda detekcije mraza opisanih u Tablici 3.5 izračunatih na postajama DHMZa. Podebljane su vrijednosti najboljih rezultata.

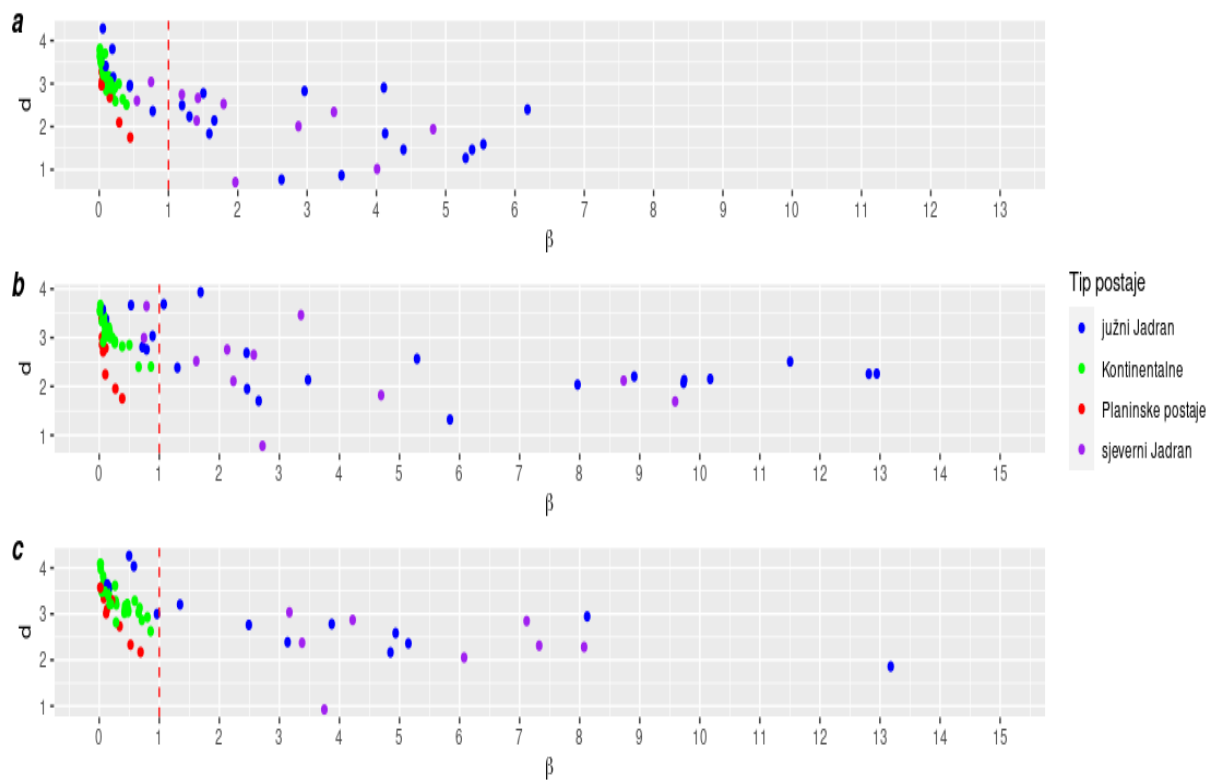
MODEL	CIJELA GODINA		PROLJEĆE		JESEN		
	d	β	d	β	d	β	
1		1.40	3.25	1.63	8.23	1.96	14.11
2		2.04	1.62	2.19	4.10	2.40	6.33
3		1.12	3.12	1.03	5.49	1.61	12.93
4		1.70	2.49	1.91	6.77	2.22	11.23
5		1.44	3.15	1.65	8.36	1.99	13.85
6		2.41	0.68	2.50	1.21	2.55	2.44
7		2.91	0.21	2.91	0.33	3.06	0.58
8		2.38	0.76	2.44	1.63	2.57	2.76
9		2.73	0.44	2.64	0.83	2.96	1.21
10		2.83	0.3	2.74	0.52	3.05	0.81

Također je vidljivo da za metodu 7 kontinentalne postaje imaju visoke vrijednosti d , uglavnom iznad 2,5, neovisno o godišnjem dobu, te β vrijednosti ispod 1 (Slika 4.25). Planinske postaje također imaju betu (β) manju od 1, što ukazuje na više pogodaka, ali i više lažnih alarma. Unatoč uspješnosti validacije metode 7 za kontinentalne i planinske postaje, mnogo je teže napraviti istu analizu za obalne postaje.

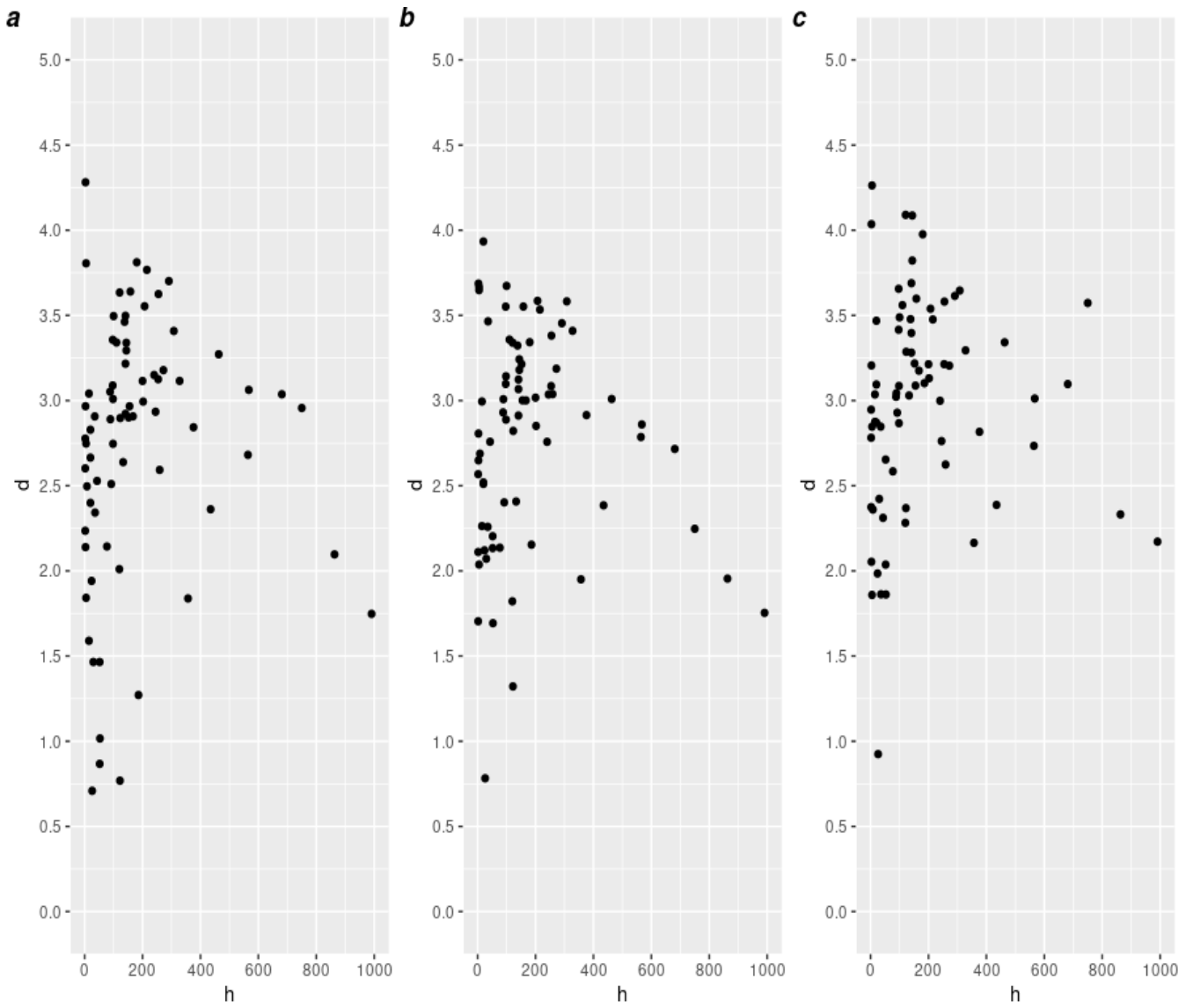
Testirana metoda 7 na postajama sjevernog i južnog Jadrana, općenito ima visoku stopu uspješnosti ($d > 2$), iako ne postoji jedinstveni obrazac za pristranost (Slika 4.25). Dok metoda 7 na nekim postajama precjenjuje pojavu mraza ($\beta < 1$), β vrijednosti su bliže 1 u usporedbi s kontinentalnim i planinskim postajama, što znači manje precjenjivanje. S druge strane, metoda 7 na istim postajama dala je podcijenjenost, koja može biti značajna na nekim južnojadranskim postajama ($\beta > 10$). Slično POD-POFD analizi s obzirom na nadmorsku visinu, značajan pad

indeksa točnosti d vidljiv je na visinama većim od 400 m (Slika 4.26). Precijenjena pojava mraza na kontinentalnim i planinskim postajama mogla bi biti posljedica snježnog pokrivača kad motritelji ne razlučuju mraz od snijega. Drugi razlog je taj što se tijekom ekstremno hladnih noći, s temperaturama $< -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $T_d < -10\text{ }^{\circ}\text{C}$, ne opažaju događaji mraza, koji se obično nazivaju 'crni' mraz (npr. Lalić i sur., 2018.) (npr. kontinentalna postaja Daruvar, Slika 4.27). 'Crni' mraz nastaje uslijed advekcije izrazito hladnog zraka (ispod $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) kada se vegetacija smrzne u zraku s niskim sadržajem vlage tako da se ne formiraju kristali leda (Robotham i sur., 1978.; Black, 1993.). Iako nevidljiv motriteljima, 'crni' mraz može uzrokovati ozbiljne štete na biljkama i drveću, kao što je i bilo 2016. i 2017. godine u kontinentalnom dijelu Hrvatske.

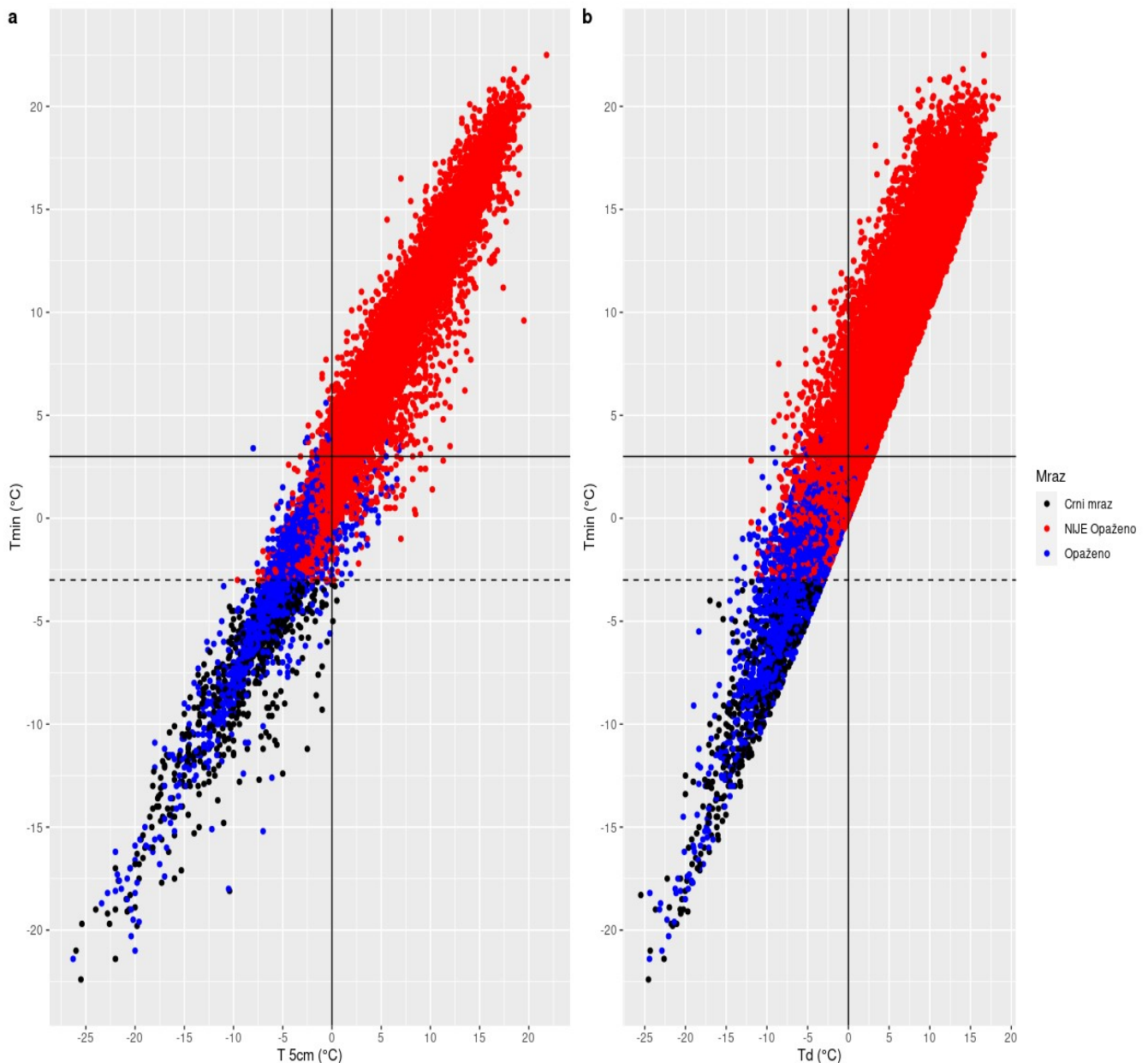
Ovi rezultati podudaraju se s rezultatima sličnih metoda u drugim istraživanjima. Lee i sur. (2016.) razvili su modele za detekciju nastanka mraza na šest postaja na Korejskom poluotoku koristeći logističku regresiju i metode strojnog učenja, uzimajući u obzir osam meteoroloških varijabli za razdoblje 1973.-2014. U njihovom slučaju, algoritam provođenja metode (eng. *Decision tree*) proizveo je bolje POD vrijednosti (0,73-0,87) sa stopom lažnih alarma (FAR) od 0,14-0,47. Knollhoff i sur. (2003.) koristili su temperaturu površine mosta, brzinu vjetera od 5 m, temperaturu zraka od 2 m i temperaturu rosišta iz pet lokacija informacijskog sustava vremenskih uvjeta za 21 mjesec zimske sezone (1995.-1998.) u Iowi, Sjedinjene Države, kao ulazni parametri u modelu nakupljanja inja. Pretpostavili su da se mora stvoriti određena debljina sloja mraza da bi bila vidljiva ljudima. Model je dao najbolje rezultate za debljinu sloja od 10^{-5} mm, s razlikom između POD i POFD od 0,769. Rozante i sur. (2020.) predložili su indeks za prognozu mraza u Brazilu, koji uzima u obzir glavne meteorološke varijable koje pogoduju ili ne pogoduju mrazu, težine pripisane tim varijablama, te srednje vrijednosti i standardne devijacije ovih varijabli, samo za slučajeve u kojima se javlja mraz, kako je definirano promatranje temperature koje je $\leq 6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kod njih su najbolji rezultati bili u Regiji 1 (POD u rasponu 0,6-0,8), koja se nalazi uglavnom u unutrašnjosti. U regiji 3, najbližoj obali, učinak indeksa smrzavanja (IG) bio je najmanje zadovoljavajući (POD $< 0,6$). Ovi rezultati slažu se s rezultatima naše metode 7, koja je dala najbolje rezultate za kontinentalne postaje, a performanse su nešto slabije na obalnim postajama. U našem slučaju za izračun T_d potrebni su podatci RH_{sr} i T_{min} koji su ujedno i izlaz svih klimatskih modela, kao i meteoroloških modela za numeričku prognozu vremena. Izračun T_d ne oduzima prostor i vrijeme pa omogućuje široku primjenu. Sve ovo ukazuje da je metoda 7 u Hrvatskoj dala slične ili bolje rezultate od ranije uvedenih metoda za detekciju mraza. Dodatna snaga metode 7 leži u računskoj jednostavnosti.



Slika 4.25 Vrijednosti indeksa točnosti (d) i β vrijednosti za meteorološke postaje podijeljene u četiri kategorije: kontinentalne postaje (zeleno), planinske postaje (crveno), postaje sjevernog Jadrana (ružičasto) i postaje južnog Jadrana (plavo), u tri kategorije vremenske razdoblja a) cijele godine, b) proljeće i c) jesen.



Slika 4.26 Promjena indeksa točnosti (d) s nadmorskom visinom u tri vremenska razdoblja a) tijekom cijele godine, b) proljeće i c) jesen.



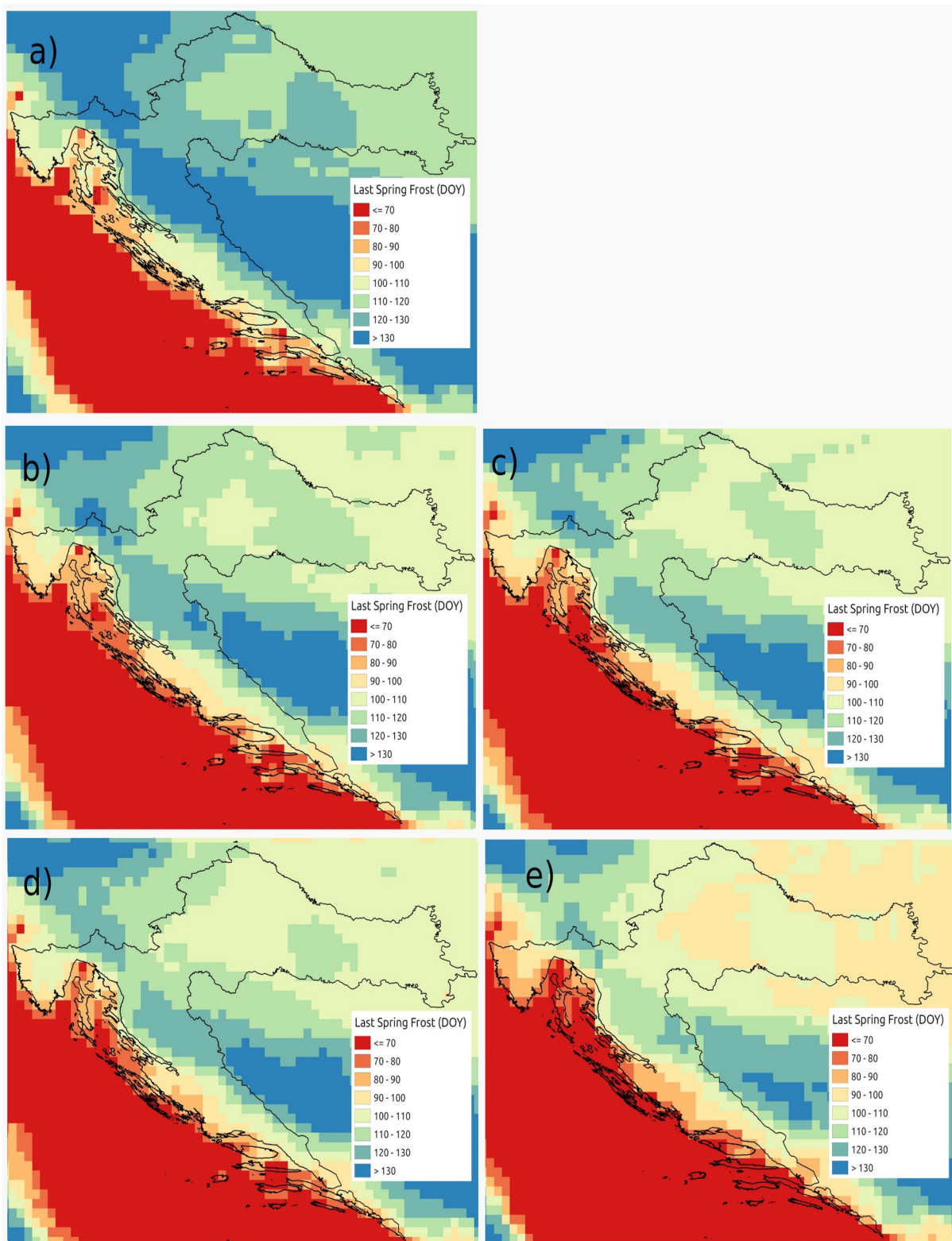
Slika 4.27 Raspodjela dana s mrazom na kontinentalnoj postaji Daruvar (plavi trokut na sl. 2) ovisno o a) minimalnoj temperaturi zraka (T_{min}) i minimalnoj temperaturi zraka na 5 cm visine iznad tla (T_{5cm}) i b) minimalnoj temperaturi (T_{min}) i temperaturi rosišta (T_d). Crne linije označavaju granične vrijednosti za T_{min} i T_d ispod kojih dolazi do mraza prema metodi 7 (vidi Tablicu 3.5). Isprekidana linija označava graničnu vrijednost za crni mraz ($-3\text{ }^{\circ}\text{C}$).

4.4.3 Očekivane promjene u nastupu mraza u budućim klimatskim uvjetima

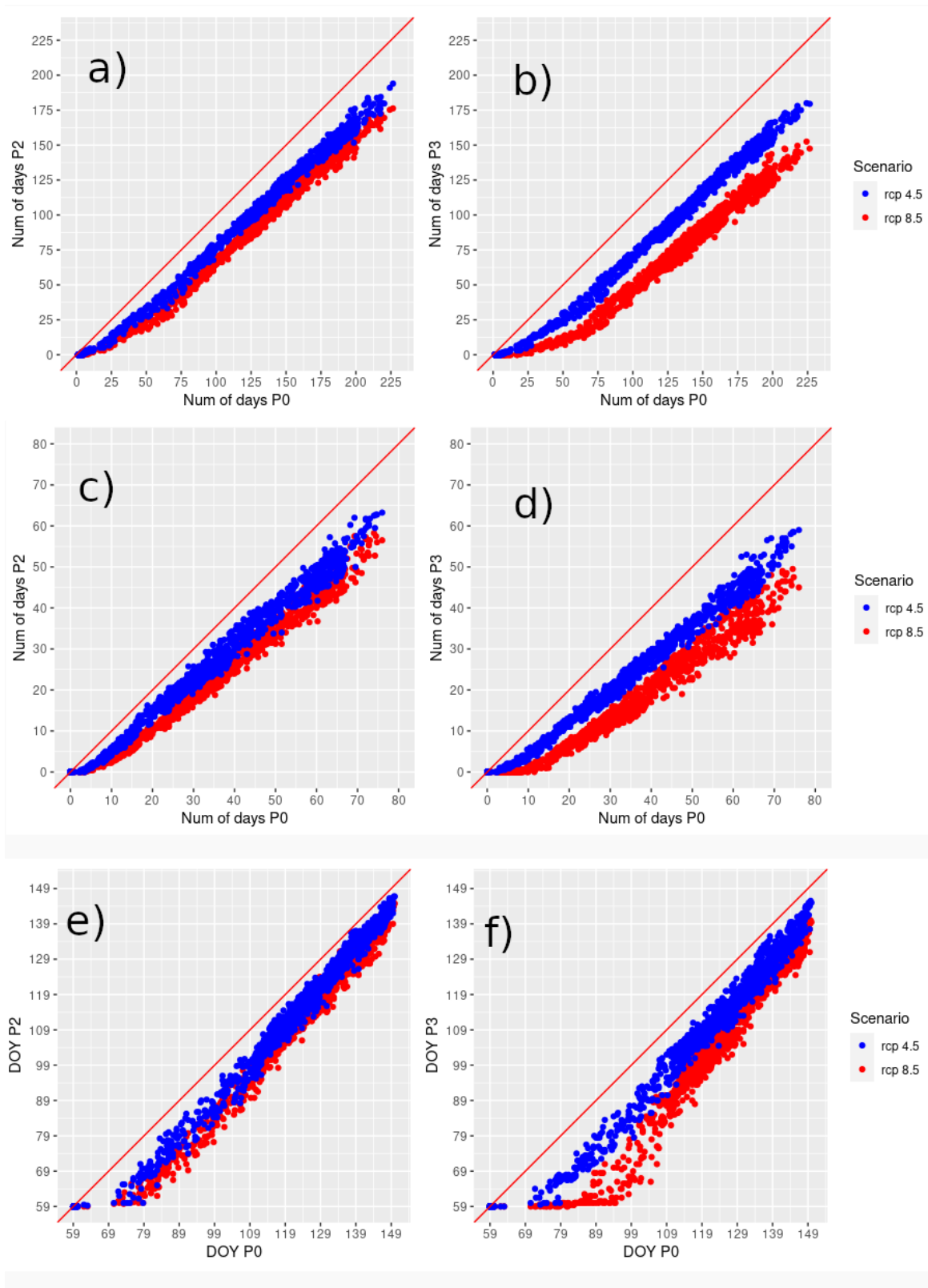
Zbog vidljivih pomaka u nastupu pupanja, kao i očekivanog nastavka u budućoj klimi prikazanog u poglavlju 4.3.2 i 4.3.3. za očekivati je povećanu opasnost od mraza u budućim klimatskim uvjetima. Zbog toga je potrebno provjeriti nastup zadnjeg proljetnog dana s mrazom u klimatskim razdobljima (PO, P2 i P3) kako bismo vidjeli očekivane promjene i mogli na vrijeme krenuti s prilagodbom uzgoja vinove loze. Metoda za procjenu rizika od mraza koja se u prošlom

potpoglavlju pokazala najboljom (metoda 7) korištena je za procjenu rizika od mraza, budući da mraz nije izlaz klimatskih modela. I ovdje su za povijesno i buduće razdoblje simulacije 10 RCM-ova s horizontalnom razlučivošću od 12,5 km, pokrenutih s pet GCM-a. prikazane su kao medijani.

Vidljivo je da u povijesnom (PO) razdoblju u kontinentalnim predjelima zadnji proljetni mraz nastupa poslije 110 dana u godini, odnosno nakon 15. travnja (Slika 4.28a), a posebno su ugrožena područja Karlovačke županije, ali i Požeška kotlina, jedno od značajnijih vinogradarskih područja u Hrvatskoj. Ovi rezultati odgovaraju opaženim zadnjim proljetnim danima s mrazom (Slike 4.20c i d). U obalnim područjima u istom razdoblju zadnji dan s mrazom uglavnom se događa prije 15. ožujka te mraz ne predstavlja veliku opasnost za vinovu lozu na tom području. U budućoj klimi vidimo pomicanje zadnjeg proljetnog dana s mrazom prema početku godine. U P2 razdoblju za kontinentalne postaje proljetni mraz uglavnom nastupa početkom travnja, neovisno o RCP scenariju. Najugroženija područja i dalje ostaju ona uz granicu sa Slovenijom, Požeška dolina i Karlovačka županija. Značajno pomicanje zadnjeg dana s mrazom prema početku godine događa se u P3 razdoblju, osobito za RCP 8.5 scenarij, gdje je zadnji proljetni dan s mrazom u većini kontinentalnog područja projiciran do kraja ožujka. Ovi rezultati vidljivi su i promatrajući Q-Q grafove zadnjeg proljetnog dana (Slika 4.29). Osim smanjenja broja dana s mrazom u budućoj klimi (i do 50 dana manje u P3 razdoblju u odnosu na PO gledajući RCP8.5 scenarij), prema klimatskim simulacijama očekuje nas i smanjenje broja dana s mrazom u proljeće, ali i pomicanje zadnjeg proljetnog dana s mrazom prema početku godine (Slike 4.29e i f). I dok je u P2 razdoblju taj pomak dosta uniforman (oko 10 dana za RCP 4.5 scenarij i 15 dana za RCP 8.5 scenarij; Slika 4.29e) u P3 razdoblju je ono najveće za područja u kojima mraz nastupa do 130. dana u godini (Slika 4.29f). Upravo su to obalna područja i područja nižih nadmorskih visina kontinentalne Hrvatske gdje se tradicionalno uzgaja vinova loza. Gledajući ove rezultate očekivali bismo smanjenu opasnost nastupa mraza u budućoj klimi, ali ovi rezultati trebaju se sagledati i u situaciji očekivanog sve ranijeg nastupa pupanja opisanog u poglavljima 4.3.2. i 4.3.3.



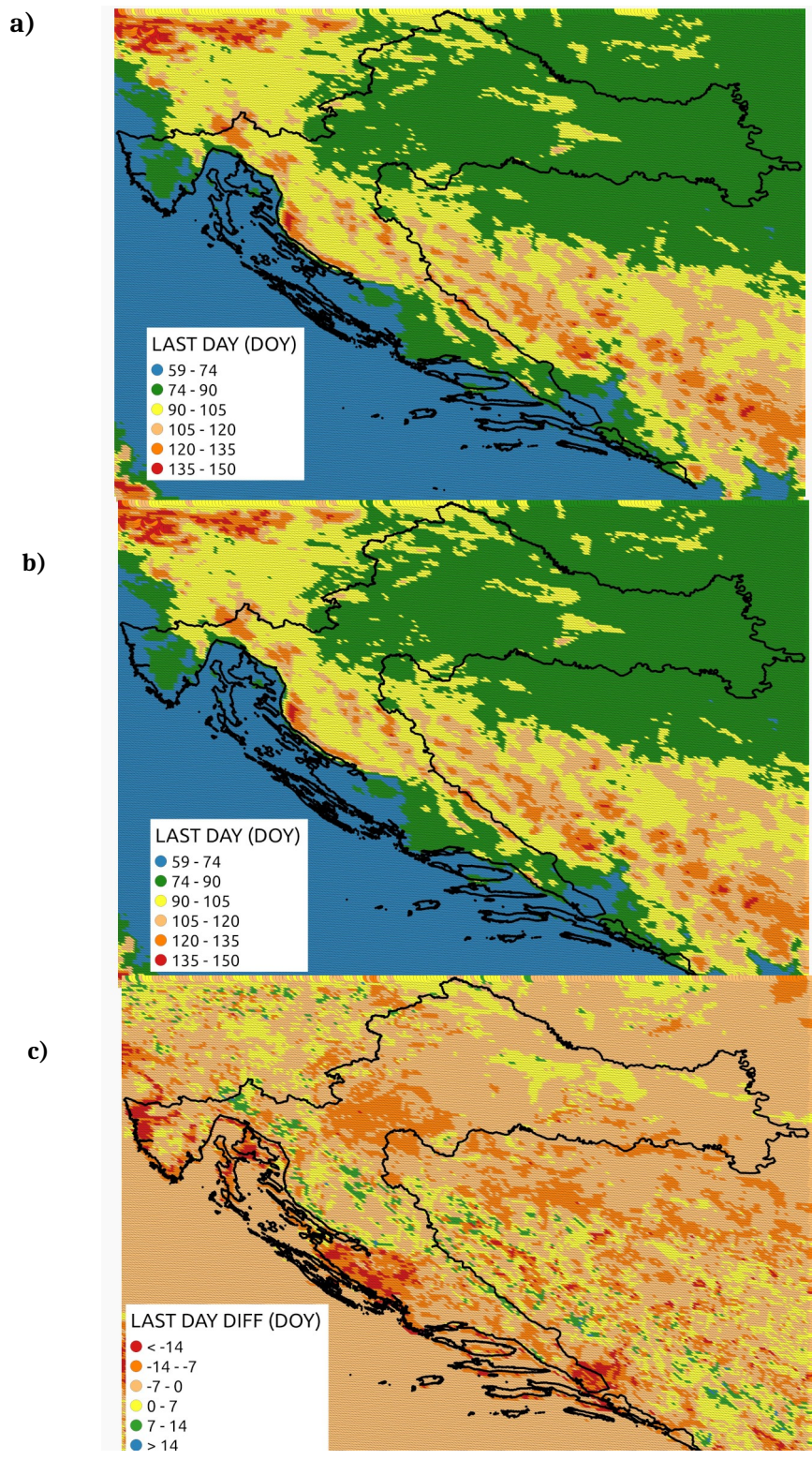
Slika 4.28 Prostorne raspodjele zadnjeg dana s mrazom dobivena metodom 7 (vidi Tablicu 3.5) kao medijan 10 klimatskih simulacija (vidi Tablicu 3.3) za a) razdoblje P0 (1971.-2000.) b) razdoblje P2 (2041.-2070.) i RCP scenarij RCP4.5 c) razdoblje P2 (2041.-2070.) i RCP scenarij RCP8.5 d) razdoblje P3 (2071.-2100.) i RCP scenarij RCP4.5 i e) razdoblje P3 (2071.-2100.) i RCP scenarij RCP8.5.



Slika 4.29 Q-Q dijagrami a) i b) godišnjeg broja dana s mrazom, c) i d) broja dana s mrazom u proljeće, e) i f) zadnjeg proljetnog dana s mrazom za dva RCP scenarija: RCP4.5 (plavo) i RCP8.5 (crveno) i dva razdoblja; P0 (1971.-2000.) naspram P2 (2041.-2070.) (lijevo) i P0 naspram P3 (2071.-2099.) (desno). Crna puna linija je linija 1:1.

Osim klimatskih modela s prostornom razlučivošću od 12,5 km za prognozu mraza u budućoj klimi korišten je i COSMO model dostupan na finijoj prostornoj mreži od 0,02°. Zbog

znatno finijeg prostornog koraka ovaj model nudi mogućnost bolje predikcije mraza jer je jedna od karakteristika mraza njegova lokalnost. Korištena je ista metoda kao u prethodnom poglavlju (metoda 7 iz tablice 3.4), a prikazane su raspodjele vjerojatnosti zadnjeg proljetnog nastupa mraza u razdobljima 1999.-2009. i 2044.-2053. Rezultati pokazuju da će se očekivani zadnji proljetni dan s mrazom u budućoj klimi pomaknuti u većem dijelu Hrvatske do tjedan dana ranije u odnosu na povijesno razdoblje koje je dobra mjera sadašnjih klimatskih uvjeta. Taj je pomak i nešto veći (do 14 dana) u Karlovačkoj županiji (Slika 4.30c). Odnosno, prema rezultatima modela, u budućoj će klimi zadnji mraz uglavnom nastupiti prije početka travnja, što će i dalje predstavljati veliku opasnost za vinovu lozu. Vidljivo je to ako promotrimo nastupe pupanja za 'Chardonnay' u istom razdoblju (2044.-2053., Slika 4.19) gdje se vidi da je medijan pupanja ispod 90. dana u godini. Medijan nastupa 'Graševine' nešto je kasnije u godini, ali vrlo blizu nastupu zadnjeg mraza. Ovo nagoviješta veću opasnost od mraza u budućem razdoblju, nego u povijesnom (1999.-2009.).



Slika 4.30 Prostorne raspodjele zadnjeg proljetnog dana s mrazom modeliranih metodom 7 (Tablica 3.5) uz upotrebu ETHZ modela za razdoblje a) 1999.-2009. i b) 2044.-2053. te c) medijana razlike u nastupima zadnjeg dana s mrazom u ta dva razdoblja.

5 Zaključak

Ovim se istraživanjem po prvi put prikazuje kako su u novijim razdobljima klimatske promjene u Hrvatskoj utjecale na promjene fenoloških faza vinove loze i na vinogradarstvo općenito. Indeks GDD pokazuje da su je u zadnjih 30 godina došlo do promjena u gotovo svim vinogradarskim regijama. Kao rezultat ove promjene u područjima gdje se vinova loza nije uzgajala, sada postoji mogućnost uzgoja nekih sorti. Pozitivan trend primjećuje se kod minimalnih, maksimalnih i srednjih dnevnih temperatura zraka. Osim toga, dolazi do preraspodjele oborine, posebno na obalnim postajama gdje se ljetna oborina smanjuje, a povećava se u ožujku, na samom početku vegetacijskog ciklusa. Ove promjene značajno utječu na promjene u nastupu fenoloških faza pa je na pojedinim postajama primjetan trend njihovog ranijeg pojavljivanja. Ujedno je uočeno smanjenje trajanja između pojedinih fenoloških faza kod pojedinih sorti. Pupanje sada često počinje u ožujku i stvara pojačanu osjetljivost vinove loze na kasni proljetni mraz, dok se sama berba odvija ranije. Iako se trendovi mogu uočiti bez obzira na sortu, bijele sorte pokazuju veći negativan trend berbe (veće pomicanje prema početku godine), posebice 'Graševina'. Velika razlika u trendu uočena je u berbi 'Merlota' između kontinentalnih (-22,9 dana/10 godina u Belju i -12,9 dana/10 godina u Kutjevu) i obalnih postaja (od -2,8 do 6,1 dana/10 godina), što ukazuje na veći utjecaj klimatskih promjena u hladnijim vinorodnim krajevima. Ranijom berbom u rujnu potencijalno se smanjuje mogućnost oštećenja plodova obilnom kišom i ranim jesenskim mrazom te ukazuje da bi temperaturne promjene mogle biti povoljne za uzgoj nekih crnih sorti na lokacijama s kontinentalnim klimatskim obilježjima.

Drugi cilj istraživanja bio je razviti statistički pristup za određivanje početka fenoloških stadija korištenjem GDD praga i metode višestruke linearne regresije. Modeli temeljeni na GDD pragu postigli su dobre rezultate u određivanju nastupa svih fenoloških stadija. Modeli za fenološke faze pupanja i cvatnje koji ne uzimaju u obzir lokaciju i promatraju sorte općenito dali su bolje rezultate. Međutim, za šaru i berbu to nije slučaj, jer akumulirana toplina određuje svojstva grožđa koja se žele postići. Multilinearni regresijski modeli nisu donijeli nove značajke niti bolje rezultate od modela na temelju GDD-a. To može značiti da početak fenoloških faza ne mora nužno zadovoljiti linearnu ovisnost o meteorološkim elementima ili da ta povezanost nije

tako jednoznačna. Ipak, dobri rezultati ovih modela potvrđuju zaključak da su meteorološki parametri glavni pokretači fenoloških faza te da temperaturne promjene u velikoj mjeri mogu biti razlog promjena fenoloških faza. Osim statističkih modela, u ovoj studiji prvi puta je korišten i biodinamički model STICS. Rezultati modela STICS ukazuju na mogućnost njegova korištenja za analizu fenoloških faza na ovom prostoru. Nakon obavljene parametrizacije za svaku pojedinu lokaciju i odabrane sorte, model STICS rekonstruirao je datume nastupa fenoloških faza s dosta visokim indeksom točnosti i koeficijentom korelacije, pogotovo za bijele sorte. Rezultati ovih analiza ukazuju na mogućnost daljnjeg korištenja i modela STICS i modela GDD-a s pragom 5 °C i 10 °C za prognozu fenoloških faza u budućim klimatskim uvjetima.

Treći cilj bio je pomoću klimatskih modela ukazati na očekivane promjene u bioklimatskim indeksima, ali i nastupima fenoloških faza u budućoj klimi. Indeksi su izračunati po prvi put za Hrvatsku iz regionalnih klimatskih modela (RCM-a) s prostornom razlučivošću od 0,11°. Skup od 10 klimatskih simulacija korišten je za buduće klimatske projekcije pomoću dva emisijska scenarija, umjereni (RCP4.5) i ekstremni (RCP8.5). Osim toga korišten je model ETHZ-CCLM-02 s prostornom razlučivošću od 0,02°. Prostorne raspodjele temperaturnih indeksa (GST, GDD, HI i CI) za oba scenarija ukazuju na daljnje zagrijavanje. Razlike između dvaju razdoblja P2 (2041.–2070.) i P0 (1971.–2000.) jasno su pokazale da se neki indeksi pomiču prema toplijim klasama unutar svoje raspodjele. To manje dolazi do izražaja u sjevernom području, a više prema istoku Panonskog bazena te prema središnjem i južnom dijelu obale Jadrana. Vrijednosti indeksa DI-a, kao mjere deficita vode, upućuju na daljnji nedostatak vlage u tlu i sušne uvjete (osobito na jugu). Ovo smanjenje dostupnosti vode u tlu je veće u ekstremnom scenariju kako se približavamo kraju 21. stoljeća. Povećanje temperature i promjene u zalihama vode u tlu utjecat će i na nastupe fenoloških faza u budućnosti. Testirani statistički modeli (modeli na bazi GDD-a) i model STICS korišteni su i za određivanje nastupa fenoloških faza u budućnosti. Rezultati modela ukazuju na daljnje pomicanje fenoloških faza prema početku godine (raniji početak), s najvećim pomacima za berbu. To će rezultirati daljnjim skraćivanjem razdoblja između pupanja i berbe, ali i berbama u vrućim mjesecima (kolovozu i početku rujna) što bi sa sobom moglo donijeti i dodatne promjene u karakteristikama vina. Osim toga, modeli sugeriraju pomicanje nastupa pupanja vinove loze prema početku ožujka što donosi povećanu mogućnost oštećenja pupova mrazom. U budućoj klimi također dolazi do ujednačavanja nastupa fenoloških faza za promatrane četiri sorte vinove loze, a to je posebno naglašeno u P3 razdoblju (2071.-2100.).

Četvrti cilj bio je testirati 10 metoda za detekciju mraza na temelju opažanja u Hrvatskoj. Pet metoda prethodno je korišteno, ali nije testirano u drugim istraživanjima, dok je pet njih uvedeno u ovom istraživanju. Rezultati ove studije pokazuju da izračunavanje temperature rosišta korištenjem minimalne dnevne temperature značajno povećava točnost prognoze

nastupa mraza. Kombinacija minimalne dnevne temperature i temperature rosišta izračunate korištenjem srednje dnevne i minimalne temperature pokazala se kao najbolji pokazatelj detekcije dana s mrazom. Prag od 3 °C za minimalnu temperaturu i 0 °C za temperaturu rosišta dao je najbolje rezultate za pojavu nastanka prizemnog mraza, s najvišim POD vrijednostima i razlikom između POD i POFD bez obzira na godišnje doba (proljeće, jesen ili tijekom cijele godine). Rezultati su posebno dobri za kontinentalno područje, gdje je $POD > 0,9$. Dobra prognoza mraza u kontinentalnom području od naročite je važnosti jer se tamo odvija najveći udio poljoprivrednih aktivnosti u Hrvatskoj. Također, rezultati teorije detekcije signala (SDT) pokazuju najbolje rezultate za ovu metodu. Prostorno-vremenska raspodjela dana s mrazom pokazuje da se broj dana s mrazom u većini područja Hrvatske u razdoblju 2001.-2020. blago smanjuje u odnosu na 1981.-2020. U novijem razdoblju vidljivo je i lagano pomicanje zadnjeg proljetnog mraza prema početku godine (raniji nastup). Svi ovi rezultati pokazuju da je metoda 7 ($T_{min} < 3\text{ °C}$ i $T_d < 0\text{ °C}$) dobra metoda detekcije mraza kad su izvori podataka ograničeni, što obično i jesu. Vrlo velike vrijednosti vjerojatnosti detekcije i indeksa točnosti, kao i pouzdana prognoza područja s povećanim rizikom od mraza, te dobra analiza promjena u broju dana s mrazom i zadnjih pojava mraza u proljeće, ukazuju na mogućnost korištenja ove metode i u budućnosti. Uvođenje nove metode za detekciju mraza omogućilo je prvu cjelovitu izradu klimatološke analize nastupa mraza u budućim klimatskim uvjetima. Rezultati ukazuju na manji broj dana s mrazom u budućnosti, kao i na raniju pojavu zadnjeg proljetnog dana s mrazom početkom godine (oko 10 dana za RCP 4.5 scenarij i 15 dana za RCP 8.5 scenarij za P2 razdoblje). Ovakvi pomaci omogućit će raniju sjetvu nekih poljoprivrednih kultura (poput npr. kukuruza ili nekih vrsta povrtnih kultura). U slučaju voćaka, pa tako i vinove loze, moguć je isti ili veći rizik od šteta jer rezultati ukazuju na veće pomake u pupanju nego u nastupu zadnjeg mraza.

Ova radnja istaknula je određene probleme u vinogradarstvu u Hrvatskoj, kao i izazove s kojima će se vinogradari susresti u budućnosti. Prvi problem je neadekvatna administrativna podjela vinogradarskih zona u Hrvatskoj. Prema hrvatskim (i EU) propisima svaka vinogradarska zona ima propisanu dopuštenu gornju granicu za šećer u moštu i alkohol u proizvodnji vina. Trenutna klimatološka situacija ukazuje na potrebu prelaska vinogradarske regije Središnja bregovita Hrvatska u višu zonu kako bi omogućila proizvodnju vina s više alkohola. Ujedno su to i preporuke nedavno završenog projekta CroViZone (<https://www.hapih.hr/wp-content/uploads/2023/05/Prilagodba-vinogradarskog-sektora-u-Hrvatskoj-klimatskim-promjenama.pdf>). Ako se daljnje zagrijavanje i nastavi, potrebno je uzeti u obzir duljinu sušnih razdoblja i daljnje zatopljanje. To ukazuje na potrebu daljnje provjere vinogradarskih zona u skorijoj budućnosti te na potrebu praćenja fenologije, ali i meteoroloških parametara na postajama u vinogradima. Dnevna meteorološka i fenološka promatranja u vinogradima mogu poboljšati modele i smanjiti pogreške u prognozama. Potrebno je također

vidjeti koliko drugi parametri utječu na sam fenološki ciklus (poput vrste tla, vodnog kapaciteta, starosti i bolesti vinograda). Trendovi u nastupu pupanja, kao i očekivano ranije pupanje u budućoj klimi, sa sobom nose nove izazove u obrani vinograda od mraza. Zato će od velike važnosti biti obrazovanje vinogradara o metodama koje bi im omogućile usporavanje vegetacije, sporije sazrijevanje grožđa, ali i obranu od mraza.

Literatura

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. i Smith, M.: Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrig. and Drain. Paper 56, 300, Food and Agric. Orgn. of the United Nations, Rim, Italija, 1998.

Ban, N., Schmidli, J., i Schär, C.: Evaluation of the convection-resolving regional climate modeling approach in decade-long simulations, *J Geophys Res Atmos*, 119, 7889–7907, <https://doi.org/10.1002/2014JD021478>, 2014.

Ban, N., Schmidli, J., i Schär, C.: Heavy precipitation in a changing climate: Does short-term summer precipitation increase faster?, *Geophys Res Lett*, 42, 1165–1172, <https://doi.org/10.1002/2014GL062588>, 2015.

Belušić, A., Prtenjak, M. T., Güttler, I., Ban, N., Leutwyler, D., i Schär, C.: Near-surface wind variability over the broader Adriatic region: insights from an ensemble of regional climate models, *Clim Dyn*, 50, 4455–4480, <https://doi.org/10.1007/S00382-017-3885-5/METRICS>, 2018.

Belušić Vozila, A., Güttler, I., Ahrens, B., Obermann-Hellhund, A., i Telišman Prtenjak, M.: Wind over the Adriatic region in CORDEX climate change scenarios, *J Geophys Res Atmos*, 124, 110–130, <https://doi.org/10.1029/2018JD028552>, 2019.

Beniston, M., Stephenson, D. B., Christensen, O. B., Ferro, C. A. T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T., i Woth, K.: Future extreme events in European climate: An exploration of regional climate model projections, *Clim Change*, 81, 71–95, <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9226-z>, 2007.

Berry, J. i Bjorkman, O.: Photosynthetic response and adaptation to temperature in higher Plants, *Annu Rev Plant Physiol* 31, 491–543, <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.PP.31.060180.002423>, 2003.

Black, P. B.: Advances in Bioclimatology, Vol. 2: The Bioclimatology of Frost. Its Occurrence, Impact and Protection, *J Environ Qual*, 22, 635–635, <https://doi.org/10.2134/JEQ1993.00472425002200030036X>, 1993.

Bock, A., Sparks, T., Estrella, N., i Menzel, A.: Changes in the phenology and composition of wine from Franconia, Germany, *Clim Res*, 50, 69–81, <https://doi.org/10.3354/cr01048>, 2011.

Bock, A., Sparks, T. H., Estrella, N., i Menzel, A.: Climate-induced changes in grapevine yield and must sugar content in Franconia (Germany) between 1805 and 2010, *PLoS One*, 8, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0069015>, 2013.

Bonacci, O., Andrić, I., Vrsalović, A., i Bonacci, D.: Precipitation Regime Changes at Four Croatian Meteorological Stations, *Atmosphere*, 12, 885, <https://doi.org/10.3390/ATMOS12070885>, 2021.

- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussi re, F., Cabidoche, Y. M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudill re, J. P., H nault, C., Maraux, F., Seguin, B., i Sinoquet, H.: An overview of the crop model Stics, *Eur J Agron*, 18, 309–332, [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00110-7](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00110-7), 2003.
- Brooks, H. E.: Tornado-warning performance in the past and future: A Perspective from Signal Detection Theory, *Bull Am Meteorol Soc*, 85, 837–844, <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-6-837>, 2004.
- Broecker, W. S.: Climatic Change: Are We on the Brink of a Pronounced Global Warming?, *New Series*, 189, 460–463, 1975.
- Buizza, R., Petrolia gis, T., Palmer, T., Barkmeijer, J., Hamrud, M., Hollingsworth, A., Simmons, A., i Wedi, N.: Impact of model resolution and ensemble size on the performance of an Ensemble Prediction System, *QJR Meteorol Soc*, 124, 1935–1960, <https://doi.org/10.1002/QJ.49712455008>, 1998.
- Caffarra, A. i Eccel, E.: Increasing the robustness of phenological models for *Vitis vinifera* cv. Chardonnay, *Int J Biometeorol*, 54, 255–267, <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0277-5>, 2010.
- Carbonneau, A.: *Ecophysiologie de la vigne et terroir, u: Terroir Zonazione Viticoltura: trattato internazionale*, editor: Fregoni, M., Schuster, D., and Paoletti, A., *Phytoline*, 61–102, 2003.
- Charalampopoulos, I. i Droulia, F.: Frost conditions due to climate change in south-eastern Europe via a high-spatiotemporal-resolution dataset, *Atmosphere*, 13, 1407, <https://doi.org/10.3390/ATMOS13091407>, 2022.
- Cindri c, K., Pasari c, Z., i Gaji c- apka, M.: Spatial and temporal analysis of dry spells in Croatia, *Theor Appl Climatol*, 102, 171–184, <https://doi.org/10.1007/S00704-010-0250-6>/METRICS, 2010.
- Cindri c, K., Teli sman Prtenjak, M., Herceg-Buli c, I., Mihajlovi c, D., i Pasari c, Z.: Analysis of the extraordinary 2011/2012 drought in Croatia, *Theor Appl Climatol*, 123, 503–522, <https://doi.org/10.1007/S00704-014-1368-8>/METRICS, 2016.
- Colin, J., D eQu e, M., Radu, R., i Somot, S.: Sensitivity study of heavy precipitation in Limited Area Model climate simulations: influence of the size of the domain and the use of the spectral nudging technique, *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 62, 591–604, <https://doi.org/10.1111/J.1600-0870.2010.00467.X>, 2010.
- Coombe, B. G.: Growth Stages of the Grapevine: Adoption of a system for identifying grapevine growth stages, *Aust J Grape Wine Res*, 1, 104–110, <https://doi.org/10.1111/J.1755-0238.1995.TB00086.X>, 1995.
- Costa, R., Fraga, H., Moutinho-Pereira, J., Correia, C. M., Dinis, L. T., Gon alves, I., Silvestre, J., Eiras-Dias, J., Malheiro, A. C., i Santos, J. A.: Modeling phenology, water status, and yield components of three Portuguese grapevines using the STICS Crop Model, *Am J Enol Vitic*, 66, 482–491, <https://doi.org/10.5344/AJEV.2015.15031>, 2015.
- Cuxart, J. i Guijarro, J. A.: Observed trends in frost and hours of cold in Majorca, *Int J Climatol*, 30, 2358–2364, <https://doi.org/10.1002/JOC.2051>, 2010.
- De Cort azar-Atauri, I. G.: Adaptation du Mod le STICS   la Vigne (*Vitis vinifera* L.). Utilisation dans le Cadre d’une  tude d’Impact du Changement Climatique   l’ chelle de la France, *Doktorska radnja, ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE MONTPELLIE*, 292, 2006.

De Cortázar-Atauri, I. G., Brisson, N., i Gaudillere, J. P.: Performance of several models for predicting budburst date of grapevine (*Vitis vinifera* L.), *Int J Biometeorol*, 53, 317–326, <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0217-4>, 2009.

De Cortázar-Atauri, I. G., Duchêne, E., Destrac-Irvine, A., Barbeau, G., Rességuier, L. de, Lacombe, T., Parker, A. K., Saurin, N., i Leeuwen, C. van: Grapevine phenology in France: from past observations to future evolutions in the context of climate change, *OENO One*, 51, 115–126, <https://doi.org/10.20870/OENO-ONE.2017.51.2.1622>, 2017.

Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars A.C.M., Van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A.J., Haimberger, L., Healy, S.B., Hersbach, H., Hólm, E.V., Isaksen, L., Kállberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.J., Park, B.K., Peubey, C., De Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.N., i Vitart, F.: The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *QJR Meteorol Soc*, 137, 553–597, <https://doi:10.1002/qj.828>, 2011.

De Luis, M., Čufar, K., Saz, M. A., Longares, L. A., Ceglar, A., i Kajfež-Bogataj, L.: Trends in seasonal precipitation and temperature in Slovenia during 1951–2007, *Reg Environ Change*, 14, 1801–1810, <https://doi.org/10.1007/s10113-012-0365-7>, 2014.

Di Lena, B., Silvestroni, O., Lanari, V., i Palliotti, A.: Climate change effects on cv. Montepulciano in some wine-growing areas of the Abruzzi region (Italy), *Theor Appl Climatol*, 136, 1145–1155, <https://doi.org/10.1007/S00704-018-2545-Y/FIGURES/5>, 2019.

Droulia, F. i Charalampopoulos, I.: Future climate change impacts on european viticulture: A review on recent scientific advances, *Atmosphere*, 12, 495, <https://doi.org/10.3390/ATMOS12040495>, 2021.

Droulia, F. i Charalampopoulos, I.: A review on the observed climate change in Europe and its impacts on viticulture, *Atmosphere*, 13, 837, <https://doi.org/10.3390/atmos13050837>, 2022.

Duchêne, E., Huard, F., Dumas, V., Schneider, C., i Merdinoglu, D.: The challenge of adapting grapevine varieties to climate change, *Clim Res*, 41, 193–204, <https://doi.org/10.3354/CR00850>, 2010.

Eccel, E., Zollo, A. L., Mercogliano, P., i Zorer, R.: Simulations of quantitative shift in bio-climatic indices in the viticultural areas of Trentino (Italian Alps) by an open source R package, *Comput Electron Agric*, 127, 92–100, <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2016.05.019>, 2016.

Erlat, E. i Türkeş, M.: Analysis of observed variability and trends in numbers of frost days in Turkey for the period 1950–2010, *Int J Climatol*, 32, 1889–1898, <https://doi.org/10.1002/JOC.2403>, 2012.

Fernández-Montes, S. i Rodrigo, F. S.: Trends in seasonal indices of daily temperature extremes in the Iberian Peninsula, 1929–2005, *Int J Climatol*, 32, 2320–2332, <https://doi.org/10.1002/joc.3399>, 2012.

Fila, G., Gardiman, M., Belvini, P., Meggio, F., i Pitacco, A.: A comparison of different modelling solutions for studying grapevine phenology under present and future climate scenarios, *Agric For Meteorol*, 195–196, 192–205, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.05.011>, 2014.

Fioravanti, G., Piervitali, E., i Desiato, F.: Recent changes of temperature extremes over Italy: an index-based analysis, *Theor Appl Climatol*, 123, 473–486, <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1362-1>, 2016.

- Firanj Sremac, A., Lalic, B., Cuxart, J., i Marcic, M.: Maximum, minimum, and daily air temperature range in orchards: What do observations reveal?, *Atmosphere*, 12, 1279, <https://doi.org/10.3390/ATMOS12101279/S1>, 2021.
- Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., Jones, G. V., Alves, F., Pinto, J. G., i Santos, J. A.: Very high resolution bioclimatic zoning of Portuguese wine regions: Present and future scenarios, *Reg Environ Change*, 14, 295–306, <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0490-y>, 2014.
- Fraga, H., Santos, J. A., Moutinho-Pereira, J., Carlos, C., Silvestre, J., Eiras-Dias, J., Mota, T., i Malheiro, A. C.: Statistical modelling of grapevine phenology in Portuguese wine regions: observed trends and climate change projections, *J Agric Sci*, 154, 795–811, <https://doi.org/10.1017/S0021859615000933>, 2016.
- Fraga, H., de Cortázar Atauri, I. G., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., i Santos, J. A.: Viticulture in Portugal: A review of recent trends and climate change projections, *Oeno One*, 51, 61–69, <https://doi.org/10.20870/oeno-one.2016.0.0.1621>, 2017.
- Fuhrer, J.: Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change, *Agric Ecosyst Environ*, 97, 1–20, [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00125-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00125-7), 2003.
- Graczyk, D. i Szwed, M.: Changes in the Occurrence of Late Spring Frost in Poland, *Agronomy* 2020, Vol. 10, Page 1835, 10, 1835, <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10111835>, 2020.
- Green, D. M., i Swets, J. A.: *Signal Detection Theory and Psychophysics*, Wiley & Sons, Inc., 455 pp, 1974.
- Grillakis, M. G., Doupis, G., Kapetanakis, E., i Goumenaki, E.: Future shifts in the phenology of table grapes on Crete under a warming climate, *Agric For Meteorol*, 318, 108915, <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2022.108915>, 2022.
- Grisogono, B., Večenaj, Ž., Omazić, B.: Climate change in the perspective of Mediterranean and Croatian agriculture - personal overviews, 1st International Scientific Conference “Agricultural Challenges to Climate Change“, Osijek, Hrvatska - pozvano predavanje
- Guilpart, N., Metay, A., i Gary, C.: Grapevine bud fertility and number of berries per bunch are determined by water and nitrogen stress around flowering in the previous year, *Eur J Agron*, 54, 9–20, <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.11.002>, 2014.
- Hänninen, H., Slaney, M., i Linder, S.: Dormancy release of Norway spruce under climatic warming: Testing ecophysiological models of bud burst with a whole-tree chamber experiment, *Tree Physiol*, 27, 291–300, <https://doi.org/10.1093/TREEPHYS/27.2.291>, 2007.
- Hudson, I.L. i Keatley, M.R.: *Phenological research, Methods for environmental and climate change analysis*, 14, 521, Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2010.
- Huglin, M. P.: Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole, *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 64, 1117–1126, 1978.
- IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Pörtner, H.O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E.S., Mintenbeck K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Lösschke, S., Möller, V., Okem, A., Rama, B., Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.

- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., van Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J. F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., i Yiou, P.: EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research, *Reg Environ Change*, 14, 563–578, <https://doi.org/10.1007/S10113-013-0499-2/FIGURES/8>, 2014.
- Jelić, D., Megyeri, O. A., Malečić, B., Belušić Vozila, A., Strelec Mahović, N., i Telišman Prtenjak, M.: Hail climatology along the northeastern Adriatic, *J Geophys Res Atmos*, 125, <https://doi.org/10.1029/2020JD032749>, 2020.
- Jones, G. V., i Davis, R.E.: Climate influences on grapevine phenology, grape composition, and wine production and quality for Bordeaux, France, *Am J Enol Vitic*, 51, 249–261, 2000.
- Jones, G. V., White, M.A., Cooper, O. R. i Storchmann, K.: Climate change and global wine quality, *Clim Change*, 73, 319–343, 2005.
- Jones, G. V.: Climate and terroir: Impacts of climate variability and change on wine, *Geoscience Canada Reprint Series* 9, 203-217, 2006.
- Jones, G. V., Reid, R. i Vilks, A.: Climate, grapes, and wine: structure and suitability in a variable and changing climate, *The geography of wine: regions, terroir, and techniques*, edited by P. Dougherty. Springer Press, 255, 2012
- Kalma, J. D., Laughlin, G. P., Caprio, J. M., i Hamer, P. J. C.: The bioclimatology of frost: its occurrence, impact and protection, *Springer Berlin Heidelberg*, 17, 144, 1992.
- Karoglan, M., Prtenjak, M. T., Šimon, S., Osrečak, M., Anić, M., Kontić, J. K., Andabaka, Z., Tomaz, I., Grisogono, B., Belušić, A., Marki, A., Prša, Z., Omazić, B., Jelić, D., Vešenaj, Z., Vučetić, V., Počakal, D., Petric, I. V., Leder, R., i Prša, I.: Classification of Croatian winegrowing regions based on bioclimatic indices, *E3S Web of Conferences*, 50, <https://doi.org/10.1051/E3SCONF/20185001032>, 2018.
- Kartschall, T., Wodinski, M., Von Bloh, W., Oesterle, H., Rachimow, C., and Hoppmann, D.: Changes in phenology and frost risks of *Vitis vinifera* (cv Riesling), *Meteorol Zeitschrift*, 24, 189–200, <https://doi.org/10.1127/METZ/2015/0534>, 2015.
- Kliewer, W. M. i Torres, R. E.: Effect of controlled day and night temperatures on grape coloration, *Am J Enol Vitic*, 23, 71–77, <https://doi.org/10.5344/AJEV.1972.23.2.71>, 1972.
- Knollhoff, D. S., Takle, E. S., Gallus, W. A., Burkheimer, D., i McCauley, D.: Evaluation of a frost accumulation model, *Meteorol Appl*, 10, 337–343, <https://doi.org/10.1017/S1350482703001026>, 2003.
- Koufos, G., Mavromatis, T., Koundouras, S., Fyllas, N. M., i Jones, G. V.: Viticulture–climate relationships in Greece: the impacts of recent climate trends on harvest date variation, *Int J Climatol*, 34, 1445–1459, <https://doi.org/10.1002/JOC.3775>, 2014.
- Koufos, G. C., Mavromatis, T., Koundouras, S., i Jones, G. V.: Response of viticulture-related climatic indices and zoning to historical and future climate conditions in Greece, *Int J Climatol*, 38, 2097–2111, <https://doi.org/10.1002/JOC.5320>, 2018.
- Koundouras, S., van Leeuwen, C., Seguin, G., i Glories, Y.: Influence of water status on vine vegetative growth, berry ripening and wine characteristics in Mediterranean Zone (example of

- Nemea, Greece, variety Saint-George, 1997), *OENO One*, 33, 149–160, <https://doi.org/10.20870/OENO-ONE.1999.33.4.1020>, 1999.
- Kovács, E., Puskás, J., Pozsgai, A., i Kozma, K.: Shift in the annual growth cycle of grapevines (*Vitis vinifera* L.) in West Hungary, *Appl Ecol Environ Res*, 16, 2029–2042, https://doi.org/10.15666/aeer/1602_20292042, 2018.
- Kozmiński, C., Nidzgorska-Lencewicz, J., Makosza, A., i Michalska, B.: Ground frosts in Poland in the growing season, *Agriculture (Switzerland)*, 11, <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE11070573>, 2021.
- Laget, F., Tondut, J. L., Deloire, A., i Kelly, M. T.: Climate trends in a specific Mediterranean viticultural area between 1950 and 2006, *OENO One*, 42, 113–123, <https://doi.org/10.20870/OENO-ONE.2008.42.3.817>, 2008.
- Lalić, B., Eitzinger, J., Dalla Marta, A., Orlandini, S., Firanj Sremac, A., i Pacher, B.: Agricultural Meteorology and Climatology, 8, 352, <https://doi.org/10.36253/978-88-6453-795-5>, 2018.
- Lee, H., Chun, J. A., Han, H. H., i Kim, S.: Prediction of Frost Occurrences Using Statistical Modeling Approaches, *Advances in Meteorology*, 2016, <https://doi.org/10.1155/2016/2075186>, 2016.
- Leolini, L., Moriondo, M., Fila, G., Costafreda-Aumedes, S., Ferrise, R., i Bindi, M.: Late spring frost impacts on future grapevine distribution in Europe, *Field Crops Res*, 222, 197–208, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.11.018>, 2018.
- Ma, Q., Huang, J. G., Hänninen, H., i Berninger, F.: Divergent trends in the risk of spring frost damage to trees in Europe with recent warming, *Glob Chang Biol*, 25, 351–360, <https://doi.org/10.1111/GCB.14479>, 2019.
- Makowski, D.: The psycho package: an efficient and publishing-oriented workflow for psychological science, *J Open Source Softw*, 3, 470, <https://doi.org/10.21105/JOSS.00470>, 2018.
- Malheiro, A. C., Santos, J. A., Fraga, H., i Pinto, J. G.: Climate change scenarios applied to viticultural zoning in Europe, *Clim Res*, 43, 163–177, <https://doi.org/10.3354/cr00918>, 2010.
- Malinović-Milicević, S., Stanojević, G., i Radovanović, M.: Recent changes in first and last frost dates and frost-free period in Serbia, *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, 100, 44–58, <https://doi.org/10.1080/04353676.2017.1369048>, 2018.
- Maracchi, G., Sirotenko, O., i Bindi, M.: Impacts of present and future climate variability on agriculture and forestry in the temperate regions: Europe, *Clim Change*, 70, 117–135, <https://doi.org/10.1007/S10584-005-5939-7>, 2005.
- Marinović, I., Cindrić Kalin, K., Güttler, I., i Pasarić, Z.: Dry spells in Croatia: Observed climate change and climate projections, *Atmosphere*, 12, 652, <https://doi.org/10.3390/atmos12050652>, 2021.
- Mason, I. B.: A model for assessment of weather forecasts, *Aust Meteor Mag*, 30, 291–303, 1982.
- Menendez, M., García-Díez, M., Fita, L., Fernández, J., Méndez, F. J., i Gutiérrez, J. M.: High-resolution sea wind hindcasts over the Mediterranean area, *Clim Dyn*, 42, 1857–1872, <https://doi.org/10.1007/S00382-013-1912-8/METRICS>, 2014.
- Moncur, M. W., Rattigan, K., Mackenzie, D. H., i Mc INTYRE, G. N.: Base temperatures for budbreak and leaf appearance of grapevines, *Am J Enol Vitic*, 40, 1989.

- Molitor, D., Caffarra, A., Sinigoj, P., Pertot, I., Hoffmann, L., i Junk, J.: Late frost damage risk for viticulture under future climate conditions: a case study for the Luxembourgish winegrowing region, *Aust J Grape Wine Res*, 20, 160–168, <https://doi.org/10.1111/AJGW.12059>, 2014.
- Moutinho-Pereira, J. M., Correia, C. M., Gonçalves, B. M., Bacelar, E. A., i Torres-Pereira, J. M.: Leaf gas exchange and water relations of grapevines grown in three different conditions, *Photosynthetica*, 42, 81–86, <https://doi.org/10.1023/B:PHOT.0000040573.09614.1D>, 2004.
- Neethling, E., Barbeau, G., Bonnefoy, C., i Quéno, H.: Change in climate and berry composition for grapevine varieties cultivated in the Loire Valley, *Clim Res*, 53, 89–101, <https://doi.org/10.3354/CR01094>, 2012.
- Ojeda, H., Andary, C., Kraeva, E., Carbonneau, A., i Deloire, A.: Influence of Pre- and Postveraison Water Deficit on Synthesis and Concentration of Skin Phenolic Compounds during Berry Growth of *Vitis vinifera* cv. Shiraz, *Am J Enol Vitic*, 53, 2002.
- Olsson, C. i Jönsson, A. M.: Budburst model performance: The effect of the spatial resolution of temperature data sets, *Agric For Meteorol*, 200, 302–312, <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2014.10.003>, 2015.
- Omazić, B., Telišman Prtenjak, M., Prša, I., Belušić Vozila, A., Vučetić, V., Karoglan, M., Karoglan Kontić, J., Prša, Ž., Anić, M., Šimon, S., i Güttler, I.: Climate change impacts on viticulture in Croatia: Viticultural zoning and future potential, *Int J Climatol*, 40, 5634–5655, <https://doi.org/10.1002/joc.6541>, 2020.
- Omazić, B., Telišman Prtenjak, M., Bubola, M., Meštrić, J., Karoglan, M., Prša, I.: Application of statistical models in the detection of grapevine phenology changes, *Agric For Meteorol*, 341, 109682, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109682>, 2023.
- Pandžić, K., Likso, T., Pejić, I., Šarčević, H., Pecina, M., Šestak, I., Tomšić, D., i Strelec Mahović, N.: Application of the self-calibrated palmer drought severity index and standardized precipitation index for estimation of drought impact on maize grain yield in Pannonian part of Croatia, *Nat Hazards*, 113, 1237–1262, <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05345-4>, 2022.
- Perčec Tadić, M.: Gridded Croatian climatology for 1961-1990, *Theor Appl Climatol*, 102, 87–103, <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0237-3>, 2010.
- Perkins, S. E., Pitman, A. J., Holbrook, N. J., i McAneney, J.: Evaluation of the AR4 Climate Models' Simulated Daily Maximum Temperature, Minimum Temperature, and Precipitation over Australia Using Probability Density Functions, *J Clim*, 20, 4356–4376, <https://doi.org/10.1175/JCLI4253.1>, 2007.
- Preiner, D.: Godišnji biološki ciklus vinove loze, *Glasnik Zaštite Bilja*, 36, 70–75, 2013.
- Prša, I., Rakić, V., Rašić, D., Vučetić, V., Prtenjak, M. T., Omazić, B., Blašković, L., Karoglan, M., Preiner, D., Drenjančević, M., Ivanišević, D., i Šimon, S.: Influence of Weather and Climatic Conditions on the Viticultural Production in Croatia, *Proceedings of the XIV International Terroir Congress*, 2, 2022.
- Prša, I.: Utjecaj vremenskih i klimatskih uvjeta na vinogradarsku proizvodnju u Hrvatskoj (Doktorska radnja), Sveučilište u Zagrebu, Agronomski fakultet, 285, 2022.
- Quiñones, A. J. P., Hoogenboom, G., Gutiérrez, M. R. S., Stöckle, C., i Keller, M.: Comparison of air temperature measured in a vineyard canopy and at a standard weather station, *PLoS One*, 15, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0234436>, 2020.

- Ramos, M. C., Jones, G. V., i Martínez-Casasnovas, J. A.: Structure and trends in climate parameters affecting winegrape production in northeast Spain, *Clim Res*, 38, 1–15, <https://doi.org/10.3354/CR00759>, 2008.
- Ramos, M. C. i Jones, G. V.: Relationships between Cabernet Sauvignon phenology and climate in two Spanish viticultural regions: observations and predicted future changes, *J Agric Sci*, 156, 1079–1089, <https://doi.org/10.1017/S0021859618001119>, 2018.
- Reis, S., Fraga, H., Carlos, C., Silvestre, J., Eiras-Dias, J., Rodrigues, P., i Santos, J. A.: Grapevine phenology in four portuguese wine regions: modeling and predictions, *App Sci*, 10, 3708, <https://doi.org/10.3390/APP10113708>, 2020.
- Riou, C., Carbonneau, A., Becker, N., Caló, A., Costacurta, A., Castro, R., Pinto, P.A., Carneiro, L.C., Lopes, C., Clímaco, P., Panagiotou, M.M., Sotez, V., Beaumont, H.C., Burril, A., Maes, J. i Vossen, P.: Le déterminisme climatique de la maturation du raisin: application au zonage de la teneur en sucre dans la communauté européenne. Luxembourg: Office des Publications Officielles des Communautés Européennes, 1994.
- Rockel, B., Will, A., i Hense, A.: The regional climate model COSMO-CLM (CCLM), *Meteorol Zeitschrift*, 17, 347–348. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0309>, 2008.
- Rossi, F., Facini, O., Loreti, S., Nardino, M., Georgiadis, T., i Zinoni, F.: Meteorological and microMeteorol applications to frost monitoring in northern Italy orchards, *Phys Chem Earth, Parts A/B/C*, 27, 1077–1089, [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(02\)00144-4](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(02)00144-4), 2002.
- Rozante, J. R., Gutierrez, E. R., da Silva Dias, P. L., de Almeida Fernandes, A., Alvim, D. S., i Silva, V. M.: Development of an index for frost prediction: Technique and validation, *Meteorol Appl*, 27, e1807, <https://doi.org/10.1002/MET.1807>, 2020.
- Ruml, M., Milatović, D., Vulić, T., i Vuković, A.: Predicting apricot phenology using meteorological data, *Int J Biometeorol*, 55, 723–732, <https://doi.org/10.1007/S00484-010-0387-0>, 2011.
- Ruml, M., Vuković, A., Vujadinović, M., Djurdjević, V., Ranković-Vasić, Z., Atanacković, Z., Sivčev, B., Marković, N., Matijašević, S., i Petrović, N.: On the use of regional climate models: Implications of climate change for viticulture in Serbia, *Agric For Meteorol*, 158–159, 53–62, <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.02.004>, 2012.
- Ruml, M., Korac, N., Vujadinovic, M., Vukovic, A., i Ivanišević, D.: Response of grapevine phenology to recent temperature change and variability in the wine-producing area of Sremski Karlovci, Serbia, *Journal of Agricultural Science*, 154, 186–206, <https://doi.org/10.1017/S0021859615000453>, 2016.
- Ruml, M., Gregorić, E., Matović, G., Radovanović, S., i Počuča, V.: Uneven trends of temperature indices during the growing season and dormancy in Serbia, *Theor Appl Climatol*, 147, 1277–1295, <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03859-8>, 2022.
- Samuelsson, P., Jones, C. G., Willén, U., Ullerstig, A., Gollvik, S., Hansson, U., Jansson, C., Kjellström, E., Nikulin, G., i Wyser, K.: The Rossby Centre Regional Climate model RCA3: model description and performance, *Tellus, Series A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 63, 4–23, <https://doi.org/10.1111/J.1600-0870.2010.00478.X>, 2011.
- Santibáñez, F., Sierra, H.F.G., i Santibáñez, P.C.: Degree day model of table grape (*Vitis Vinifera* L.) phenology in Mediterranean temperate climates, *Int. J. Sci. Environ. Technol.* 10–22. ISSN 2278-3687 3, 2014.

Santos, J. A., Malheiro, A. C., Pinto, J. G., i Jones, G. V.: Macroclimate and viticultural zoning in Europe: observed trends and atmospheric forcing, *Climate Research*, 51, 89–103, <https://doi.org/10.3354/cr01056>, 2012.

Scheifinger, H., Menzel, A., Koch, E., i Peter, C.: Trends of spring time frost events and phenological dates in Central Europe, *Theor Appl Climatol*, 74, 41–51, <https://doi.org/10.1007/s00704-002-0704-6>, 2003.

Schwartz, M. D., Ahas, R., i Aasa, A.: Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere, *Glob Chang Biol*, 12, 343–351, <https://doi.org/10.1111/J.1365-2486.2005.01097.X>, 2006.

Sgubin, G., Swingedouw, D., Dayon, G., García de Cortázar-Atauri, I., Ollat, N., Pagé, C., i van Leeuwen, C.: The risk of tardive frost damage in French vineyards in a changing climate, *Agric For Meteorol*, 250–251, 226–242, <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2017.12.253>, 2018.

Spellman, G.: Wine, weather i climate, *Weather*, 54, 230–239, <https://doi.org/10.1002/J.1477-8696.1999.TB07256.X>, 1999.

Spinoni, J., Szalai, S., Szentimrey, T., Lakatos, M., Bihari, Z., Nagy, A., Németh, Á., Kovács, T., Mihic, D., Dacic, M., Petrovic, P., Kržič, A., Hiebl, J., Auer, I., Milkovic, J., Štěpánek, P., Zahradníček, P., Kilar, P., Limanowka, D., Pyrc, R., Cheval, S., Birsan, M. V., Dumitrescu, A., Deak, G., Matei, M., Antolovic, I., Nejedlík, P., Štastný, P., Kajaba, P., Bochníček, O., Galo, D., Mikulová, K., Nabyvanets, Y., Skrynyk, O., Krakovska, S., Gnatiuk, N., Tolasz, R., Antofie, T., i Vogt, J.: Climate of the Carpathian Region in the period 1961–2010: Climatologies and trends of 10 variables, *Int J Climatol*, 35, 1322–1341, <https://doi.org/10.1002/joc.4059>, 2015.

Sviličić, P., Vučetić, V., Filić, S., i Smolić, A.: Soil temperature regime and vulnerability due to extreme soil temperatures in Croatia, *Theor Appl Climatol*, 126, 247–263, <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1558-z>, 2016.

Swets, J. A.: The relative operating characteristic in psychology, *Science*, 182, 990–999, 1973.

Swets, J. A.: Measuring the accuracy of diagnostic systems, *Science*, 240, 1285–1293, 1988.

Tomasi, D., Jones, G. V., Giust, M., Lovat, L., i Gaiotti, F.: Grapevine phenology and climate change: relationships and trends in the Veneto Region of Italy for 1964–2009, *Am J Enol Vitic*, 62, 329–339, <https://doi.org/10.5344/ajev.2011.10108>, 2011.

Tonietto, J.: Les macroclimats viticoles mondiaux et l'influence du mésoclimat sur la typicité de la Syrah et du Muscat de Hambourg dans le sud de la France: méthodologie de caractérisation (Thèse Doctorat). Ecole Nationale Supérieure Agronomique, Montpellier, 1999.

Tonietto, J. i Carbonneau, A.: A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide, *Agric For Meteorol*, 124, 81–97, <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2003.06.001>, 2004.

Urhausen, S., Brienen, S., Kapala, A., i Simmer, C.: Climatic conditions and their impact on viticulture in the Upper Moselle region, *Clim Change*, 109, 349–373, <https://doi.org/10.1007/S10584-011-0059-Z/METRICS>, 2011.

Van Leeuwen, C. i Darriet, P.: The impact of climate change on viticulture and wine quality, *J of Wine Econ*, 11, 150–167, <https://doi.org/10.1017/JWE.2015.21>, 2016.

Van Leeuwen, C., Destrac-Irvine, A., Dubernet, M., Duchêne, E., Gowdy, M., Marguerit, E., Pieri, P., Parker, A., de Rességuier, L., i Ollat, N.: An update on the impact of climate change in viticulture

and potential adaptations, *Agronomy*, 9, 514, <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY9090514>, 2019.

Van Vuuren, D.P., Edmonds, J., Kainuma, M. *et al*: The representative concentration pathways: an overview, *Climatic Change* 109, 5, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>, 2011

Vršič, S., Šuštar, V., Pulko, B., i Šumenjak, T. K.: Trends in climate parameters affecting winegrape ripening in northeastern Slovenia, *Clim Res*, 58, 257–266, <https://doi.org/10.3354/cr01197>, 2014.

Vučetić, V., Anić, M.: *Agroklimatski atlas Hrvatske u razdoblju 1991.-2020.*, Zagreb, Hrvatska, Državni Hidrometeorološki zavod, 2021.

Webb, L. B., Whetton, P. H., Bhend, J., Darbyshire, R., Briggs, P. R., and Barlow, E. W. R.: Earlier wine-grape ripening driven by climatic warming and drying and management practices, *Nat Clim Chang*, 2, 259–264, <https://doi.org/10.1038/nclimate1417>, 2012.

Wild, M.: Global dimming and brightening: A review, *J Geophys Res Atmos*, 114, <https://doi.org/10.1029/2008JD011470>, 2009.

Willmott, C. J., Robeson, S. M., i Matsuura, K.: A refined index of model performance, *Int J Climatol*, 32, 2088–2094, <https://doi.org/10.1002/joc.2419>, 2012.

Winkler, A. J.: *General viticulture*, University of California Press, 710, 1974.

Zapata, D., Salazar-Gutierrez, M., Chaves, B., Keller, M., and Hoogenboom, G.: Predicting key phenological stages for 17 grapevine cultivars (*Vitis vinifera* L.), *Am J Enol Vitic*, 68, 60–72, <https://doi.org/10.5344/ajev.2016.15077>, 2017.

Zaninović, K., and Gajić-Čapka, M.: Climatological basis for prediction of temperature regime on ground, *Hrvatski meteorološki časopis*, 33/34, 71-78, 1999.

Zaninović, K., Gajić-Čapka, M., Perčec Tadić, M., Vučetić, M., Milković, J., Bajić, A., Cindrić, K., Cvitan, L., Katušin, Z., Kaučić, D., Likso, T., Lončar, E., Lončar, Ž., Mihajlović, D., Pandžić, K., Patarčić, M., Srnec, L. and Vučetić, V.: *Climate atlas of Croatia: 1961–1990, 1971–2000*. Zagreb: Državni Hidrometeorološki zavod, 2008.

WEB STRANICE

<https://mingor.gov.hr/vijesti/obilježavanje-dana-pruga-zagrijavanja-s-ciljem-podizanja-svijesti-o-ozbiljnosti-klimatskih-promjena/8266>

<https://www.pmf.unizg.hr/images/50024384/Prilagodba-vinogradarskog-sektora-u-Hrvatskoj-klimatskim-promjenama.pdf>

<https://www.r-project.org/>

<https://www.hapih.hr/wp-content/uploads/2023/05/Prilagodba-vinogradarskog-sektora-u-Hrvatskoj-klimatskim-promjenama.pdf>

Dodatak A

Tablica A1 Pragovi GDD izračunati na kalibracijskim stanicama (navedenim u Tablici 2.1) koji su potrebni za početak određene fenološke faze u modelima 1A (GDD10) i 2A (GDD5). GDD10 označava GDD izračunat s bazom od 10 °C, a GDD s bazom od 5 °C (opisani u tablici 3.4).

SORTA	PUPANJE		CVATNJA		ŠARA		BERBA	
	GDD10	GDD5	GDD10	GDD5	GDD10	GDD5	GDD10	GDD5
GRAŠEVINA	52.8	231.8	351.1	791.0	1087.1	1851.8	1518.9	2502.5
CHARDONNAY	40.1	185.8	307.9	701.9	1009.3	1728.2	1514.5	2447.5
MERLOT	69.4	377.0	416.1	1011.3	1105.0	1939.0	1792.3	2849.6
PLAVAC MALI	126.3	519.4	471.6	1104.9	1662.7	2674.1	2120.3	3361.2

Tablica A2 Pragovi GDD izračunati na kalibracijskim stanicama i razdobljima (navedenim u Tablici 2.1) koji su potrebni za početak određene fenološke faze u modelima 1B (GDD10) i 2B (GDD5). GDD10 označava GDD izračunat s bazom od 10 °C, a GDD s bazom od 5 °C (opisani u tablici 3.4).

SORTA	POSTAJA	PUPANJE		CVATNJA		ŠARA		BERBA	
		GDD10	GDD5	GDD10	GDD5	GDD10	GDD5	GDD10	GDD5
GRAŠEVINA	KUTJEVO_V1	54.1	233.0	353.0	793.6	1123.1	1852.4	1642.0	2598.7
	KRIŽEVCI_V6	32.4	186.5	320.4	732.4	842.8	1501.6	1429.2	2399.4
	DARUVAR_V2	39.7	196.1	316.6	720.1	1051.6	1794.1	1483.1	2434.4
	ILOK_V3							1701.7	2720.9
CHARDONNAY	KUTJEVO_V1	41.9	161.7	302.5	677.8	1022.3	1698.0	1511.3	2422.2
	POREČ_V7	30.4	211.7	284.2	729.0	1036.9	1778.3	1523.4	2455.8
	DARUVAR_V2	35.5	170.8	294.2	674.8	989.6	1702.1	1505.7	2506.9
	ILOK_V3	32.8	151.8	284.1	682.1	904.5	1564.6	1619.3	2552.9
	BELJE_V5							1560.0	2546.5
MERLOT	POREČ_V7	30.2	256.0	368.7	883.7	1099.7	1892.0	1783.1	2856.3
	KORLAT_V9	102.0	447.2	443.7	1055.8	1128.7	1997.6	1826.7	2950.0
	AGROLAGUNA_V8							1763.2	2856.3
	KORČULA_V10							2184.2	3389.4
	BELJE_V5							1640.6	2605.9
	KUTJEVO_V1							1681.9	2730.9
PLAVAC MALI	HVAR_V11	139.8	549.9	481.1	1135.1	1523.0	2569.4	2136.8	3380.8
	LASTOVO_V12	145.6	557.8	407.0	1012.2	1367.9	2390.2	1968.4	3222.0
	KORČULA_V10							2364.2	3637.3

Tablica A3 Popis prediktora koji su pokazali najbolje rezultate u višestrukoj linearnoj regresiji na kalibracijskim stanicama (navedenim u Tablici 2.1) za modele 3A i 4A (opisani u tablici 3.4) za četiri sorte (G – 'Graševina', C – 'Chardonnay', M – 'Merlot', PM – 'Plavac mali'). *Tmax* označava srednju maksimalnu temperaturu zraka u određenom razdoblju, *Tmin* srednju minimalnu temperaturu zraka, *Tmean* srednju dnevnu temperaturu zraka i *P* ukupnu količinu oborine u navedenom razdoblju.

SORT	Razdoblje	PUPANJE			CVATNJA			ŠARA		BERBA		PUPANJE	
		Model 3A	Model 4A	Period	Model 3A	Model 4A	Period	Model 3A	Model 4A	Period	Model 3A	Model 4A	
G	Ožujak	<i>Tmax</i> , <i>Tmin</i> , <i>Tmean</i>	<i>Tmax</i> , <i>Tmin</i> , <i>Tmean</i>	Ožujak - Svibanj	<i>Tmax</i> , <i>Tmin</i> , <i>Tmean</i>	<i>Tmax</i> , <i>Tmin</i> , <i>Tmean</i>	Ožujak- Srpanj	<i>Tmax</i> , <i>Tmean</i>	<i>Tmax</i> , <i>Tmean</i>	Ožujak - Rujan	<i>Tmax</i> , <i>Tmean</i>	<i>Tmax</i> , <i>Tmean</i>	
C	Ožujak	<i>Tmax</i> , <i>Tmin</i> , <i>Tmean</i>	<i>Tmax</i> , <i>Tmin</i> , <i>Tmean</i>	Ožujak - Svibanj	<i>Tmax</i> , <i>Tmin</i> , <i>Tmean</i>	<i>Tmax</i> , <i>Tmin</i> , <i>Tmean</i>	Ožujak- Srpanj	<i>Tmean</i> , <i>Tmean</i>	<i>Tmean</i> , <i>Tmean</i>	Ožujak - Kolovoz	<i>Tmax</i> , <i>Tmin</i>	<i>Tmax</i> , <i>Tmin</i>	
M	Ožujak	<i>Tmin</i> , <i>Tmean</i>	<i>Tmin</i> , <i>Tmean</i>	Ožujak - Svibanj	<i>Tmean</i>	<i>P</i>	Ožujak- Srpanj	<i>Tmax</i> , <i>Tmax</i>	<i>Tmax</i> , <i>Tmax</i>	Ožujak - Kolovoz	<i>Tmax</i> , <i>Tmin</i> , <i>Tmean</i>	<i>Tmax</i> , <i>Tmin</i> , <i>Tmean</i>	
PM	Ožujak	<i>Tmax</i> , <i>Tmin</i> , <i>Tmean</i>	<i>Tmax</i> , <i>Tmin</i> , <i>Tmean</i>	Ožujak - Svibanj	<i>Tmean</i>	<i>Tmean</i> , <i>P</i>	Ožujak- Srpanj	<i>Tmin</i> , <i>Tmean</i>	<i>Tmin</i> , <i>Tmean</i> , <i>P</i>	Ožujak - Rujan	<i>Tmax</i> , <i>Tmin</i> , <i>Tmean</i>	<i>Tmax</i> , <i>Tmin</i> , <i>Tmean</i> , <i>P</i>	

Tablica A4: Popis prediktora koji su pokazali najbolje rezultate u višestrukoj linearnoj regresiji na kalibracijskim stanicama (navedenim u Tablici 2.1) za modele 3B (opisan u tablici 3.4) za četiri sorte (G – 'Graševina', C – 'Chardonnay', M – 'Merlot', PM – 'Plavac mali'). *Tmax* označava srednju maksimalnu temperaturu zraka u određenom razdoblju, *Tmin* srednju minimalnu temperaturu zraka, *Tmean* srednju dnevnu temperaturu zraka i *P* ukupnu količinu oborine u navedenom razdoblju.

SORT	POSTAJA A	PUPANJE		CVATNJA		ŠARA		BERBA	
		Razdoblje	Model 3B	PERIOD	Model 3B	PERIOD	Model 3B	PERIOD	MODEL 3B
G	KUTJEVO_V1	Ožujak	Tmax,	Ožujak -	Tmax,	Ožujak -	Tmax,	Ožujak-	Tmax
			Tmin	Svibanj	Tmean	Srpanj	Tmean	Rujan	
	KRIŽEVCI_V6	Ožujak	Tmax,	Ožujak -	Tmean	Ožujak -	Tmax,	Ožujak-	Tmax, Tmin
			Tmin,	Svibanj		Srpanj	Tmean	Rujan	
DARUVAR_V2	Ožujak	Tmin	Ožujak -	Tmean	Ožujak -	Tmax, Tmin,	Ožujak-	Tmax, Tmin	
ILOK_V3			Svibanj		Srpanj	Tmean	Rujan	Ožujak- Rujan	Tmin, Tmean
C	KUTJEVO_V1	Ožujak	Tmax,	Ožujak -	Tmax,	Ožujak -	Tmax	Ožujak-	Tmin, Tmean
			Tmean	Svibanj	Tmean	Srpanj		Kolovoz	
	POREČ_V7	Ožujak	Tmean	Ožujak -	Tmin,	Ožujak -	Tmax	Ožujak-	Tmin, Tmean
				Svibanj	Tmean	Srpanj		Kolovoz	
	DARUVAR_V2	Ožujak	Tmax	Ožujak -	Tmean	Ožujak -	Tmax, Tmin,	Ožujak-	Tmax, Tmin,
ILOK_V3	Ožujak	Tmax	Ožujak -	Tmax	Ožujak -	Tmin	Ožujak-	Tmean	
BELJE_V5			Svibanj		Srpanj		Kolovoz	Ožujak- Kolovoz	Tmean
M	POREČ_V7	Ožujak	Tmin	Ožujak -	Tmin,	Ožujak -	Tmax,	Ožujak-	Tmin
				Svibanj	Tmean	Srpanj	Tmean	Kolovoz	
	KORLAT_V9	Ožujak	Tmax,	Ožujak -	Tmax, Tmin,	Ožujak -	Tmax,	Ožujak-	Tmax, Tmin,
			Tmin,	Svibanj	Tmean	Srpanj	Tmean	Kolovoz	Tmean
	AGROLAGUNA_V8							Ožujak-	Tmax, Tmin
								Kolovoz	
PM	HVAR_V11	Ožujak	Tmax,	Ožujak -	Tmean	Ožujak -	Tmax, Tmin,	Ožujak-	Tmin
			Tmean	Svibanj		Srpanj	Tmean	Rujan	
	LASTOVO_V12	Ožujak-April	Tmax	Ožujak -	Tmax,	Ožujak -	Tmax, Tmin	Ožujak-	Tmax, Tmean
				Svibanj	Tmean	Srpanj		Rujan	
KORČULA_V10							Ožujak-	Tmax, Tmin,	
							Rujan	Tmean	

Tablica A5: Popis prediktora koji su pokazali najbolje rezultate u višestrukoj linearnoj regresiji na kalibracijskim stanicama (navedenim u Tablici 2.1) za modele 4B (opisan u tablici 3.4) za četiri sorte (G – 'Graševina', C – 'Chardonnay', M – 'Merlot', PM – 'Plavac mali'). *Tmax* označava srednju maksimalnu temperaturu zraka u određenom razdoblju, *Tmin* srednju minimalnu temperaturu zraka, *Tmean* srednju dnevnu temperaturu zraka i *P* ukupnu količinu oborine u navedenom razdoblju.

SORTA	POSTAJA	PUPANJE		CVATNJA		ŠARA		BERBA	
		Razdoblje	Model 4B	PERIOD	Model 4B	PERIOD	Model 4B	PERIOD	Model 4B
G	KUTJEVO_V1	Ožujak	Tmax, Tmin, Tmean, P	Ožujak - Svibanj	Tmax, Tmean	Ožujak - Srpanj	Tmax, Tmean	Ožujak- Rujan	Tmin, P
	KRIŽEVCI_V6	Ožujak	Tmax, Tmin, Tmean	Ožujak - Svibanj	Tmax, P	Ožujak - Srpanj	Tmax, Tmean	Ožujak- Rujan	Tmax, Tmin
	DARUVAR_V2	Ožujak	Tmin	Ožujak - Svibanj	Tmax, pr	Ožujak - Srpanj	Tmax, Tmin, Tmean	Ožujak- Rujan	Tmax, Tmin
	ILOK_V3							Ožujak- Rujan	Tmin, Tmean
C	KUTJEVO_V1	Ožujak	Tmax, Tmin, Tmean, P	Ožujak - Svibanj	Tmax, Tmin, Tmean, P	Ožujak - Srpanj	Tmax, Tmean, P	Ožujak- Kolovoz	Tmin, Tmean, P
	POREČ_V7	Ožujak	Tmean	Ožujak - Svibanj	Tmin, Tmean	Ožujak - Srpanj	Tmax	Ožujak- Kolovoz	Tmax, Tmin, Tmean, P
	DARUVAR_V2	Ožujak	Tmax, Tmin, Tmean, P	Ožujak - Svibanj	Tmax, P	Ožujak - Srpanj	Tmax, Tmin, Tmean	Ožujak- Kolovoz	Tmax, Tmin, Tmean, P
	ILOK_V3	Ožujak	Tmax, Tmean, P	Ožujak - Svibanj	Tmax, Tmin, Tmean, P	Ožujak - Srpanj	Tmin	Ožujak- Kolovoz	Tmean
	BELJE_V5							Ožujak- Kolovoz	Tmax, Tmin
M	POREČ_V7	Ožujak	Tmax, Tmin, Tmean, P	Ožujak - Svibanj	Tmin, Tmean	Ožujak - Srpanj	Tmax, Tmean	Ožujak- Kolovoz	Tmax, Tmean, P
	KORLAT_V9	Ožujak	Tmax, Tmin, Tmean, P	Ožujak - Svibanj	Tmax, Tmin, Tmean, P	Ožujak - Srpanj	Tmax, Tmean	Ožujak- Kolovoz	Tmax, Tmin, Tmean
	AGROLAGUNA_V 8		Tmax, Tmean, P					Ožujak- Kolovoz	Tmax, Tmin
	KORČULA_V10							Ožujak- Kolovoz	Tmean
	BELJE_V5							Ožujak- Rujan	Tmax, Tmin, Tmean
	KUTJEVO_V1							Ožujak- Rujan	Tmean
PM	HVAR_V11	Ožujak	Tmax, Tmean	Ožujak - Svibanj	Tmean	Ožujak - Srpanj	Tmax, Tmin, Tmean, P	Ožujak- Rujan	Tmin, P
	LASTOVO_V12	Ožujak- April	Tmax, P	Ožujak - Svibanj	Tmean, P	Ožujak - Srpanj	Tmax, Tmean, P	Ožujak- Rujan	Tmax, Tmean
	KORČULA_V10							Ožujak- Rujan	Tmax, Tmin, Tmean, P

Tablica A6: Tablica kontingencije koja prikazuje odnos između promatranog datuma berbe (podijeljenog u tri kategorije) i izmjerena srednja temperatura u vegetacijskom razdoblju, GST_r , za 'Graševinu' (na postaji Kutjevo_V1; 1996. – 2018.) i 'Plavac mali' na lokaciji Korčula_V10 (2001. – 2018.).

	Datum berbe	$GST_r < 17.3$	$17.3 < GST_r < 18.3$	$GST_r > 18.3$	SUMA
'Graševina'	Nakon 19. listopada	3	1	0	4
	18. rujna – 19. listopada	2	9	2	13
	Prije 18. rujna	0	0	6	6
	SUMA	5	10	8	23
'Plavac mali'	Nakon 10. listopada	2	1	1	4
	23. rujna – 10. listopada	1	5	1	7
	Prije 23. rujna	0	5	2	7
	SUMA	3	11	4	18

Tablica A7: Razlike u broju godina s ranijom ili kasnijom berbom (ΔP) ovisno o srednjoj temperaturi zraka u skraćenoj vegetacijskoj sezoni (*GSTr*) koja je dobivena iz simulacija 10 regionalnih klimatskih modela (navedenih u Tablici 3.3) tjeranih RCP8.5 scenarijem.

SORTA	Datum berbe	Lokacija	ΔP (%)
'Graševina'	Prije 8. rujna	Belje_V5	10 (33%)
	Poslije 28. rujna	Belje_V5	-14 (46%)
	Prije 18. rujna	Kutjevo_V1	10 (33%)
	Poslije 19. listopada	Kutjevo_V1	-8 (26%)
	Prije 8. rujna	Daruvar_V2	5 (17%)
	Poslije 27. rujna	Daruvar_V2	-13 (43%)
	Prije 15. rujna	Križevci_V6	13 (43%)
	Poslije 1. listopada	Križevci_V6	-23 (77%)
'Chardonnay'	Prije 8. rujna	Belje_V5	12
	Poslije 28. rujna	Belje_V5	-14
	Prije 8. rujna	Daruvar_V2	9
	Poslije 27. rujna	Daruvar_V2	-22
'Merlot'	Prije 30. kolovoza	Zadar_V9	8 (26%)
	Poslije 17. rujna	Zadar_V9	12 (40%)
	Prije 24. kolovoza	Korčula_V10	1 (3%)
	Poslije 3. rujna	Korčula_V10	-14 (46%)
'Plavac mali'	Prije 23. rujna	Korčula_V10	2 (7%)
	Poslije 10. listopada	Korčula_V10	-9 (30%)

Curriculum vitae

BRANIMIR OMAZIĆ

Osobne informacije	Datum rođenja	24.7.1991.
	Državljanstvo	hrvatsko
	Adresa	Ulica svete Barbare 1, Novaki, 10431 Sveta Nedelja, Hrvatska
	E-mail adresa	bomazic@gfz.hr
	Telefon	+358989130302
Obrazovanje	Prirodoslovno – matematički fakultet, Zagreb, Hrvatska 2019-danas	
	Razina	Doktorski studij
	Smjer	Fizika - Geofizika
	Status	U tijeku
	Prirodoslovno – matematički fakultet, Zagreb, Hrvatska 2014-2016	
	Razina	Diplomski studij
	Titula	Magistar fizike - geofizike (mag. phys.- geophys.)
	Smjer	Meteorologija i fizička oceanografija
	Status	Diplomirao
	Prirodoslovno – matematički fakultet, Zagreb, Hrvatska 2010-2014	
	Razina	Preddiplomski studij
	Titula	Prvostupnik geofizike (uni. bacc. geophys.)
Smjer	Geofizika	
Status	Diplomirao	
Radno iskustvo i projekti	Prirodoslovno – matematički fakultet, Zagreb, Hrvatska 2021-danas	
	Asistent	
	Projekt SEVERE WEATHER OVER THE ALPINE-ADRIATIC REGION IN A CHANGING CLIMATE (SWALDRIC)	2021-danas

Analiza utjecaja ekstremnih uvjeta u atmosferi na uzgoj vinove loze u sadašnjoj i budućoj klimi	
Obveze i zaduženja	
Za vrijeme projekta zaduženja i obveze su bile vezane uz:	
<ul style="list-style-type: none"> • Analizu meteoroloških i agronomskih podataka • Prostorno-vremenska interpolacija koristeći statističke metode • Pisanje kodova, testiranje • Klimatsko modeliranje • Vizualizacija rezultata • Pisanje znanstvenih radova • Izlaganja na konferencijama • Suvoditelj na diplomskom radu 	
Tehnologije	
<ul style="list-style-type: none"> • R, Rstudio • GIS • MS Office 	
Dan i noć na PMF-u	2022-2023
Koordinator Geofizičkog odsjeka	
Obveze i zaduženja	
<ul style="list-style-type: none"> • Organizacija predavanja i znanstveno-popularnih eksperimenata • Koordiniranje studenata i nastavnog osoblja • Osmišljavanje youtube videa za popularizaciju znanosti • Komunikacija s medijima i ostalim koordinatorima 	
Hrvatska agencija za poljoprivredu i hranu	prosinac 2020
Vanjski suradnik	
Projekt CROVIZONE – PRILAGODBA VINOGRADARSKIH ZONA RH KLIMATSKIM PROMJENAMA	
Ispitivanje točnosti podjele administrativnih vinogradarskih zona uporabom meteoroloških parametara te njihova prilagodba s obzirom na budući utjecaj klimatskih promjena	
Obveze i zaduženja	
Za vrijeme projekta zaduženja i obveze bile su vezane uz:	
<ul style="list-style-type: none"> • Analizu meteoroloških mjerenja i izlaza klimatskih modela • Prostorno-vremenska interpolacija uporabom statističkih metoda • Klimatsko modeliranje • Pisanje vodiča za prilagodbu vinogradarske proizvodnje klimatskim promjenama • Pisanje elaborata „Prilagodba vinogradarskog sektora u Hrvatskoj klimatskim promjenama” • Prenošenje znanja vinogradarima sudjelovanjem na okruglim stolovima 	
Tehnologije	
<ul style="list-style-type: none"> • R, Rstudio • GIS 	
NEOS d.o.o., Zagreb, Hrvatska	2019-2021
Junior consultant	
OWB 11GR2 to ODI 12c migration	2019-2021
Migracija, testiranje i prilagodba OWB mapiranja u ODI za razne klijente (PBZ, Croatia osiguranje, ERSTE banka)	
Obveze i zaduženja	

<ul style="list-style-type: none"> • Prilagodba ODI mapiranja, izrada paketa • Testiranje koda preko PL/SQL procedure 	
Tehnologije <ul style="list-style-type: none"> • Toad • SQL Developer • Oracle baza podataka • Oracle Database Integrator 12c • Oracle Warehouse Builder 11GR2 	
Projekt fiskalizacija Albanije (ALIMC)	2019-2020
Izrada skladišnog sustava podataka za potrebe početka fiskalizacije u Albaniji	
Obveze i zaduženja <ul style="list-style-type: none"> • Izrada ODI mapiranja • Izrada tablica i pisanje kodova za provjeru točnosti podataka • Pisanje popratne dokumentacije 	
Tehnologije <ul style="list-style-type: none"> • Microsoft Office • SQL Developer • Oracle baza podataka • Oracle Database Integrator 12c 	
Inicijalna edukacija	
Inicijalna edukacija uključuje pisanje dokumentacije i upoznavanje s radom Oracle baza podataka, SQL-om i PL/SQL-om	
Obveze i zaduženja <ul style="list-style-type: none"> • Usvajanje znanja iz popratne dokumentacije • Tjedno polaganje ispita i rješavanje problemskih zadataka 	
Tehnologije <ul style="list-style-type: none"> • Microsoft Office • SQL Developer • Oracle baza podataka • Oracle Database Integrator 12c 	
Prirodoslovno – matematički fakultet, Zagreb, Hrvatska	2017-2019
Suradnik na projektu	
Projekt Vinogradarstvo i klimatske promjene u Hrvatskoj (VITCLIC)	2017-2019
Analiza sadašnjeg stanja u vinogradarstvu te procjena i donošenje preporuka određenih mjera u cilju adaptacije na klimatske promjene	
Obveze i zaduženja <ul style="list-style-type: none"> • Statistička analiza podataka • Pisanje kodova • Klimatsko modeliranje • Vizualizacija rezultata 	
Tehnologije <ul style="list-style-type: none"> • R, Rstudio • MATLAB • GIS 	
N1 Adria News, Zagreb, Hrvatska	siječanj 2017-travanj 2017
Regionalni koordinator za vremensku prognozu	
Izrada vremenske prognoze i prognostičkih materijala	

Srednja škola Jastrebarsko, Jastrebarsko, Hrvatska	prosinac 2016
Profesor fizike	

Tehnologije i metodologije

Oracle – DW/BI Područje			
Alati	Verzija	Razina	Godine
Oracle SQL/PLSQL	9i/10g/11g	Srednja	2
Oracle Dana Integrator	12c	Srednja	2
Programi za obradu podataka			
Alati	Verzija	Razina	Godine
MATLAB	8.0	Napredna	6
R	3.6.3	Napredna	4
Rstudio	1.4.1717	Napredna	4
GIS	QGIS 3.20	Srednja	3
Operacijski sustavi			
Alati	Verzija	Razina	Godine
Microsoft Windows	XP, 7, 2003, 2008	Srednja	12
UNIX/Linux - Ubuntu	12.04/16.04/20.04	Srednja	10

Jezici

Razina znanja			
Jezik	Čitanje	Pisanje	Govor
Hrvatski	Materinji	Materinji	Materinji
Engleski	Tečno	Tečno	Tečno
Njemački	Osnovno	Osnovno	Osnovno

Priznanja i nagrade

EMS Tromp foundation travel award to young scinetists 2022 awarded by the Solco W. Tromp Foundation za predavanje „*Future change in viticulture phenological stages and early frost risk in Istria region, Croatia*”

Popis radova

Izvorni znanstveni i pregledni radovi u CC časopisima

- 1 **Omazić, Branimir**; Telišman Prtenjak, Maja; Bubola, Marijan; Meštrić, Josip; Karoglan, Marko; Prša, Ivan
Application of statistical models in the detection of grapevine phenology changes // Agric For Meteorol, 341 (2023.); doi: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2023.109682> (izvorni znanstveni rad)
- 2 Blašković, Lucija; Jelić, Damjan; Malečić, Barbara; **Omazić, Branimir**; Güttler, Ivan; Telišman Prtenjak, Maja
Trend analysis and climatology of hail in Croatia // Atmospheric research, 294 (2023.); 106927, 14. doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106927> (izvorni znanstveni rad)
- 3 **Omazić, Branimir**; Telišman Prtenjak, Maja; Prša, Ivan; Belušić Vozila, Andreina; Vučetić, Višnja; Karoglan, Marko; Karoglan Kontić, Jasminka; Prša, Željka; Anić, Marina; Šimon, Silvio; Güttler, Ivan
Climate change impacts on viticulture in Croatia; viticultural zoning and future potential // Int J Climatol, 40 (2020.); 5634 - 5655 doi:10.1002/joc.6541 (izvorni znanstveni rad)

Znanstveni radovi u drugim časopisima

- 1 **Omazić, Branimir**; Vučetić, Višnjica
Analiza meteoroloških uvjeta tijekom šumskih požara na poluotoku Pelješcu u srpnju 2015. // Vatrogastvo i upravljanje požarima, 7 (2017.); 6 - 23 (izvorni znanstveni rad)

Znanstveni radovi u zbornicima skupova

- 1 Prša, Ivan; Rakić, Vjekoslav; Rašić, Daniel; Vučetić, Višnjica; Telišman Prtenjak, Maja; **Omazić, Branimir**; Blašković, Lucija; Karoglan, Marko; Preiner, Darko; Drenjančević, Mato; Ivanišević, Dragoslav; Šimon, Silvio
Influence of weather and climatic conditions on the viticultural production in Croatia. // Proceedings of the 14th International Terroir congress and 2nd ClimWine symposium// Bordeaux, 2022.
- 2 Karoglan, Marko; Telišman Prtenjak, Maja; Šimon, Silvio; Osrečak, Mirela; Karoglan Kontić, Jasminka; Andabaka, Željko; Tomaz, Ivana; Grisogono, Branko; Belušić, Andreina; Marki, Antun; Prša, Željka; **Omazić, Branimir**; Jelić, Damjan; Večenaj, Željko; Petric, Ivana Vladimira; Leder, Renata; Prša, Ivan; Vučetić, Višnjica; Počakal, Damir; Anić, Marina
Within-vineyard temperature variability in the Jazbina hills of Croatia. // Proceedings of 54th Croatian & 14th International Symposium on Agriculture, Boro Mioč, Ivan Širić (ur.) // Zagreb, 2019. str.541 - 545.
- 3 Karoglan, Marko; Telišman Prtenjak, Maja; Šimon, Silvio; Osrečak, Mirela; Anić, Marina; Karoglan Kontić, Jasminka; Andabaka, Željko; Tomaz, Ivana; Grisogono, Branko; Belušić, Andreina; Marki, Antun; Prša, Željka; **Omazić, Branimir**; Jelić, Damjan; Večenaj, Željko; Vučetić, Višnjica; Počakal, Damir; Petric, Ivana Vladimira; Leder, Renata; Prša, Ivan
Classification of Croatian winegrowing regions based on bioclimatic indices. // E3S Web of Conferences 50, 01032 XII Congreso Internacional Terroir// Zaragoza 2018. str.1 - 5.
doi:10.1051/e3sconf/20185001032 XII

Sažetci u zbornicima skupova

- 1 **Omazić, Branimir**; Telišman Prtenjak, Maja; Anić, Mislav
Frost climatology in Croatia. // 9th International Conference on Meteorology and Climatology of the Mediterranean - Book of abstracts// 2023. str.130 – 130.
- 2 Telišman Prtenjak, Maja; Blašković, Lucija; Jelić, Damjan; Malečić, Barbara; **Omazić, Branimir**
Trend analysis and climatology of hail in Croatia. // 9th International Conference on Meteorology and Climatology of the Mediterranean - Book of abstracts // 2023. str.31 - 31.
- 3 **Omazić, Branimir**; Anić, Mislav; Blašković, Lucija; Telišman Prtenjak, Maja
Development of the New Method for Frost Detection in Croatia. // International Summit on Renewable Energy (INSORE2023)// 2023. str.36 – 36.
- 4 **Omazić, Branimir**; Blašković, Lucija; Telišman Prtenjak, Maja; Bubola, Marijan; Karoglan, Marko; Anić, Mislav

- Future change in viticulture phenological stages and early frost risk in Istria region, Croatia. // EMS Annual Meeting 2022// 2022.
- 5 Blašković, Lucija; Jelić, Damjan; Malečić, Barbara; **Omazić, Branimir**; Telišman Prtenjak, Maja
National hail climatology of Croatia. // EMS Annual Meeting 2022 // 2022.
- 6 **Omazić, Branimir**; Blašković, Lucija; Telišman Prtenjak, Maja
Performance of several models for predicting start date of phenological stages of grapevine in Croatia. // Meteorološki izazovi 8: Zrak koji udišemo, zrak koji prognoziramo/ Challenges in meteorology 8 The air we breathe, the air we forecast// 2022.
- 7 Blašković, Lucija; Jelić, Damjan; Malečić, Barbara; **Omazić, Branimir**; Telišman Prtenjak, Maja
Characteristics of hail on the Croatian Adriatic coast. // Meteorološki izazovi 8: Zrak koji udišemo, zrak koji prognoziramo/ Challenges in meteorology 8 The air we breathe, the air we forecast// 2022. str.1 - 1.
- 8 **Omazić, Branimir**; Blašković, Lucija; Telišman Prtenjak, Maja; Prša, Ivan; Karoglan, Marko; Bubola, Marijan
Utjecaj klimatskih promjena na početak nastupa fenoloških faza vinove loze u Hrvatskoj. // 57th Croatian and 17th International Symposium on Agriculture// Majić, Ivana; Antunović, Zvonko (ur.) 2022. str.355 – 356.
- 9 **Omazić, Branimir**; Blašković, Lucija; Telišman Prtenjak, Maja; Prša, Ivan; Karoglan, Marko
Temperature impact on viticulture phenological stages in Croatia under present climate condition. // European Geophysical Union General Assembly 2022 // 2022.
- 10 Blašković, Lucija; Jelić, Damjan; Malečić, Barbara; **Omazić, Branimir**; Telišman Prtenjak, Maja
Characteristics of hail in the Croatian coastal part of the Adriatic. // European Geophysical Union General Assembly 2022 // 2022.
- 11 **Omazić, Branimir**; Telišman Prtenjak, Maja; Prša, Ivan; Karoglan, Marko
Analysis of the observed and modelled budburst dates of grapevine in Croatia. // EMS Annual Meeting 2021 // 2021.
- 12 Prša, Ivan; Vučetić, Višnjica; Telišman Prtenjak, Maja; Karoglan, Marko; **Omazić, Branimir**; Prša, Željka
Vinogradarska zona C III u Republici Hrvatskoj. // Meteorološki izazovi 7: Meteorologija kao podrška tijelima javne uprave/Challenges in meteorology 7 Meteorology supporting public authorities// 2020.
- 13 **Omazić, Branimir**; Telišman Prtenjak, Maja; Belušić Vozila, Andreina; Prša, Ivan; Vučetić, Višnjica; Karoglan, Marko; Karoglan Kontić, Jasminka; Prša, Željka; Jelić, Damjan; Güttler, Ivan

- Climate change impacts on the viticulture in Croatia; viticultural zoning and future potential. // EMS Annual Meeting 2019 // 2019.
- 14 Prša, Ivan; Brkić, Robert; Vučetić, Višnjica; Karoglan Kontić, Jasminka; Telišman Prtenjak, Maja; Karoglan, Marko; **Omazić, Branimir**; Prša, Željka; Šimon, Silvio
Vinogradarske zone u Republici Hrvatskoj. // Zbornik sažetaka 54. hrvatski i 14. međunarodni simpozij agronoma // Mioč, Boro; Širić, Ivan (ur.) 2019. str.231 – 232.
- 15 **Omazić, Branimir**; Telišman Prtenjak, Maja; Vučetić, Višnjica; Prša, Ivan; Karoglan, Marko; Karoglan Kontić, Jasminka; Prša, Željka; Belušić Vozila, Andreina
Analyses of agroclimatic indices applied to Croatian grapevine growing regions in present and in the future climate. // FIMO-CROHUN & VITCLIC WORKSHOP // 2019. str.1 - 1.
doi:https://www.pmf.unizg.hr/news/44059/Program_FIMOCROHUN_Workshop_final.pdf
- 16 **Omazić, Branimir**; Telišman Prtenjak, Maja; Vučetić, Višnjica; Prša, Ivan; Karoglan, Marko; Karoglan Kontić, Jasminka; Prša, Željka; Belušić Vozila, Andreina
Analyses of agroclimatic indices applied to Croatian grapevine growing regions in present and in the future climate. // Meteorološki izazovi 6: Napredne tehnologije u rješavanju meteoroloških izazova/Challenges in meteorology 6: Advanced technology for solving the meteorological challenges // Marki, Antun (ur.) 2018. str.16 – 16.
- 17 Vučetić, Višnjica; Vučetić, Marko; **Omazić, Branimir**; Telišman Prtenjak, Maja; Ivan Prša, Ivan; Karoglan, Marko
Grapevine phenology and agroclimatic indices in Croatia under climate change. // Proceedings of Abstracts PHENOLOGY 2018 One planet, two hemispheres, many regions // Keatley, Marie R. (ur.) Melbourne: International Society of Biometeorology 2018. str.44 – 44.
- 18 **Omazić, Branimir**; Prša, Ivan; Vučetić, Višnjica; Karlogan, Marko; Telišman Prtenjak, Maja; Belušić, Andreina; Karlogan Kontić, Jasminka; Osrečak, Mirela; Andabaka, Željko; Tomaz, Ivana; Prša, Željka; Šimon, Silvio; Petric, Ivana Vladimira; Leder, Renata
Analyses of agroclimatic indices applied to Croatian grapevine growing regions in the present climate. // EMS Annual Meeting 2018// 2018. str.1 – 1.
- 19 **Omazić, Branimir**; Prša, Ivan; Vučetić, Višnjica; Karlogan, Marko; Belušić, Andreina; Telišman Prtenjak, Maja; Karlogan Kontić, Jasminka; Osrečak, Mirela; Andabaka, Željko; Tomaz, Ivana; Prša, Željka; Šimon, Silvio; Petric, Ivana Vladimira; Leder, Renata
Agroclimatic characteristics in the future climate over the Croatian territory. //EMS Annual Meeting 2018// 2018. str.1 – 1.
- 20 Prša, Ivan; Vučetić, Višnjica; Telišman Prtenjak, Maja; **Omazić, Branimir**; Prša, Željka; Karoglan, Marko; Petric, Ivana Vladimira; Šimon, Silvio
Climate conditions in Coastal Croatia and theirs influence on grapevine variety Plavac mali. //

- 53rd Croatian and 13th International Symposium on Agriculture // Rozman, Vlaka; Antunović, Zvonko (ur.) 2018. str.272 – 273.
- 21 Vučetić, Višnjica; **Omazić, Branimir**
Numerical modelling of weather conditions during the wildfires. // 21st International Congress of Biometeorology 2017// 2017. str.70 – 70.
- 22 Telišman Prtenjak, Maja; Karoglan, Marko; Šimon, Silvio; Kordej-De Villa, Željka; Grisogono, Branko; Belušić, Andreina; Večenaj, Željko; Marki, Antun; Jelić, Damjan; **Omazić, Branimir**; Prša, Željka; Vučetić, Višnjica; Počakal, Damir; Karoglan-Kontić, Jasminka; Tomaz, Ivana; Osrečak, Mirela; Andabaka, Željko; Petric, Ivana Vladimira; Leder, Renata; Prša, Ivan; Plavša, Tomislav; Vehovec, Maja; Rašić Bakarić, Ivana
VITCLIC project. // EMS Annual Meeting 2017// 2017. str.1 – 1.
- 23 **Omazić, Branimir**; Vučetić, Višnjica; Telišman Prtenjak, Maja; Marki, Antun; Ivatek-Šahdan, Stjepan
Numerical modeling of meteorological conditions during the 2015 wildfires on Pelješac Peninsula. // Abstracts Book Joint Congress of the 6th International Conference on Meteorology and Climatology of the Mediterranean & Challenges in Meteorology 5// Palau, Jose L.; Horvath, Kristian (ur.) Zagreb 2017. str.2 - 2.