# Energetska analiza kaskadnog korištenja geotermalne vode u stakleničkoj proizvodnji na primjeru polja Lunjkovec - Kutnjak

**Hranić, Josipa**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:207972

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-29**



*Repository / Repozitorij:*

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb








SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij naftnog rudarstva

# ENERGETSKA ANALIZA KASKADNOG KORIŠTENJA GEOTERMALNE VODE U STAKLENIČKOJ PROIZVODNJI NA PRIMJERU POLJA LUNJKOVEC - KUTNJAK

Diplomski rad

Josipa Hranić

N 289

Zagreb, 2020.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

# ENERGETSKA ANALIZA KASKADNOSG KORIŠTENJA GEOTERMALNE VODE U STAKLENIČKOJ PROIZVODNJI NA PRIMJERU POLJA LUNJKOVEC - KUTNJAK

JOSIPA HRANIĆ

Diplomski rad je izrađen na: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za naftno-plinsko inženjerstvo i energetiku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

## Sažetak

Ulaskom u Europsku uniju, Republika Hrvatska preuzela je obvezu ispunjenja određenih energetskih ciljeva između kojih su i smanjenje stakleničkih plinova te poboljšanje gospodarskih prilika korištenjem obnovljivih izvora energije. Prva konkretna realizacija navedenih ciljeva je puštanje u rad prve geotermalne elektrane Velika Ciglena. Jedna od gospodarskih mogućnosti koje se mogu poboljšati uz iskorištavanje obnovljivih izvora energije je opskrba poljoprivrednih gospodarstava toplinskom energijom povoljne prodajne cijene budući da se veliki udio BDP-a Hrvatske temelji na poljoprivredi. Na temelju karakteristika istražnog lokaliteta Lunjkovec – Kutnjak i planiranog projekta izgradnje elektrane i proizvodnje i distribucije transformiranih oblika energije iz geotermalne energije izrađen je dinamički model iskorištavanja geotermalne energije. Geotermalna energija bi se iskorištavala za grijanje staklenika čije su toplinske potrebe određene na temelju vanjskih temperatura zraka u vremenskom periodu od 1999. do 2013. godine. Grijanje staklenika izvedeno je putem dva termotehnička rješenja: sustava direktnog iskorištavanja geotermalne energije koristeći ventilokonvektore i kaskadnog hibridnog sustava gdje se nakon direktnog iskorištavanja geotermalne vode protok usmjerava na sljedeći sustav direktnog iskorištavanja ventilokonvektorima ili na dizalice topline, ovisno o temperaturi geotermalne vode.

Ključne riječi: geotermalna energija, temperaturni režim, geotermalna voda, obnovljivi izvori energije, direktno iskorištavanje.

Diplomski rad sadrži: 80 stranica, 6 tablica, 37 slika i 44 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

Diplomski pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Izv. prof. dr. sc. Tomislav Kurevija

Ocjenjivači: Izv. prof. dr. sc. Tomislav Kurevija
Prof. dr. sc. Daria Karasalihović Sedlar
Doc. dr. sc. Luka Perković

Datum obrane: 14. veljače 2020.

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
And Petroleum Engineering

Master's Thesis

# ENERGY ANALYSIS OF THE CASCADE USE OF GEOTHERMAL WATER IN THE GREENHOUSE PRODUCTION AT THE LUNJKOVEC – KUTNJAK FIELD

JOSIPA HRANIĆ

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Petroleum and Gas Engineering and Energy
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

## Abstract

By joining the European Union, the Republic of Croatia has undertaken the obligation to fulfill certain energy goals, which include reducing greenhouse gases and improving economic opportunities through the use of renewable energy sources. The first concrete realization of these goals is the commissioning of the first geothermal power plant at Velika Ciglena. One of the economic opportunities that can be improved with the use of renewable energy sources is the supply of farms and greenhouses with heat energy at a reasonable selling price, since a large share of Croatia's GDP is based on agriculture. Based on the characteristics of the Lunjkovec - Kutnjak geothermal field and the planned project for the construction of a geothermal power plant as well as the production and distribution of transformed forms of energy from geothermal energy, a dynamic model of utilization of geothermal energy from the waste heat of geothermal water was created. Geothermal energy could be used to heat greenhouses whose heat needs were determined based on outdoor air temperatures from 1999 to 2013. Greenhouse heating was performed through two thermo-technical solutions: a system of direct use of geothermal energy using a fan coil and a cascade hybrid system where, after the direct use of geothermal water, the flow is directed towards fan-coils or heat pumps, depending on the temperature of geothermal water.

Keywords: Geothermal energy, the temperature regime, geothermal water, renewable energy sources, direct use.

Master's Thesis contains: 80 pages, 6 tables, 37 figures and 44 references.

Original in: Croatian

Thesis Archived at: The Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associated Professor Tomislav Kurevija, PhD

Reviewers: Associated Professor Tomislav Kurevija, PhD
Full Professor Daria Karasalihović Sedlar, PhD
Assistant Professor Luka Perković, PhD

Defense date: February 14th, 2020.

SADRŽAJ

POPIS SLIKA ..... I
POPIS TABLICA ..... III
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA ..... IV
POPIS KORIŠTENIH KRATICA ..... VI
1. UVOD ..... 1
2. ENERGETSKA STRATEGIJA REPUBLIKE HRVATSKE I UTJECAJ NA NAFTNO RUDARSKU PRAKSU ..... 4
2.1. Pitanje budućnosti naftno-rudarske prakse u Hrvatskoj ..... 5
2.2. Geotermalna energija u energetskoj strategiji republike Hrvatske ..... 6
3. AGRARNI SEKTOR KAO ZNAČAJAN UDIO BRUTO DOMAĆEG PROIZVODA REPUBLIKE HRVATSKE ..... 8
3.1. Udio BDP-a iz agrarnog sektora ..... 8
3.2. Nedostatci agrarnog sektora ..... 9
3.3. Iskorištavanje geotermalnih resursa za zadovoljavanje energetskih potreba agrarnog sektora ..... 9
4. FINANCIRANJE I SUBVENCIONIRANJE PROJEKATA OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE ..... 11
4.1. Sustavi poticaja ..... 11
4.2. Sustavi poticaja geotermalnih projekata u Europi ..... 11
4.3. Sustav poticaja geotermalnih projekata u Republici Hrvatskoj ..... 12
5. KORIŠTENJE GEOTERMALNE ENERGIJE NA LOKACIJI LUNJKOVEC – KUTNJAK ..... 14
5.1. Studija „Koncepcija i izvodljivost programa gospodarskog korištenja geotermalne energije na lokaciji Lunjkovec – Kutnjak“ ..... 14
5.2. Opis geotermalnog ležišta Lunjkovec – Kutnjak ..... 14
5.3. Lokacijske i gospodarske značajke vezane uz okolicu geotermalnog ležišta ..... 17
5.4. Planirani projekt gospodarskog iskorištavanja geotermalnog ležišta Lunjkovec – Kutnjak ..... 20
5.4.1. Planirani objekti i model korištenja geotermalne energije ..... 20
5.5. Projektno stanje ..... 22
6. STAKLENIČKA PROIZVODNJA I MODELIRANJE STAKLENIKA ..... 24
6.1. Staklenička proizvodnja kultura u Republici Hrvatskoj ..... 24
6.2. Izbor lokacije staklenika ..... 25
6.3. Dizajn, tehnologije i kontrola klime staklenika ..... 26

6.3.1. Pokrovni materijali staklenika ..... 27
6.3.2. Kontrola klime staklenika ..... 28
6.4. Grijanje staklenika ..... 29
6.4.1. Proračun ukupnih toplinskih gubitaka staklenika ..... 29
6.5. Korištenje geotermalne energije za grijanje staklenika ..... 31
6.5.1. Najčešće izvedbe sustava za grijanje staklenika pomoću geotermalne energije ..... 31
7. PRORAČUN DINAMIČKOG MODELA ENERGETSKI UČINKOVITOG ISKORIŠTAVANJA GEOTERMALNE ENERGIJE S GEOTERMALNOG POLJA LUNJKOVEC – KUTNJAK U SVRHU GRIJANJA STAKLENIKA ..... 34
7.1. Geografski smještaj geotermalnog ležišta ..... 34
7.2. Opis odabranog staklenika ..... 36
7.3. Tehničke specifičnosti staklenika ..... 39
7.4. Opis korištenih programa ..... 40
7.4.1. Hortinergy ® ..... 40
7.4.2. Ursa Građevinska fizika 5.0 ..... 41
7.5. Usporedba rezultata korištenih programa ..... 42
7.6. Dinamički proračun modela energetski učinkovitog iskorištavanja geotermalne energije ..... 43
7.6.1. Rezultati proračuna računalne aplikacije URSA Građevniska fizika 5.0 ..... 45
7.6.2. Korekcijski faktor temperatura ..... 45
7.6.3. Potrebna toplinska snaga ..... 47
7.6.4. Potrebni protok ..... 48
7.7. Dimenzioniranje modela i sustava grijanja staklenika ..... 50
7.7.1. Direktno iskorištavanje geotermalne energije ventilokonvektorima ..... 51
7.7.2. Kaskadni hibridni sustav ventilokonvektora i dizalica topline ..... 57
7.7.3. Koeficijent energetske učinkovitosti dizalice topline ..... 59
7.7.4. Drugi krug - Direktno iskorištavanje ventilokonvektorom za niže temperature rada i dizalicom topline ..... 64
7.8. Proračun temperature pridobivene vode u funkciji vremena iskorištavanja ležišta . ..... 67
8. ENERGETSKO - EKONOMSKA ANALIZA PRORAČUNA MODELA ENERGETSKI UČINKOVITOG ISKORIŠTAVANJA GEOTERMALNE ENERGIJE S GEOTERMALNOG POLJA LUNJKOVEC – KUTNJAK ..... 69
8.1. Prodajne količine i prihodi od prodaje geotermalne toplinske energije na temelju modela proračuna diplomskog rada ..... 69
8.1.1. Direktni sustav iskorištavanja geotermalne energije ..... 70

8.1.2. Kaskadni hibridni sustav iskorištavanja geotermalne energije ..... 70
8.2. Usporedba operativnih troškova energenata na temelju godišnje potrebne toplinske energije ..... 71
9. ZAKLJUČAK ..... 74
10. POPIS LITERATURE ..... 76

**POPIS SLIKA**

Slika 2-1. Bilančne rezerve nafte i kondenzata od 2000. do 2017. ..... 5
Slika 2-2. Prikaz bušotina geotermalnih polja ..... 6
Slika 3-1. Udio BDP-a iz agrarnog sektora u Europskoj uniji. ..... 9
Slika 5-1. Geološki profil A-A' ležišta Lunjkovec-Kutnjak ..... 16
Slika 5-2. Situacijska karta za geotermalno polje Lunjkovec-Kutnjak ..... 19
Slika 5-3. Tehnološka shema proizvodnje i distribucije transformiranih oblika geotermalne energije ..... 21
Slika 6-1. Prikaz potreba za grijanjem staklenika na lokaciji grada Zagreba ..... 27
Slika 6-2. Shema rada ventilokonvektora ..... 32
Slika 6-3. Stropni ventilokonvektor ..... 32
Slika 6-4. Vanjski izgled dizalice topline za industrijsku upotrebu ..... 33
Slika 6-5. Unutrašnjost dizalice topline za industrijsku upotrebu ..... 33
Slika 7-1. Katastarski položaj bušotina Kt-1 i Lun-1 ..... 35
Slika 7-2. Bušotinski prostor i oranica površine tipskog staklenika ..... 35
Slika 7-3. Staklenik tipa "Venlo" ..... 36
Slika 7-4. Unutrašnjost staklenika "Venlo" ..... 37
Slika 7-5. Polikarbonatni pokrovni materijal ..... 38
Slika 7-6. Orijentacija staklenika ..... 39
Slika 7-7. Interaktivni korisnički prozor programa Hortinergy (Academic Licence) ..... 41
Slika 7-8. Interaktivni korisnički prozor programa URSA Građevinska fizika 5.0 ..... 42
Slika 7-9. Usporedba mjesečnih potrebnih toplinskih energija korištenih programa ..... 43
Slika 7-10. Dijagram toka proračuna konstruiranog modela ..... 44
Slika 7-11. Rezultati proračuna programa URSA Građevinska fizika 5.0 ..... 45
Slika 7-12. Učestalost ponavljanja temperaturnih razreda za sezonu grijanja od 1999.-2013. ..... 46
Slika 7-13. Prosječna učestalost ponavljanja temperaturnih razreda sa standardnim devijacijama u periodu od 1999. - 2013. ..... 47
Slika 7-14. Prikaz potencijalnog rasporeda staklenika grijanih geotermalnom energijom direktnog sustava iskorištavanja ..... 50
Slika 7-15. Termotehnička rješenja za grijanje staklenika ..... 51
Slika 7-16. Tijek proračuna modela za direktno iskorištavanje geotermalne energije ..... 52

Slika 7-17. Odnos prosječnih dnevnih temperatura zraka i prosječnih dnevnih temperatura utisa ..... 54
Slika 7-18. Ovisnost protoka geotermalne vode o toplinskim zahtjevima staklenika ..... 56
Slika 7-19. Tijek proračuna modela za kaskadni hibridni sustav iskorištavanja geotermalne energije ..... 57
Slika 7-20. Prikaz potencijalnog rasporeda staklenika okupljenih oko bušotine Kt-1 i grijanih kaskadnim hibridnim sustavom ..... 58
Slika 7-21. Utjecaj vanjske temperature zraka na toplinske zahtjeve staklenika i COP geotermalne dizalice topline ..... 59
Slika 7-22. Ovisnost COP-a o vanjskim temperaturama zraka promatranog razdoblja ..... 61
Slika 7-23. Međuodnos COP-a, električne i toplinske energije ..... 63
Slika 7-25. Temperature utisa geotermalne vode nakon prolaza kroz kaskadni hibridni sustav grijanja staklenika ..... 66
Slika 7-26. Prikaz vremena izotermne proizvodnje i vremena pothlađivanja ležišta ..... 68
Slika 8-1. Cijena prirodnog plina za poduzetništvo ..... 70

## POPIS TABLICA

Tablica 5-1. Karakteristike geotermalnog ležišta Lunjkovec-Kutnjak ..... 17
Tablica 5-2. Planirani objekti I. i II. faze iskorištavanja geotermalnog ležišta Lunjkovec-Kutnjak ..... 22
Tablica 7-1. Optimalni uvjeti za proizvodnju rajčice ..... 37
Tablica 7-2. Dimenzije tipskog staklenika ..... 37
Tablica 7-3. Koeficijenti ukupnog prolaza topline ..... 40
Tablica 8-1. Godišnji operativni troškovi toplinske energije različitih sustava grijanja ..... 72

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---|---|---|
| $\Phi_{uk}$ | W | Ukupni toplinski gubici |
| $\Phi_t$ | W | Transmisijski toplinski gubici kroz stijene zidova i krova |
| $\Phi_i$ | W | Toplinski gubici uslijed prodora vanjskog zraka |
| $A$ | $m^2$ | Površina |
| $U$ | $W/m^2K$ | Koeficijent prolaza topline kroz materijal |
| $\Delta T$ | ˚C | Razlika temperatura |
| $ACH$ | / | Broj izmjena zraka po satu |
| $V$ | $m^3$ | Volumen |
| $c_p$ | J/kg×˚C | Specifični toplinski kapacitet |
| $\rho$ | $kg/m^3$ | Gustoća zraka |
| $K_f$ | / | Korekcijski faktor temperatura |
| $T_{gg}$ | ˚C | Vanjska temperatura zraka pri kojoj dolazi do gašenja grijanja |
| $T_{sr,URSA}$ | ˚C | Srednja temperatura zraka prema URSA programu |
| $T_{sr,15}$ | ˚C | Srednja temperatura zraka prema mjesecima iz 15 godina |
| $P_{inst}$ | kW | Potrebna instalirana snaga za grijanje staklenika |
| $\sum \Delta T$ | ˚C | Zbroj temperaturnih razlika u jednom mjesecu |
| $P_{topl}$ | kW | Toplinski zahtjevi za grijanje staklenika |
| $q$ | l/s | Protok geotermalne vode |
| $T_{Ulaz}$ | ˚C | Temperatura na ulazu u sustav grijanja |
| $T_{Izlaz}$ | ˚C | Najniža projektirana temperatura iskorištavanja |
| $N_{plas}$ | / | Broj staklenika |
| $T_{Utis}$ | ˚C | Temperatura utisa geotermalnog fluida pri izlazu iz staklenika |

| | | |
|---|---|---|
| $T_{EST}$ | ˚C | Temperatura isparivača |
| $T_{LST}$ | ˚C | Temperatura na ekspanzijskom ventilu |
| $COP$ | / | Koeficijent energetske učinkovitosti |
| $\tau$ | Godina | Vrijeme iskorištavanja ležišta |
| $h$ | m | Efektivna debljina ležišta zasićenog s geotermalnom vodom |
| $(c\rho)_L$ | $\frac{J}{m^3\,℃}$ | Obujamska specifična toplina ležišta |
| $(c\rho)_V$ | $\frac{J}{m^3\,℃}$ | Obujamska specifična toplina vode |
| $T_L$ | ˚C | Temperatura geotermalne vode u ležištu u trenutku τ |
| $T_0$ | ˚C | Temperatura ležišta u vremenu τ |
| $\lambda$ | $\frac{W}{m℃}$ | Toplinska vodljivost stijene |
| $(c\rho)_S$ | $\frac{J}{m^3\,℃}$ | Obujamska specifična toplina matriksa stijene |

## POPIS KORIŠTENIH KRATICA

| | |
|---|---|
| COP 21 | 21. zasjedanje Konferencije stranaka (COP 21) Okvirne konvencije Ujedinjenih naroda o promjeni klime |
| UNFCCC | Okvirna konvencija UN-a o promjeni klime |
| OIE | Obnovljivi izvore energije |
| BDP | Bruto domaći proizvod |
| EU | Europska unija |
| EFRD | Europski fond za regionalni razvoj |
| EIB | Europska investicijska banka |
| LCOE | Nivelirani trošak električne energije |
| FZOEU | Fond za zaštitu okoliša i energetsku učinkovitost |
| HROTE | Hrvatski operator tržišta energije |
| OIEK | Obnovljivi izvori energije i kogeneracija |
| HERA | Hrvatska regulatorna energetska agencija |
| INA | Industrija nafte |
| HEP | Hrvatska elektroprivreda |
| UN | Ujedinjeni narodi |
| FAOSTAT | UN-enova organizacija za hranu i agrikulturu |
| $CO_2$ | Ugljikov dioksid |

# 1. UVOD

Problematika energetske tranzicije ka niskougljičnom razvoju, provođenje tranzicije i sama energetska politika određenih država glavna su tematika energetskih krugova pojedinih zemalja svijeta u posljednjih nekoliko godina. Pristupanjem u Europsku uniju, Republika Hrvatska preuzela je obvezu ispunjenja određenih energetskih ciljeva kao i osiguravanja optimalne tranzicije, smanjenja ispusta stakleničkih plinova te poboljšanja gospodarskih prilika korištenjem obnovljivih izvora energije (OIE). Mjere za ispunjavanje spomenutih obveza i ciljeva očituju se kroz direktive, protokole i sporazume, a gotovo svim potpisanim dokumentima zajednički je cilj razvitak strategije dekarbonizacije i energetske neovisnosti. Glavni međunarodni sporazum o klimatskoj politici i ublažavanju globalnog zatopljenja donesen je u Parizu na 21. zasjedanju Konferencije stranaka (COP 21) Okvirne konvencije Ujedinjenih naroda o klimatskim promjenama (UNFCCC). Potpisivanjem Pariškog sporazuma, vlade država su se obvezale na dugoročni cilj zadržavanja povećanja svjetske prosječne temperature na 2 ˚C ispod temperatura u predindustrijskom razdoblju. Uz gore navedeni sporazum, važno je spomenuti i Kyotski protokol, ratificiran od strane Hrvatskog sabora 2007. godine, kojim Republika Hrvatska jamči smanjenje stakleničkih emisija za 5 % u odnosu na referentnu godinu i na taj način zajedno s ostalim zemljama Europske unije doprinosi smanjenju emisija za najmanje 20 % ispod razine iz 1990. kako i nalaže drugo obvezujuće razdoblje Kyotskog protokola. Donošenjem Direktive o obnovljivim izvorima energije (puni naziv *Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources*) uspostavljaju se strateški ciljevi koji zahtijevaju postizanje određenog udjela obnovljivih izvora energije do 2020. Do 2020. godine Direktiva 2009/28/EC iziskuje od Europske unije 20 % manjih emisija stakleničkih plinova u usporedbi s 1990. godinom, doprinos OIE u ukupnoj potrošnji energije od 20 % te 20 postotno povećanje energetske učinkovitosti. Strategija „20-20-20“ omogućila je korištenje manje onečišćujućih tehnologija potpomognuto subvencioniranjem EU i na taj način približila se ostvarivanju ciljeva zemalja s obzirom na njihove mogućnosti. Kako bi se mogao mjeriti napredak i ostvarenje ciljeva, razvijeni su daljnji klimatski i energetski planovi do 2030. i 2050. godine. Strateški ciljevi do 2030. godine obvezuju EU na 40 postotno smanjenje ispusta stakleničkih plinova s obzirom na referentnu 1990. godinu te ostvarenje najmanje 27 % energije iz obnovljivih izvora u ukupnoj potrošnji kao i povećanje energetske učinkovitosti u rasponu od 27 - 30 % (Kojaković i dr., 2019a).

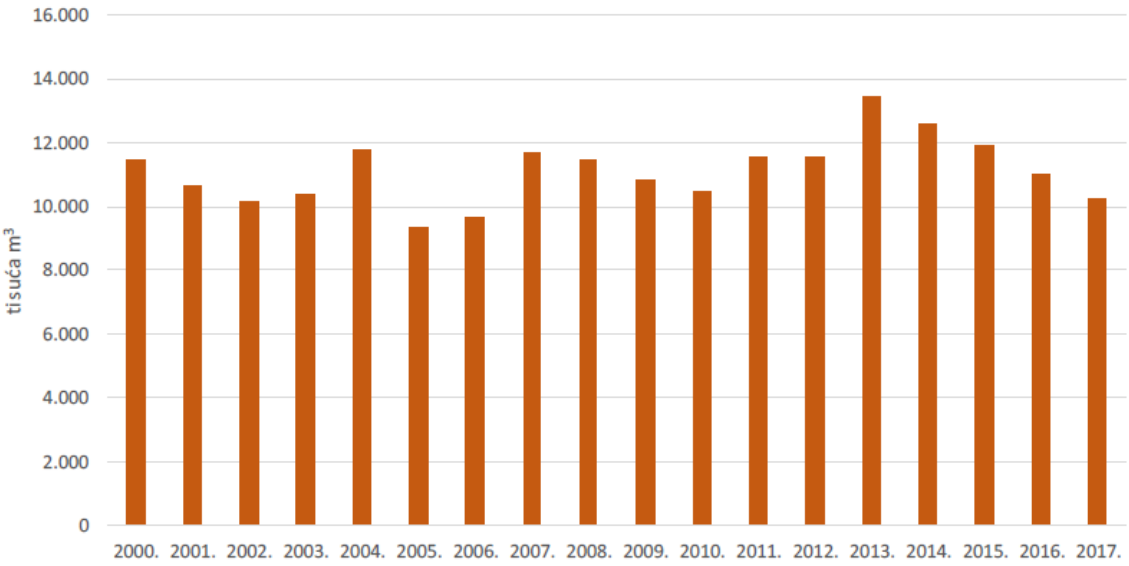
Navedeni dokumenti čine smjernice za donošenje Strategije energetskog razvoja i Akcijskih planova Republike Hrvatske koji predstavljaju korak bliže realizaciji vizije niskougljične energije, ublažavanju klimatskih promjena kroz uporabu obnovljivih izvora energije, promicanje povećanja energetske učinkovitosti te sigurnosti opskrbe energijom. Nacrt prijedloga Strategije energetskog sektora razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu donesen je u svibnju 2019. godine zajedno s Strateškom studijom utjecaja na okoliš (u daljnjem tekstu: Strategija). Strategija se temelji na Zelenoj i Bijeloj Knjizi koje sadrže potrebite analize te prikazuju jasan pravac energetskog razvoja. Na kraju perioda obuhvaćenog Strategijom, predviđa se odstupanje od dosadašnjeg načina proizvodnje, transporta i distribucije energije kao i trgovanja i upravljanja energijom što predstavlja postepeni prelazak na decentralizirani, digitalizirani i niskougljični energetski sustav. Predviđena potrošnja energije direktno ovisi o demografskim kretanjima stanovništva i gospodarskom razvoju, tržištu, resursima, tehnološkom razvoju i zaštiti okoliša i klime. Glavne značajke strategije su ojačavanje energetskog tržišta te njegovo integriranje u međunarodno tržište energije, tehnologija, usluga i proizvodnje, osnažiti sigurnost opskrbe energijom kroz rast domaće proizvodnje i povezivanje energetske strukture, konstantno povećavati proizvodnju električne energije sa smanjenom emisijom stakleničkih plinova te povećavati energetsku učinkovitost u svim dijelovima energetskog lanca. Kreirana su tri scenarija koji su različiti u pogledu smanjenja emisija stakleničkih plinova: Scenarij 0 koji propagira politiku „*Bussines as usual*“ te zagovara razvoj strategije i ciljeva uz primjenu postojećih mjera u transformaciji energetskog sektora; Scenarij 1 koji predstavlja scenarij užurbane energetske tranzicije na temelju međunarodne suradnje s ciljem dostizanja ciljeva Pariškog sporazuma u pogledu stvaranja puteva za široku primjenu obnovljivih izvora energije te posljednji Scenarij 2 koji predviđa umjereni tempo energetske tranzicije i identičan je Scenariju 1, ali s nižim očekivanim ciljevima i manje zahtjevnim investicijama. Referenti scenarij na kojem se temeljila izrada strategije je Scenarij umjerene energetske tranzicije (Scenarij 2) s prvotnim ciljem ostvarivanja doprinosa OIE u bruto finalnoj potrošnji od 36,6 % i 61 postotnim doprinosom OIE u proizvodnji električne energije do 2030. Projekcije do 2050. godine očekuju poskupljenje energije proizvedene iz fosilnih goriva te konkurentski rast OIE bez potrebnih daljnjih poticaja. Strategija ističe da Republika Hrvatska na raspolaganju ima dovoljno potencijala OIE u vidu sunca, vjetra, vodene mase, geotermalne energije i biomase za zadovoljavanje potreba za električnom energijom uz istodobno održivo raspolaganje resursima u skladu s mjerama opreza zaštite okoliša. Doprinos geotermalne energije u ukupnom potencijalu OIE koji obuhvaća izgrađene i

neizgrađene objekte iznosi 56,5-67,6 MWe i 456 MWt na poznatim lokacijama i procijenjenih 100 MWe uz istraživanje novih lokacija te je primjetan konstantan rast iskorištavanja geotermalne energije prema Scenariju 1 i Scenariju 2 u vremenskom razdoblju do 2030. i 2050. (Kojaković i dr., 2019b). Za Panonski prostor karakteristične su povišene vrijednosti gustoće toplinskog toka koji iznosi oko 76 $mW/m^2$ i visoki geotermalni gradijent koji iznosi preko 4 ˚C/100 m (Kurevija i dr., 2018). Uz brojna otkrića geotermalnih voda relativno visokih temperatura razvijali su se medicinsko-rekreacijski objekti kao i sustavi grijanja objekata koji u novije vrijeme postaju sve popularniji instaliranjem dizalica toplina ili iskorištavanjem vodonosnika dubokih naftnih i plinskih polja nakon prestanka proizvodnje ugljikovodika. Na taj način, bušenjem novih bušotina ili revitalizacijom iscrpljenih naftno-plinskih bušotina, simultano se mogu ostvariti ciljevi strategije korištenjem geotermalne energije za proizvodnju električne energije i otpadne toplinske energije za grijanje stambenih, ali i agrarnih objekata.

## 2. ENERGETSKA STRATEGIJA REPUBLIKE HRVATSKE I UTJECAJ NA NAFTNO RUDARSKU PRAKSU

Nacrt prijedloga Strategije energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. zajedno sa Strateškom studijom utjecaja na okoliš izrađen je na temelju Zelene i Bijele knjige koje predstavljaju analitičke podloge za izradu Strategije usuglašene sa zainteresiranom javnošću. Nacrtom prijedloga Strategije skrenuta je pozornost na energetsku održivost, usuglašavanje s ciljevima iz EU direktiva po pitanju reguliranja potrošnje energije, smanjenja emisija stakleničkih plinova, konkurentnosti energetskog sustava i pozitivnog investicijskog okruženja. Realizacija ciljeva Strategije energetskog razvoja Republike Hrvatske pruža priliku dodatnog gospodarskog razvoja poticanjem istraživanja i uvođenjem inovacija i novih rješenja te time otkriva mogućnosti integracije hrvatskih tvrtki na rastućem svjetskom tržištu energetike i energetskih rješenja (Kojaković i dr., 2019c). Jedan od konkretnih ciljeva Strategije odnosi se na održivu i fleksibilnu proizvodnju i preradu nafte i plina. U skoroj budućnosti predviđa se kontinuirano smanjenje domaće proizvodnje nafte i prirodnog plina kao i upotreba naftnih derivata zbog politike dekarbonizacije energetskog sektora i povećanja korištenja alternativnih goriva poput biogoriva, vodika i električne energije. Prema Nacrtu prijedloga energetske Strategije (Kojaković i dr., 2019c) i postojećem stanju energetskog sektora, ukupna potrošnja energije u Republici Hrvatskoj u razdoblju od 2012. godine do 2017. godine rasla je s prosječnom godišnjom stopom od 0,4 %, pri čemu se mijenjala struktura korištenih energenata. Najveće udjele u ukupnoj potrošnji zauzimaju tekuća goriva i prirodni plin. Potrošnja električne energije posljednjih godina je na približno istoj razini, ali njen udio u ukupnoj potrošnji raste. Doprinos obnovljivih izvora energije u ukupnoj potrošnji energije se također povećava. Bilančne rezerve nafte, kondenzata i prirodnog plina se posljednjih godina značajno smanjuju, a usporedno s time smanjuju se i godišnje pridobivene količine nafte i plina. Nafta i plin eksploatiraju se s 54 eksploatacijska polja pri čemu se iz domaće proizvodnje osigurava oko 20 % potreba za naftom te oko 40 % potreba za plinom. U razdoblju od 2000. do 2013. godine bilančne rezerve nafte i kondenzata kretale su se između 9,0 i 13,5 milijuna $m^3$, dok se od 2013. godine bilježio stalni pad rezervi kao što je vidljivo na slici 2-1. Postojeća eksploatacijska polja su u visokom stupnju iscrpljenosti te su na mnogim poljima primijenjene sekundarne metode pridobivanja ugljikovodika. Kako bi se povećale bilančne rezerve nafte i plina, odnosno produljio proizvodni vijek postojećih polja, potrebna su znatna ulaganja za primjenu novih tehnologija za pridobivanje nafte i plina. Ukoliko ne dođe do

dodatnih ulaganja u obnavljanje rezervi, za očekivati je da će vrlo brzo nakon 2030. godine pridobive količine postati nedovoljne za isplativu eksploataciju (Kojaković i dr., 2019a).



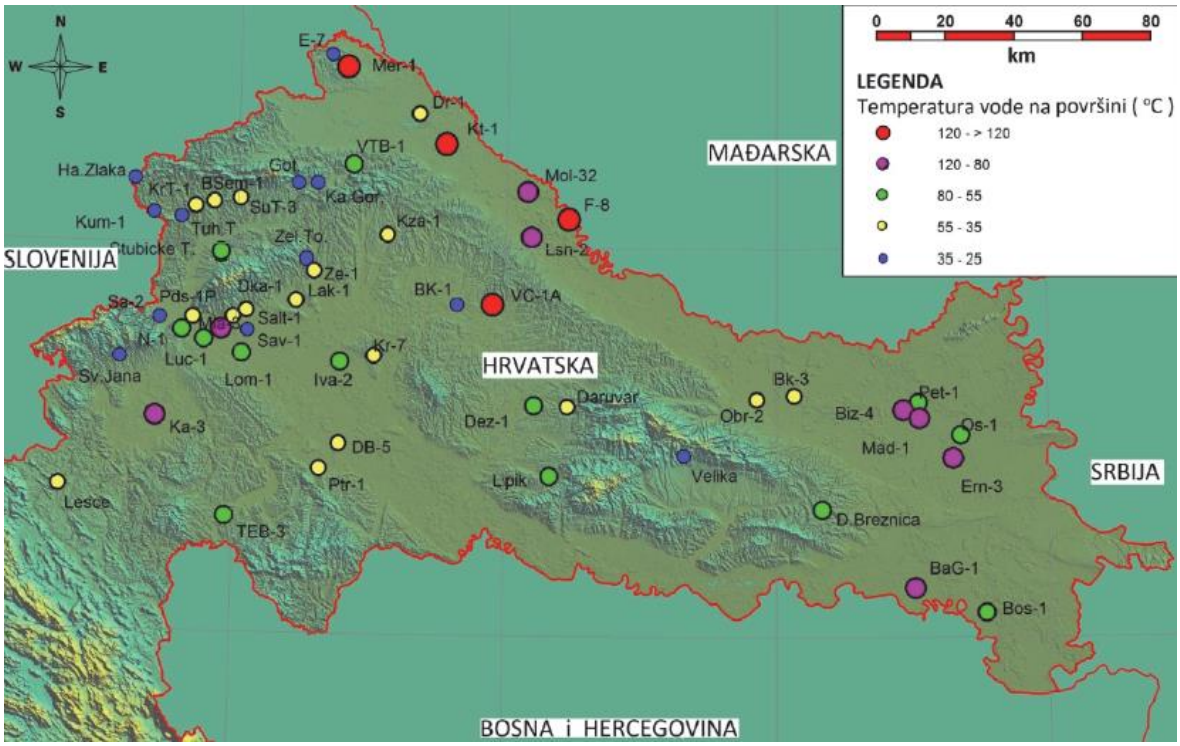

**Slika 2-1**. Bilančne rezerve nafte i kondenzata od 2000. do 2017. (Kojaković i dr., 2019a)

### 2.1. Pitanje budućnosti naftno-rudarske prakse u Hrvatskoj

Završavajući s pridobivanjem ugljikovodika na naftnim i plinskim poljima do 2030. godine, budućnost naftno-rudarske prakse u Hrvatskoj postaje upitna. Iako postoje određena istraživanja i radovi bušenja koja trenutačno provodi kanadska tvrtka Vermilion Energy Inc. u Vukovarsko-srijemskoj županiji, kao i ponude koncesija za istraživanja u Jadranu i Dinaridima, ona su ograničena veličinom ležišta i količinom komercijalno pridobivih ugljikovodika. U principu, otvaranje novih polja i bušenje novih bušotina neće znatno doprinijeti ukupnoj bilanci i promjeni trenda smanjenja pridobivanja ugljikovodika, nego može samo usporiti spomenuti trend. Veliki dio bušotina na starim i gotovo iscrpljenim naftnim i plinskim poljima već sada služi kao utisne bušotine za vodu, s obzirom na sekundarne metode pridobivanja ugljikovodika, a popriličan dio njih je van funkcije. Zbog troškova likvidacije koji se često izbjegavaju, bušotine se nerijetko klasificiraju kao mjerne bušotine te se obično nalaze na rubnim dijelovima polja to jest vodonosnika i nemaju određenu svrhu niti zadaću (Kojaković i dr., 2019c).

Od početka naftno-rudarske prakse u Hrvatskoj pa sve do danas, 45 naftnih i 30 plinskih polja je opremljeno i pušteno u rad, izrađeno je oko 4.500 istražnih i razradnih bušotina te oko 1.200 proizvodnih naftnih bušotina i oko 200 proizvodnih plinskih bušotina. Većina

naftnih i plinskih polja, dakle i većina izrađenih bušotina se nalazi u istočnoj Hrvatskoj to jest u Panonskom bazenu koji je karakterističan po svome geotermalnom potencijalu. Ispod spomenutih polja nalaze se vodonosnici značajne veličine, koji zajedno s postojećim iscrpljenim bušotinama mogu činiti dio energetskog sustava iskorištavanja podzemnih voda (INA, 2019). Većina voda geotermalnog potencijala otkrivena je istražnim radovima prilikom traganja za naftu i plin i većinom se upotrebljavaju u balneološke svrhe i za grijanje prostora različitih namjena. Korištenje geotermalne energije za direktno grijanje u trendu je porasta zadnjih par godina što se može primijetiti i po broju izdanih licenci za istraživanje. Iako kapaciteti proizvodnje geotermalne energije nisu značajno veliki, ovi projekti mogu se smatrati jedinstvenima i inovativnima na polju energetike u Hrvatskoj te će zasigurno privući pažnju ostalih investitora i poduzetnika popravljajući energetsku bilancu Hrvatske (Živković i dr., 2017). Na slici 2-2. su prikazane bušotine odnosno geotermalna polja s temperaturnim potencijalom energetskog iskorištavanja.




**Slika 2-2**. Prikaz bušotina geotermalnih polja (Kolbach i dr., 2018)

### 2.2. Geotermalna energija u energetskoj strategiji republike Hrvatske

Prema rezultatima analiza Zelene i Bijele knjige, bruto neposredna potrošnja energije do 2030. godine u scenariju S2 stagnira, a zatim se smanjuje za 20 % do 2050. godine, dok se u scenariju S1 smanjuje za ukupno 6 % do 2030. godine, a zatim za 29 % do 2050. godine,

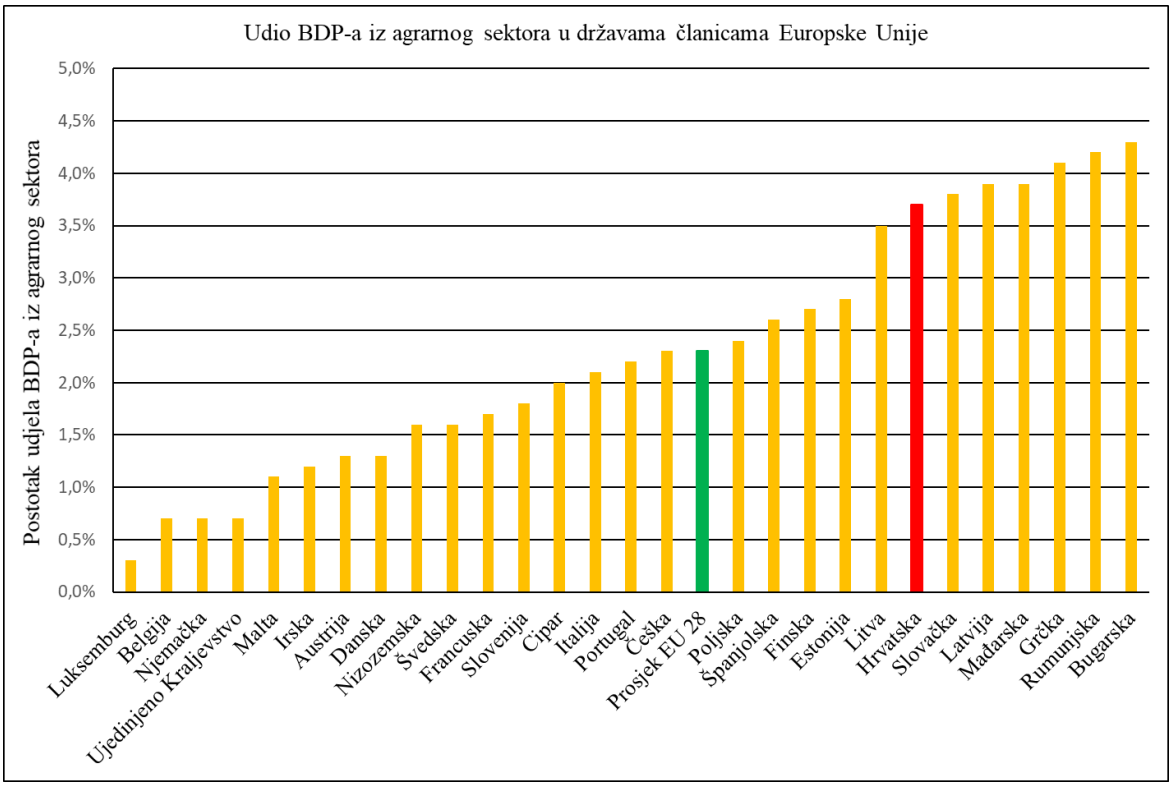
promatrano u odnosu na 2017. godinu. Doprinos obnovljivih izvora energije raste u oba promatrana scenarija sa 27,3 % u 2017. godini na gotovo 37 % u 2030. godini. Nakon 2030. godine porast je još izraženiji pri čemu taj udio u 2050. godini iznosi 53,3 % prema scenariju S2, odnosno 65,4 % prema scenariju S1 (Kojaković i dr., 2019a). Prateći dosadašnji trend smanjenja proizvodnje ugljikovodika smanjuje se i ukupna bruto potrošnja fosilne energije dok udio energije dobivene iz obnovljivih izvora oponaša uzlazni trend. Udio geotermalne energije u ukupnoj bilanci korištenja energije iz obnovljivih izvora prema scenariju S2 iznosi 5,5 % do 2030. i 12,9 % do 2050. godine. Za scenarij S1 udio geotermalne energije do 2030. godine je 5,8 %, a do 2050. iznosi 12,0 %. Do kraja promatranih razdoblja, oba scenarija predviđaju korištenje geotermalne energije u iznosu nešto većem od 200 MW do kraja 2030. i nešto većem od 580 MW do kraja 2050. godine koji bi se većinom ostvarivao kroz geotermalne elektrane, a nešto manjih dijelom kroz toplinarstvo, korištenjem niskotemperaturnih sustava grijanja koristeći geotermalnu vodu (Kojaković i dr., 2019a).

# 3. AGRARNI SEKTOR KAO ZNAČAJAN UDIO BRUTO DOMAĆEG PROIZVODA REPUBLIKE HRVATSKE

Budući da se većina obradivih površina nalazi u istočnom dijelu države, gdje je smještena također i većina bušotina na području Hrvatske, nameće se pitanje da li je za istočnu regiju države energetski isplativo prenamijeniti iscrpljene i negativne bušotine u geotermalne bušotine za proizvodnju toplinske energije u poljoprivredne svrhe s obzirom da Hrvatska određeni dio svog bruto domaćeg proizvoda ostvaruje upravo iz agrarnog sektora.

## 3.1. Udio BDP-a iz agrarnog sektora

Koristeći CIA Factbook, statistički almanah svijeta čiji se podaci redovito ažuriraju, a koji sadrži informacije o povijesti, društvu, vladama država, energiji, geografiji, komunikacijama, transportu, vojskama svijeta te tranzicijskim problemima 267 svjetskih entiteta, napravljena je analiza udjela agrarnog sektora u bruto domaćem proizvodu (BDP) 28 država članica Europske unije i prikazana na slici 3-1. (CIA, 2017). Grafikon prikazuje smještaj Republike Hrvatske gotovo pri samom vrhu poretka te je vidljivo da Hrvatska ostvaruje veći udio BDP-a iz agrarnog sektora naspram razvijenijih država Europe koje imaju daleko veći BDP te se također nalazi iznad europskog prosjeka. Radna snaga zaposlena u agrikulturnom sektoru u Hrvatskoj iznosi 1,9 %. Sudeći po iznesenim brojkama, ulaganja u proizvodnju energije niske cijene u Hrvatskoj su nužna kako bi se agrarni sektor modernizirano, postao mjestom zapošljavanja u zemlji bogatom obradivom površinom i učvrstio svoju ulogu u bruto domaćem proizvodu.




**Slika 3-1.** Udio BDP-a iz agrarnog sektora u Europskoj uniji (CIA, 2017).

### 3.2. Nedostatci agrarnog sektora

Ograničavajući čimbenici za razvitak agrarnog sektora su nekonkurentnost poljoprivrede zbog male prosječne veličine poljoprivrednih gospodarstava, zasićenost tržišta, proizvodnja viškova poljoprivrednih kultura to jest neujednačena proizvodnja naspram potražnje i rasparceliranost poljoprivrednih zemljišta. Također, jedan od čimbenika je i nepovoljna proizvodna struktura u kojoj je stočarska proizvodnja najmanje zastupljena, navodnjavanje i nedostatak energije povoljne cijene što će biti i predmet istraživanja diplomskog rada. Uslijed navedenoga, staklenička proizvodnja različitih kultura te upotreba geotermalnih resursa za potrebe grijanja poljoprivrednih objekata u Hrvatskoj su nerazvijene i ograničene na par lokacija.

### 3.3. Iskorištavanje geotermalnih resursa za zadovoljavanje energetskih potreba agrarnog sektora

Korištenjem napuštenih naftnih i plinskih bušotina s geotermalnim potencijalom, agrarni sektor može se opskrbljivati s toplinskom energijom niske cijene, te na taj način proizvesti različite koristi od kojih bi koristi imalo više strana. Kao ispunjenje zajedničkog cilja bilo bi smanjenje emisije stakleničkih plinova i korištenje obnovljivih izvora energije, a izbjegli bi

se troškovi likvidacije bušotina njihovom prenamjenom. Nadalje, općina na čijem se području nalazi bušotina može preuzeti vlasništvo bušotine ili ući u javno privatno partnerstvo s vlastitom ili stranom tvrtkom koja prodaje toplinsku energiju te tako konkurirati za fondove i poticaje Europske unije koji potiču korištenje energije iz obnovljivih izvora. Iz svega navedenog proizlazi rast životnog standarda i prilika za zapošljavanje ljudi te povećanje svijesti o korištenju obnovljivih izvora energije.

Visok udio BDP-a iz agrarnog sektora, potreba za izvorom energije niske cijene te dostizanje energetskih i ekoloških ciljeva Europske unije zahtijevaju drugačiji pogled na energetsku isplativost i energetske sustave od dosadašnjih. Povezivanjem naftne industrije i poljoprivrednog sektora izbjegavaju se troškovi napuštanja bušotina s kojima bi se suočila naftna kompanija, a druge strane, dostatna količina iskoristive energije postaje dostupna poljoprivrednom sektoru. Modeliranje energetskog sustava iskorištavanja energije iz geotermalnih voda i njegovo optimiziranje pomoću ventilokonvektora i dizalica topline glavna je teza diplomskog rada. U radu će biti sagledani svi dijelovi sustava, od geotermalnog ležišta do poljoprivrednog staklenika, te će analizom biti utvrđena potrebna količina energije za grijanje u svakom dijelu sustava u skladu s energetskom isplativošću i održivim razvojem projektiranog modela.

# 4. FINANCIRANJE I SUBVENCIONIRANJE PROJEKATA OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE

Kako istraživanje i razvoj projekata koji se tiču geotermalne energije zahtijevaju visoke investicije materijalnih i financijskih sredstava, potrebno je otkloniti rizik od neuspjeha ili ga svesti na najmanju moguću razinu racionalnim ulaganjem u geološko-geofizičke istražne metode i projektiranje. Dakle, neophodno je kreirati koncept koji olakšava i ohrabruje investiranje potencijalnih stranaka u visokorizične zahtjeve geotermalnih projekaka. Također, zakonodavni okvir je neizostavni dio analiziranja projekata korištenja geotermalne energije. Od 30. svibnja 2018. godine, u Republici Hrvatskoj na snazi je Zakon o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika (NN52/18) koji predstavlja legislativni dio projekata te kojim je uređeno istraživanje i korištenje geotermalnih resursa čija se akumulirana toplina može koristiti u energetske svrhe (Zakon, 2019). Također postoji Zakon o energiji, Zakon o regulaciji energetskih djelatnosti, Zakon o tržištu električne energije, Zakon o tržištu toplinske energije, Zakon o Fondu za zaštitu okoliša i energetsku učinkovitost, Zakon o obnovljivim izvorima energije i visokoučinkovitoj kogeneraciji, Zakon o zaštiti zraka, Zakon o zaštiti okoliša koji predstavljaju zakonodavni okvir kojim se uređuje energetski sektor obnovljivih izvora energije u Republici Hrvatskoj.

## 4.1. Sustavi poticaja

Najčešći sustavi poticaja izgradnje projekata obnovljivih izvora energije u Europskoj uniji jesu *feed-in* tarifni sustav poticaja, *feed-in premium* sustav poticaja, sustav kvota, porezne olakšice i krediti s povlaštenim kamatama (EC, 2013). Najčešće korišteni su Feed-in sustavi koji su korišteni u 23 zemlje Europske unije. Kako bi se odredio najadekvatniji sustav poticaja za određeni projekt, potrebno je proračunati nivelirani trošak električne energije (*engl. LCOE - levelised cost of electricity)* koji daje ekonomsku procjenu za određivanje razine poticaja (Held i dr., 2014).

## 4.2. Sustavi poticaja geotermalnih projekata u Europi

Na europskom tržištu postoje već razvijeni modeli eksploatacije geotermalnih voda u energetske svrhe koji su se pokazali kao izvodljivi i djelotvorni projekti, a njihovim pregledom može se dobiti jasnija slika te se mogu definirati primjeri najboljih praksi kao i faktori uspjeha ovakvih projekata. Unatoč brojnim izazovima, pojedine zemlje EU uspjele su razviti efikasan sustav za razvoj geotermalne energije. Cjelokupni sustav razvoja i iskorištavanja geotermalne energije, uključujući financijsko-zakonodavni okvir, razvile se

Francuska i Njemačka, države kod kojih su geološke informacije brzo dostupne, jasno definiran postupak razvoja projekata kao i tijela za izdavanje potrebnih dozvola, dostupan nacionalni program potpore kao i sustav poticaja. Danska je svoj efikasan sustav stvorila kroz jasno definiranje vlasništva nad bušotinama i resursima, Nizozemska kroz Nacionalni plan za geotermalnu energiju i potpore za osiguranje, a pojednostavljenom administracijom Češka je omogućila brži i kvalitetniji razvitak geotermalnih projekata na svom području (Angelino i dr., 2013).

Većina europskih zemalja svoju financijsku potporu eksploataciji i upotrebi geotermalne energije očituje isključivo kroz *feed-in* sustave poticaja. Glavni primjeri za to su Mađarska, Litva, Irska, Malta, Estonija, Poljska, Španjolska, Portugal, Latvija, Cipar i Slovačka. Također, raznolike mjere podrške koriste se i u ostalim državama; porezne olakšice u Mađarskoj i Francuskoj, krediti u Njemačkoj i Sloveniji, razni oblici indirektne podrške te zajamčene poticajne cijene u ostalim državama članicama Europske unije (EU). Ovakvi energetski projekti mogu biti financirani od strane ministarstava, primjerice ministarstva energetike, gospodarstva, industrije, poljoprivrede, zaštite okoliša i turizma. Postoje i posebni fondovi koji potiču i unaprjeđuju uporabu obnovljivih izvora energije kao što je Eko fond u Sloveniji i Bugarskoj, Državni fond za zaštitu okoliša u Češkoj i Rumunjskoj, Nacionalni fond za zaštitu okoliša u Estoniji i Latviji kao i Latvijski fond za ulaganja u zaštitu okoliša, kao i u Litvi, KAC u Mađarskoj, EKOFUNDUSZ u Poljskoj i FACE i FIDEME u Francuskoj. Također, Kohezijski ili EU strukturni fond nudi programe subvencioniranja projekata. Za energetski sektor, kao i projekte geotermalne prirode, subvencije iz regionalnih fondova (EFRD) kreću se od 15 % do 85 % ukupnih troškova projekata. Subvencije Europske unije rabe se putem Europske investicijske banke (EIB), nacionalnih ili lokalnih subvencija. Europska unija također potiče iskorištavanje subvencija i u vidu subvencioniranja kamatnih stopa ili rizičnih kapitalnih ulaganja. Za takve projekte, maksimalna potpora može biti uvećana za 10% (K4RES-H, 2004).

### 4.3. Sustav poticaja geotermalnih projekata u Republici Hrvatskoj

Kao nadležno tijelo u Hrvatskoj koje je zaduženo za poslove s financiranjem pripreme, provedbe i razvoja programa, projekata i srodnih aktivnosti u području očuvanja, održivog korištenja, zaštite i unapređivanja okoliša i na području energetske učinkovitosti i korištenju obnovljivih izvora energije je Fond za zaštitu okoliša i energetsku učinkovitost (FZOEU) (FZOEU, 2019.). Za financijski intenzivnije i veće projekte obnovljivih izvora energije kao što je izgradnja elektrane, troškove projektiranja i izgradnje elektrane snose investitori, a kao

poticaj korištenja obnovljivih izvora energije i proizvodnje električne energije, HROTE, Hrvatski operator tržišta energije, nudi poticajne cijene otkupa po jedinici proizvedene električne energije (HROTE, 2019a). Početkom 2019. godine Agencija za ugljikovodike (AZU) raspisala je natječaj za izradu studije „*Izvedivost gospodarenja i poticanja korištenja geotermalne vode u energetske svrhe za potrebe toplinarstva i proizvodnje električne energije*“. Cilj studije je dati odrednice za gospodarenje i poticanje iskorištavanja geotermalne energije te biti temelj za pokretanja sustava poticaja geotermalnih projekata u 2020. godini.

# 5. KORIŠTENJE GEOTERMALNE ENERGIJE NA LOKACIJI LUNJKOVEC – KUTNJAK

Kao primjer ležišta u modelu proračuna diplomskog rada odabrano je geotermalno ležište Lunjkovec – Kutnjak zbog svojih geotermalnih i proizvodnih karakteristika te dokazanih rezervi. Zbog dostupnih podataka koji su razrađeni prijašnjim studijama i elaboratima, ležište je pokazni primjer proračuna energetskog iskorištavanja geotermalne energije za poljoprivredne svrhe. Ležište, zajedno sa bušotinama, je trenutno neaktivno i čeka se investitor koji bi revitalizirao postojeću opremu i infrastrukturu te investirao u projekte iskorištavanja geotermalne energije.

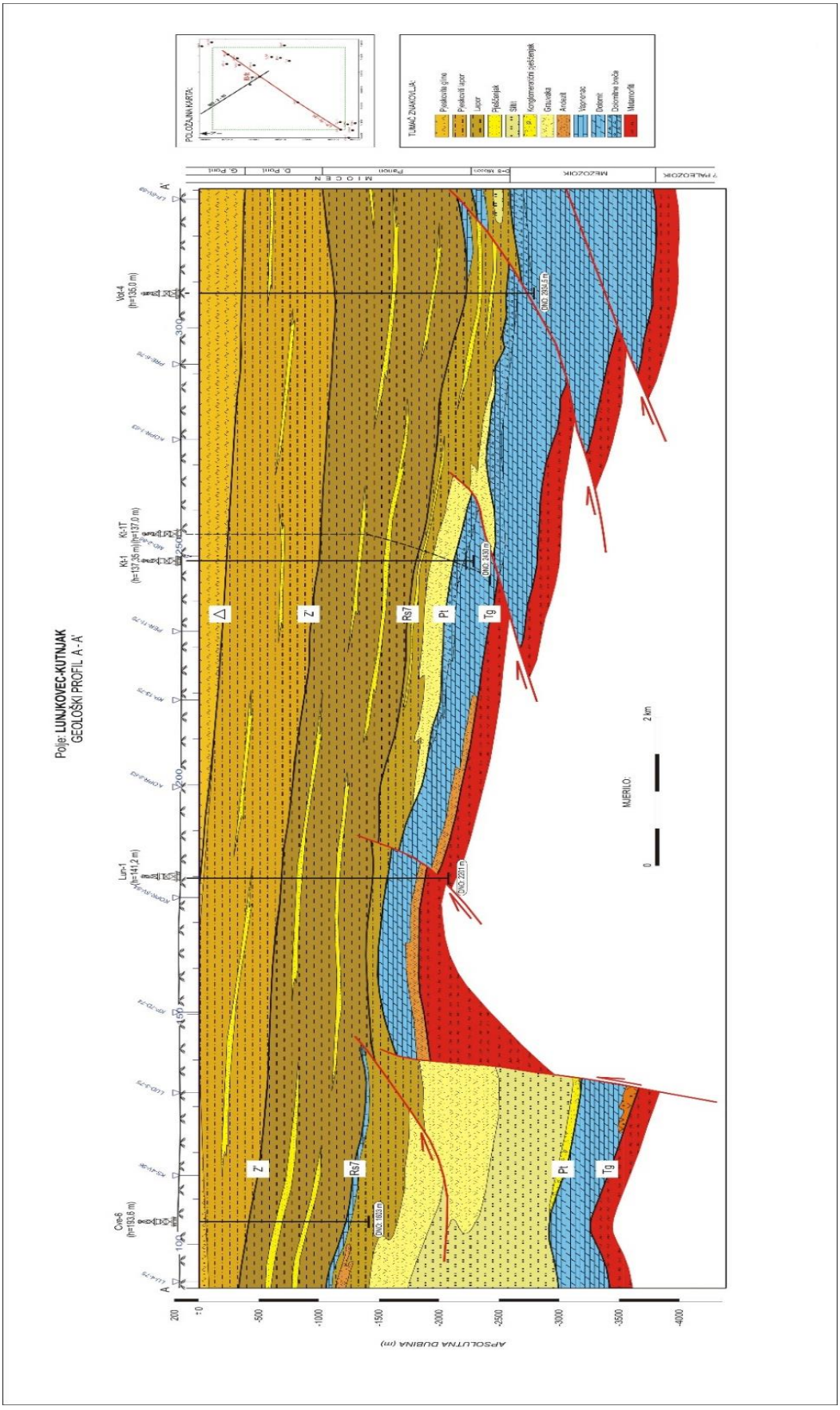
## 5.1. Studija „Koncepcija i izvodljivost programa gospodarskog korištenja geotermalne energije na lokaciji Lunjkovec – Kutnjak“

Vlada Republike Hrvatske je 2006. godine donijela stratešku odluku u kojoj podupire Program gospodarske uporabe geotermalne energije na lokaciji Lunjkovec – Kutnjak, kao demonstracijski projekt uporabe geotermalne energije u Republici Hrvatskoj. Program je predstavljao izvorno tehnološko i gospodarsko rješenje koje se trebalo etablirati kao pilot projekt i model budućem potencijalnom iskorištavanju naftno – plinskih bušotina u geotermalne svrhe. Studija „*Koncepcija i izvodljivost programa gospodarskog korištenja geotermalne energije na lokaciji Lunjkovec – Kutnjak“* predstavila je sveobuhvatni program gospodarskog korištenja geotermalne energije na jednom lokalitetu, uz opsežnu evaluaciju svih bitnih čimbenika neophodnih za konkretnu realizaciju projekta. Za predložene faze projekta (1. i 2. faza) iskorištavanja geotermalnog potencijala, u studiji su sagledani svi potrebiti prostorno - infrastrukturni radovi kao i mogućnosti financiranja i pravno utemeljenje projekta. Zahvaljujući dokumentima istražnih radova koji su provedeni radi utvrđivanja prisutnosti ugljikovodika kao i geotermalnog potencijala, stvorena je zadovoljavajuća baza pouzdanih podataka koja je nadalje uspostavila temelje za izgradnju energetskih projekata. Sukladno podacima INA-e, radi se o ležištu značajne veličine koje bi omogućavalo dugogodišnje iskorištavanje geotermalne energije pri gotovo konstantnoj temperaturi i tlaku (Tipurić i dr., 2006).

## 5.2. Opis geotermalnog ležišta Lunjkovec – Kutnjak

Kroz ležište geotermalne vode izrađene su tri bušotine, Kt – 1, Kt – 2 i Lun – 1, a daljnja izrada bušotina VOt – 1, VOt – 2 i VOt – 4 prekinuta je u krovini ležišta. Geološki profil ležišta s položajem bušotina prikazan na slici 5-1. (Tipurić i dr., 2006). Prema „*Elaboratu o*

*rezervama geotermalne vode u istražnom prostoru „Drava“ – Istražni lokalitet Lunjkovec – Kutnjak (Stanje 31.12.2004.)“*, (Veselinović i dr., 2005), zaključeno je da rezerve vode geotermalnog ležišta iznose 53,24 l/s i svrstavaju se u $C_1$ kategoriju rezervi. Na temelju rezultata interpretacija hidrodinamičkih mjerenja dobiven je podatak o početnom ležišnom tlaku na bušotinama Kt – 1 i Lun – 1. Na taj način određen je gradijent tlaka kroz ležište koji odgovara vrijednosti od 0,89 bar/10 m. Iz odnosa temperature spram dubine zalijeganja, utvrđeni gradijent temperature kroz geotermalno ležište iznosi 3,9 ˚C/100 m. Dravska potolina ima povišene geotermalne karakteristike što se može očitovati kroz geotermalni gradijent, koji za Dravsku potolinu iznosi $(5{,}1 \pm 0{,}7) \times 10^{-2}$ ˚C/m, a samo ležište odlikuje se povišenim geotermalnim gradijentom od 60 ˚C/km te temperaturom u rasponu od 130 – 140 ˚C. Efektivna debljina ležišta, zasićenog geotermalnom vodom, iznosi 155 m u bušotini Lun – 1, a u bušotini Kt – 1 iznosi 80 m, dok srednja efektivna debljina ležišta zasićena geotermalnom vodom iznosi 117,5 m. Ostali parametri ležišta koji su važni za proračune toplinarstva, energetike i sličnog područja prikazani su u tablici 5-1. (Tipurić i dr., 2006).




**Slika 5-1.** Geološki profil A-A' ležišta Lunjkovec-Kutnjak (Tipurić i dr., 2006)

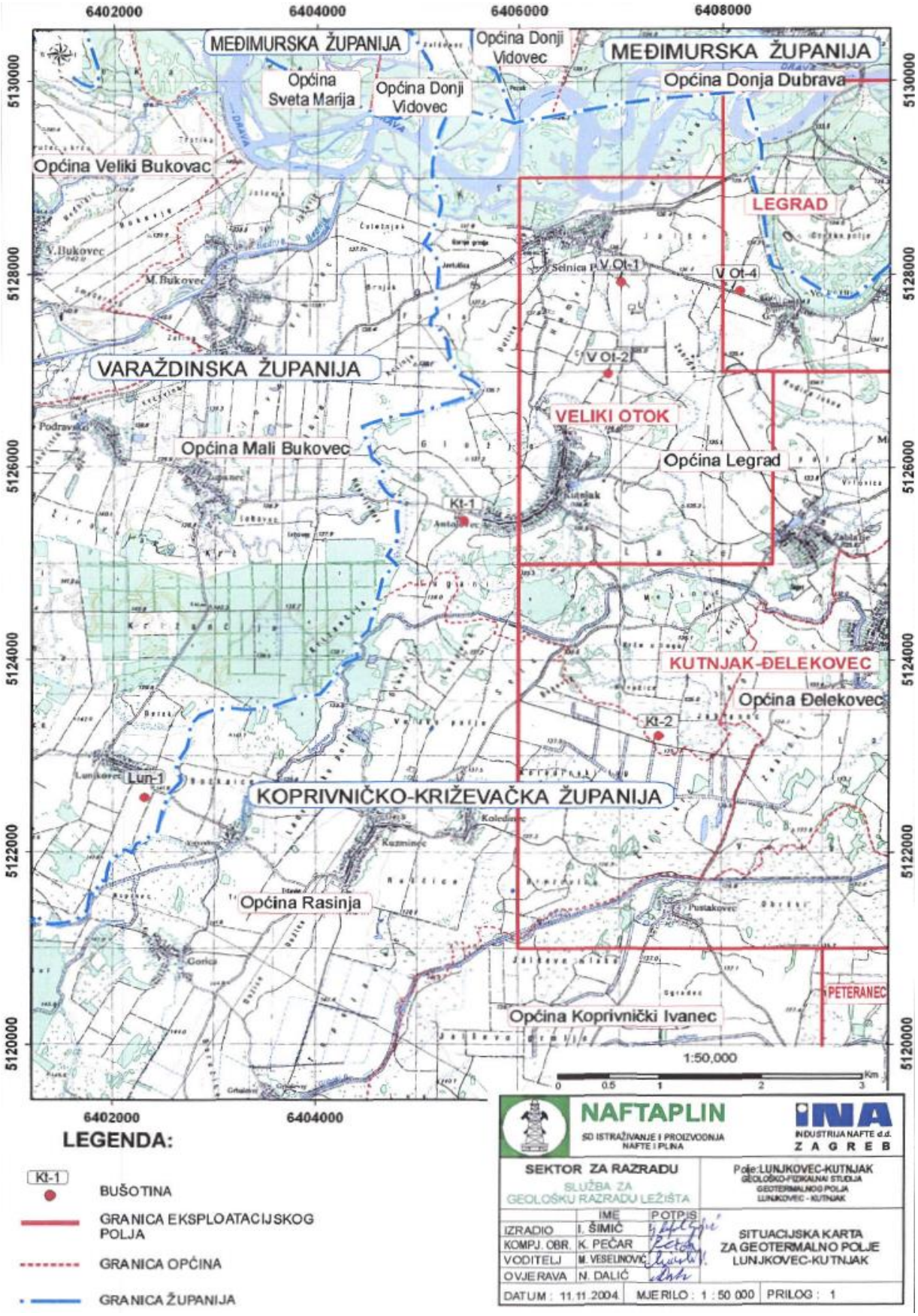
**Tablica 5-1.** Karakteristike geotermalnog ležišta Lunjkovec-Kutnjak (Tipurić i dr., 2006)

| Parametar | Vrijednost | Jedinica |
|---|---|---|
| Temperatura na ušću proizvodne bušotine | 140 | ˚C |
| Početni ležišni tlak | 216,7 | bar |
| Nadmorska visina ušća | 140 | m |
| Srednja vrijednost poroznosti ležišta | 0,075 | – |
| Zasićenje geotermalnom vodom | 1,0 | 100% |
| Propusnost ležišta | 70×10^(-3) | μm^2 |
| Koeficijent transmisivnosti | 8 201×10^(-3) | μm^2 × m |
| Površina ležišta | 83,16 | m^2 |
| Utisno-drenažna površina | 19,44 | m^2 |
| Volumen ležišta | 9 774 100 000 | m^3 |
| Volumen geotermalne vode | 687 670 000 | m^3 |
| Obujamski faktor vode kod početnih ležišnih uvjeta | 1,066 | – |
| Obujamski faktor vode pri uvjetima ušća proizvodne bušotine | 1,072 | – |
| Gustoća geotermalne vode pri ležišnim uvjetima | 943,7 | kg/m^3 |
| Gustoća geotermalne vode pri uvjetima ušća proizvodne bušotine | 938,4 | kg/m^3 |
| Specifični toplinski kapacitet geotermalne vode pri ležišnim uvjetima | 4,21 | kJ/kg×˚C |
| Specifični toplinski kapacitet geotermalne vode pri uvjetima ušća proizvodne bušotine | 4,26 | kJ/kg×˚C |
| Specifični toplinski kapacitet stijena | 854 | kJ/kg×˚C |
| Specifična obujamska toplina geotermalne vode pri ležišnih uvjetima | 3,97289×10^6 | J/m^3×˚C |
| Specifična obujamska toplina geotermalne vode pri uvjetima ušća proizvodne bušotine | 3,99571×10^6 | J/m^3×˚C |
| Specifična obujamska toplina ležišta | 2,343×10^6 | J/m^3×˚C |
| Viskoznost geotermalne vode pri ležišnim uvjetima | 0,23 | mPa×s |
| Viskoznost geotermalne vode pri uvjetima ušća proizvodne bušotine | 0,2 | mPa×s |
| Ukupna stlačivost vode i ležišne stijene | 1,66×10^(-4) | bar^(-1) |
| Toplinska vodljivost stijene | 2,157 | W/m×˚C |
| Specifična obujamska toplina matriksa stijene | 2,211×10^6 | J/m^3×˚C |
| Količna geotermalne vode koja se može pridobiti pri konstantnoj temperaturi | 1,35×10^9 | m^3 |
| Rezerve geotermalne vode | 53,24 | l/s |

### 5.3. Lokacijske i gospodarske značajke vezane uz okolicu geotermalnog ležišta

Geotermalni lokalitet Lunjkovec – Kutnjak smješten je u Koprivničko – križevačkoj županiji na nadmorskoj visini od oko 140 metara. Od grada Koprivnice udaljen je približno 12 kilometara sjeverozapadno te 8 kilometara istočno od grada Ludbrega. Od grada Zagreba udaljeno je približno 100 kilometara. Područje je približno ravničarsko s umjereno - kontinentalnom klimom s hladnim zimama što omogućava bavljenje poljoprivrednim aktivnostima. Podravina je tradicionalni poljoprivredni kraj s radnom snagom pretežito poljoprivrednog opredjeljenja i predispozicijama za stvaranje visokokvalitetnih

poljoprivrednih proizvoda. Imajući u vidu mogućnost iskorištavanja geotermalne energije, osobito kaskadne upotrebe s različitim temperaturnim razinama, te s druge strane blizinu okolnih gradova i povezanost s gradom Zagrebom kao najvećim potrošačem, nameće se misao o gospodarskom razvoju uzgoja povrća, cvijeća, ribogojstva, sušionice i lječilišnog turizma, a mogućnost priključenja na energetski sustav imali bi i okolni objekti različitih industrija. Općina Legrad, odnosno područje oko geotermalnog ležišta iznimno je depopulacijsko područje, a čine ju sedam naselja: Antolovec, Kutnjak, Mali Otok, Selnica Podravska, Veliki Otok i Zablatje. Prema podacima Državnog zavoda za statistiku, na području Općine Legrad je 2011. godine bilo ukupno 2.185 stanovnika i 920 kućanstava (Općina Legrad, 2019). Iseljavanje stanovništva posljedica je procesa deagrarizacije, industrijalizacije i deruralizacije te monocentričnog razvoja nekadašnjih općina u drugoj polovici 20. stoljeća. Gotovo trećina stanovnika zaposlena je u poljoprivrednom sektoru. Izgradnjom objekata koji bi se spojili na sustav iskorištavanja geotermalne energije kao što je sušionica, staklenici, ribogojilište i slični objekti potaknula bi se dodatna proizvodnja i unaprijedila dosadašnja poljoprivredna proizvodnja u regiji na temelju opskrbe energijom iz obnovljivog izvora, a također otvarala bi se nova mjesta za zapošljavanje i ublažio strmi depopulacijski trend. Na slici 5-2. je prikazana situacijska karta za geotermalno polje Lunjkovec – Kutnjak zajedno s rasporedom bušotina.



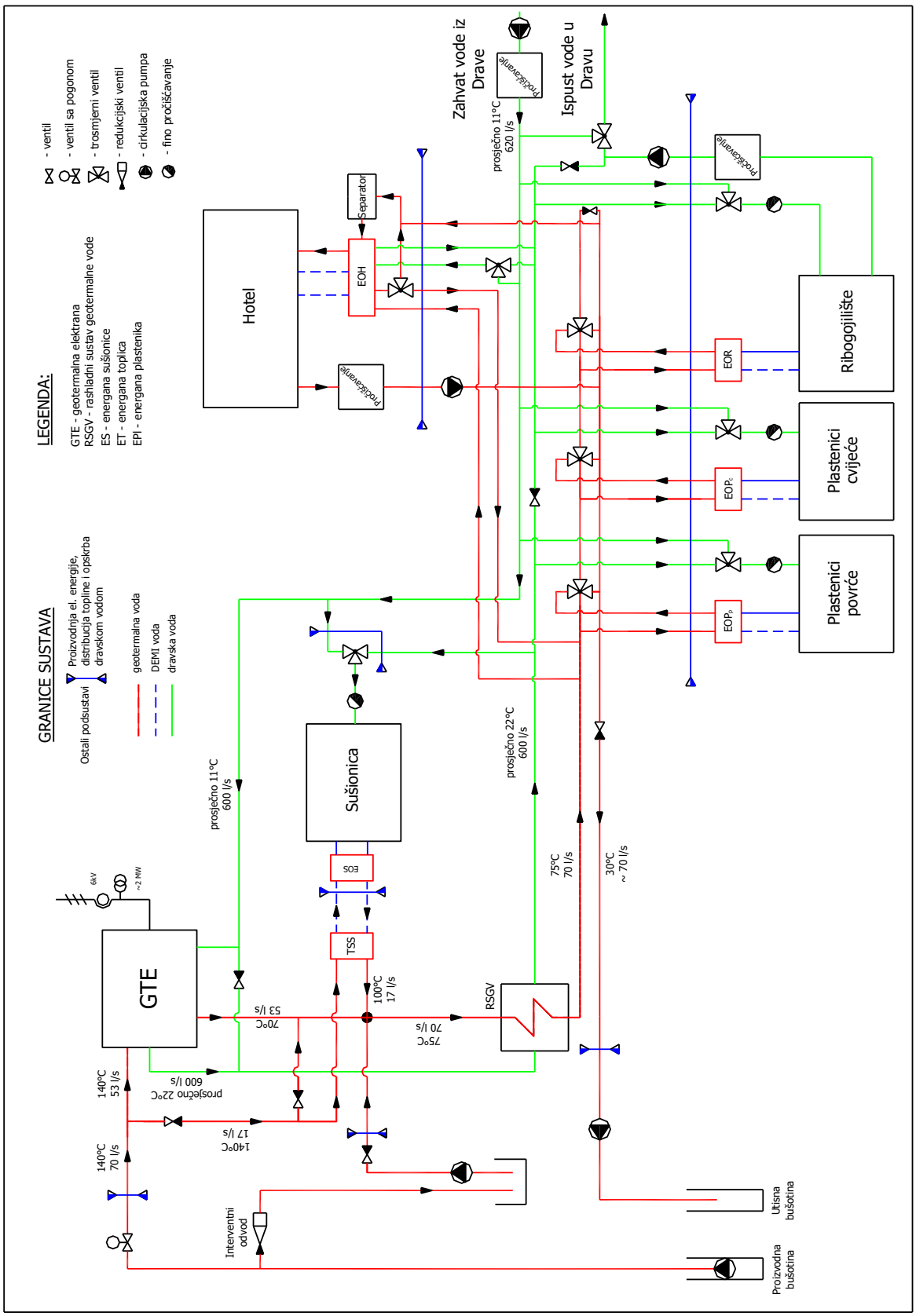

**Slika 5-2.** Situacijska karta za geotermalno polje Lunjkovec-Kutnjak (Veselinović i dr., 2005)

## 5.4. Planirani projekt gospodarskog iskorištavanja geotermalnog ležišta Lunjkovec – Kutnjak

Planirani projekt iskorištavanja geotermalne energije na geotermalnom polju Lunjkovec – Kutnjak sastojao se od dvije faze programa koristeći proizvodnu bušotinu Kt – 1 i utisnu bušotinu Lun – 1 s karakteristikama temeljenim na provedenim hidrodinamičkim mjerenjima. Za dimenzioniranje cijelog projekta, odabran je dinamički tlak ušća od 6 bara jer je prema podacima utvrđenim tijekom ispitivanja zaključeno da pri temperaturi ušća bušotine u dinamičkim uvjetima neće doći do taloženja kamenca sve dok je vrijednost dinamičkog tlaka iznad 6 bara. Pri spomenutom dinamičkom tlaku, proračunom je utvrđeno da eruptivno davanje bušotine Kt – 1 iznosi 4.600 $m^3$/dan geotermalne vode (Tipurić i dr., 2006). Budući da se program razvoja geotermalnog polja sastoji od više faza odnosno višestupanjskog korištenja geotermalne vode, zaključeno je da proizvodnja geotermalne vode iz bušotine Kt – 1 nije dostatna za sve faze projekta te će se za povećanje proizvodnje koristiti dubinska crpka.

### *5.4.1. Planirani objekti i model korištenja geotermalne energije*

Kako bi se osigurala dostatna količina geotermalne vode za ostvarenje ciljeva I. faze programa to jest za izgradnju geotermalne elektrane kao i za ostale proizvodne i uslužne objekte, potrebno je osigurati protok na ušću bušotine Kt - 1 od 70 l/s (6.000 $m^3$/dan). Nakon prolaza geotermalne vode kroz geotermalnu elektranu i sušionicu, dolazi do njezinog miješanja u zajedničkom cjevovodu pri kojem temperatura vode iznosi približno 70 ˚C što je dovoljno za grijanje toplica, staklenika i ribogojilišta. Ulazna temperatura svakog od navedena tri objekta bila bi približno jednaka izlaznoj temperaturi prethodnog objekta. Na takav način moguće je iskorištavanje geotermalne energije u temperaturnom rasponu od 70 ˚C do 35 ˚C. Tehnološka shema proizvodnje i distribucije transformiranih oblika geotermalne energije prikazana je na slici 5-3. (Tipurić i dr., 2006).




**Slika 5-3**. Tehnološka shema proizvodnje i distribucije transformiranih oblika geotermalne energije (Tipurić i dr., 2006)

Nakon realizacije I. faze programa, planirana je II. faza iskorištavanja geotermalnog polja pri kojoj je nužno osigurati povećanje pridobivanja geotermalne vode u iznosu od 300 l/s (25.900 $m^3$/dan). Za spomenutu izdašnost bušotine odlučeno je bušenje dodatne tri proizvodne bušotine s dubinskim crpkama i tri utisne bušotine za utiskivanje vode u ležište koje bi se izvele sustavom grma bušotina, odnosno sa zajedničkog ušća usmjeravanje bušotina u najpovoljnije dijelove ležišta, ovisno o svojstvima ležišta. Način iskorištavanja geotermalne vode u ovoj fazi programa bio bi vrlo sličan načinu iskorištavanja iz I. faze uz potencijalno proširenje sustava kojim bi se možebitno grijao grad Koprivnica (Tipurić i dr., 2006). Planirani projekti prve i druge faze programa prikazani su u tablici 5-2.

**Tablica 5-2.** Planirani objekti I. i II. faze iskorištavanja geotermalnog ležišta Lunjkovec-Kutnjak (Komerički i dr., 2009)

| Red. br. | Projekti Geotermalnog programa | Izgradnja u prvoj fazi | Izgradnja u drugoj fazi |
|---|---|---|---|
| **Energetski projekti i uređenje gospodarske zone** | | | |
| 1 | Geotermalni izvor | 70 l/sek. iz nove proizvodne i postojeće utisne bušotine | 300 l/sek. iz tri nove proizvodne bušotine s uronjenim pumpama i tri nove utisne bušotine |
| 2 | Geotermalna elektrana - toplana | 1 agregat od 2,5 $MW_e$ i vrelovodni kotlovi snage 20 $MW_t$ | 2 agregata od 4 $MW_e$ i vrelovodni kotlovi snage 30 $MW_t$ |
| 3 | Toplinske mreže | Cjevovodi za transport toplinske energije i otplinjene geotermalne vode – prva faza | Cjevovodi za transport toplinske energije i otplinjene geotermalne vode – druga faza |
| 4 | Uređenje gospodarske zone | Interna infrastruktura zone – prva faza | Interna infrastruktura zone – druga faza |
| **Korisnički projekti** | | | |
| 1 | Sušara povrća | Sušenje povrća 11.300 t/god. | Sušenje povrća 26.000 t/god. |
| 2 | Plastenici za uzgoj cvijeća | 2,5 ha plastenika s klimatima veličine 0,5 ha | 5 ha plastenika s klimatima veličine 0,5 ha |
| 3 | Plastenici za uzgoj povrća | 5 ha plastenika s klimatima veličine 1 ha | 10 ha plastenika s klimatima veličine 1 ha |
| 4. | Ribogojilište i sportski ribnjak | Uzgoj ribe 100 t/god. i ribnjak površine 5 ha | Uzgoj ribe 100 t/god. |
| 5 | Toplice Kutnjak | Vanjski bazeni i hotel s unutarnjim bazenima | Lječilište |
| 6 | Turistička naselja | Naselje Podravska Selnica | Naselje Kutnjak |
| 7 | Isporuka toplinske energije za Koprivnicu | - | 10 km vrelovoda i toplinske stanice |

## 5.5. Projektno stanje

Nakon prepoznavanja uloge obnovljivih izvora energije u energetskoj tranziciji te neizvjesnoj energetskoj budućnosti i nakon izrade studije „*Koncepcija i izvodljivost programa gospodarske uporabe geotermalne energije na lokaciji Lunjkovec – Kutnjak“* (Tipurić i dr., 2006), Vlada Republike Hrvatske potaknula je osnivanje Koordinacijskog društva za pripremu realizacije programa gospodarskog iskorištavanja geotermalne energije

na geotermalnom polju Lunjkovec – Kutnjak. U Društvo su imenovani predstavnici Hrvatskog fonda za privatizaciju, Koprivničko – križevačke županije, HEP-a, INA-e, prehrambene industrije Podravka i općine Legrad. Projekt nije napredovao dalje od izrađene studije i osnivanja koordinacijskog društva. Prema *„Analizi i postojećem stanju izvora geotermalnih voda na području Varaždinske županije“,* (Srpak i dr., 2019), Ministarstvo gospodarstva je po službenoj dužnosti, dopisom od listopada 2013. godine (zbog neizvršavanja obaveza iz Rješenja o odobrenju Eksploatacijskog polja), obavilo brisanje trgovačkog društva Ina-industrija nafte d.d. Zagreb kao ovlaštenika eksploatacijskog polja geotermalne vode Lunjkovec – Kutnjak iz registra eksploatacijskih polja Ministarstva gospodarstva i kao ovlaštenika upisalo Republiku Hrvatsku. U studenom 2014. godine se raspisalo javno nadmetanje za odabir najpovoljnijeg ponuditelja za dodatno istraživanje geotermalne vode radi davanja koncesije za eksploataciju geotermalne vode ocjenjujući da postoji potreba utvrđivanja gospodarske iskoristivosti geotermalne vode u već odobrenom eksploatacijskom polju Lunjkovec – Kutnjak. Ministarstvo je 21. siječnja 2015. godine donijelo odluku o odabiru najpovoljnijeg ponuditelja za dodatno istraživanje geotermalne vode radi davanja koncesije za eksploataciju geotermalne vode na eksploatacijskom polju Lunjkovec – Kutnjak. Nakon provedenog javnog nadmetanja Ministarstvo gospodarstva je odabralo ponudu trgovačkog društva Mb Geothermal d.o.o. Zagreb, kao najpovoljnijeg ponuditelja. U odluci o odabiru najpovoljnijeg ponuditelja definirane su obveze i rokovi izvršenja prema programu istražnih radova definiranih u natječajnoj dokumentaciji.

# 6. STAKLENIČKA PROIZVODNJA I MODELIRANJE STAKLENIKA

Tijekom posljednjih 20 godina, zemlje mediteranskog klimatskog područja postale su sve konkurentniji proizvođači stakleničkog odnosno plasteničkog povrća. Za vrijeme toga perioda došlo je do unaprjeđenja tehnologija koje traje i dan danas u smislu dizajna staklenika, vrste i kvalitete pokrovnog materijala, grijanja i kontrole klime, navodnjavanja, tretiranja biljaka i gnojidbe, suzbijanja štetočina i ostalog. Osim opskrbe lokalnih domaćinstava i tržišta, proizvodnja povrća u staklenicima i plastenicima cjenjena je zbog svog izvoznog potencijala i igra važnu ulogu u trgovinskoj bilanci nekoliko nacionalnih gospodarstava u mediteranskoj regiji. U zemljama jugoistočne Europe staklenička i plastenička je proizvodnja još uvijek u tranzicijskom razdoblju uslijed industrijskih i društvenih promjena devedesetih godina prošlog stoljeća. Spori prijelaz s centralno kontroliranih stakleničkih to jest plasteničkih industrijskih postrojenja na mala obiteljska gospodarstva rezultat je ovisnosti o tehnološkim kapacitetima i troškovima ulaganja malih uzgajivača (Hodder i dr., 2017). Prema izvješću UN-ove Organizacije za hranu i agrikulturu iz 2017. godine, ukupna obradiva površina pod staklenicima, odnosno plastenicima, u jugoistočnoj Europi je iznosila 104.560 ha, što čini otprilike 5,31 % ukupne povrćem kultivirane površine (FAOSTAT, 2019). Napredne tehnologije ove grane poljoprivrede, kao što su grijanje i kontrola klime, nisu još široko rasprostranjene, iako su u nekoliko zemalja prisutni primjeri uspješne primjene visokotehnoloških rješenja operativnog rada staklenika i plastenika. Pokrivanjem obradive površine ne samo da se štiti posađena kultura od vanjskih vremenskih nepogoda već se omogućava manipulacija mikro okolišem kako bi se optimizirale performanse posađenih kultura, produljilo trajanje proizvodnje, potaknulo rano cvjetanje i poboljšala proizvodnja i kvaliteta proizvoda. U daljnjem tekstu diplomskog rada, za proizvodnju kultura u stakleniku ili plasteniku koristiti će se pojam staklenička proizvodnja i staklenik te njihove varijacije, kao uvriježena i ustaljena terminologija bez obzira na građevni materijal.

## 6.1. Staklenička proizvodnja kultura u Republici Hrvatskoj

U Republici Hrvatskoj, staklenička proizvodnja je rastuća komponenta poljoprivredne industrije i još je uvijek u fazi razvoja te raste zajedno sa tržišnim zahtjevima. Prema zadnjim podacima FAOSTAT-a iz 2014. godine, pod usjevima povrća zabilježeno je 15.027 ha, od toga je 492 ha pod staklenicima (FAOSTAT, 2019). U posljednjih par godina, ove brojke su porasle kao i prosječni prinosi te prihodi proizvođača koji znaju biti viši nego kod

proizvodnje žitarica na istoj površini. Svoj veliki potencijal za stakleničku proizvodnju povrća Republika Hrvatska ne iskorištava dovoljno. Uzrok tomu su visoki troškovi proizvodnje, nekonkurentnost na tržištu, cijena repromaterijala, rasparceliranost poljoprivredne površine, nepovoljni krediti itd. Staklenička proizvodnja omogućava kontinuiranu proizvodnju tijekom cijele godine, kombiniranu proizvodnju kulture van njihove sezone, kontrolu od bolesti i štetočina te ujedno osigurava i zdraviju hranu (Papasolomontos i dr., 2013). Ono što predstavlja ograničavajući faktor je sama površina staklenika to jest unaprijed određena količina prinosa. Također, veliki se napori ulažu kako bi se smanjio trošak energije koja se koristi za grijanje omeđenog prostora. Povrh toga, povećana učinkovitost u smanjenju potrošnje energije uklapa se u trenutnu brigu o okolišu i cilju smanjenja emisija ugljikovog dioksida ($CO_2$) te stakleničkih plinova općenito.

U sljedećim poglavljima prikazan je pregled najboljih poljoprivrednih praksi za dizajn i strukturu staklenika te kontrolu unutrašnje klime s naglaskom na grijanje i ventilaciju kao i faktori o kojima ovise. Također su navedeni pokrivajući materijali i glavni tipovi staklenika i plastenika.

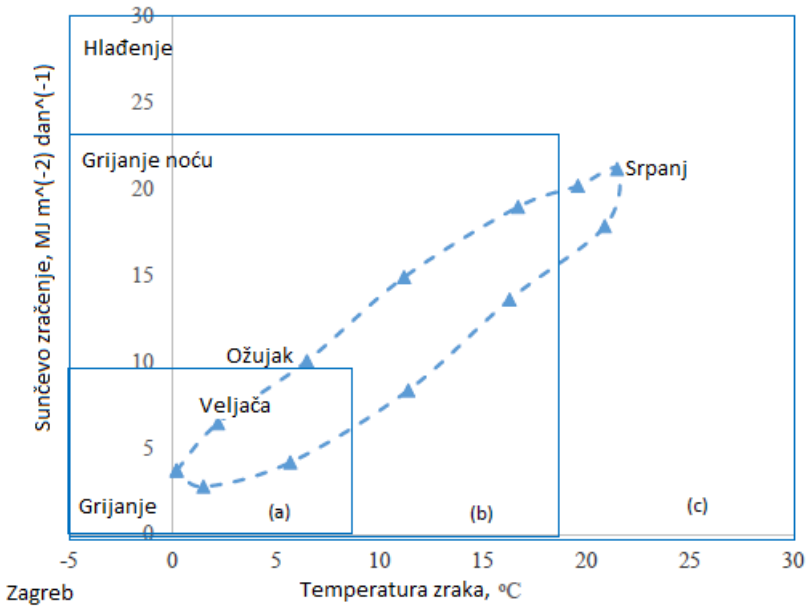
### 6.2. Izbor lokacije staklenika

Odabir mjesta ključni je čimbenik za profitabilnu i održivu proizvodnju povrća i cvijeća u staklenicima. Glavni činitelji koji određuju lokaciju i mjesto proizvodne površine staklenika su troškovi proizvodnje odabrane kulture, kvaliteta proizvedenog prinosa i troškovi prijevoza do tržišta. Troškovi proizvodnje i kvaliteta proizvodnje ovise o lokalnoj klimi i uvjetima uzgoja u stakleniku. Razina ulaganja u tehnologiju, kao i upravljanje, prvenstveno ovisi o lokalnoj klimi. Na bliskoj udaljenosti od odabranog mjesta također trebaju biti objekti koji će osigurati opskrbu električnom energijom ili drugim energentom koji se koristi za grijanje staklenika s pripadajućom opremom, vodu te pristupni putevi i cestovna povezanost (Hodder i dr., 2017). U obzir se treba uzeti i topografija terena, ekstremni vremenski uvjeti, navodnjavanje, drenaža tla, karakteristike tla, potencijalna onečišćenja tla, dostupnost dodatnog prostora, postojeća infrastruktura, orijentacija staklenika. Kada se govori o topografiji terena, preporuča se ravan teren za izgradnju staklenika s nagibom glavnih osi između 0 i 0,5 %, svi veći nagibi zahtijevaju terasiranje. Također je potrebno osigurati odvođenje oborinskih voda. Preporuča se izbjegavanje često maglovitih područja i područja koja su često u sjeni. Staklenici i plastenici trebaju biti zaštićeni od udara vjetra koji mogu imati štetne posljedice te se preporuča njihovo postavljanje u zaklonjenim terenima ili korištenje zaklona koji trebaju biti dovoljno propusni kako bi vjetar mogao strujati kroz njih.

Zakloni mogu biti objekti, stabla, šume te se mora voditi računa o udaljenosti od staklenika. Zaštita od vjetra utječe na troškove grijanja jer snažniji vjetrovi snižavaju temperaturu unutrašnjosti objekta (Hodder i dr., 2017). Dostupnost vode jedan je od glavnih zahtjeva za uzgoj kultura u staklenicima te je potrebno osigurati njezinu dovoljnu količinu. Najčešće je to voda kišnica koja se skuplja u rezervoare i voda iz prirodnih tokova. Na lokacijama s visokim vodnim licem i velikom količinom padalina obavezno je provođenje drenaže lokacije, a preporučeno je izbjegavanje takvih lokacija. Također, za uspješnu proizvodnju kultura, tlo mora imati svojstva primjerena za određenu kulturu i način uzgoja. Za staklenike i plastenike smještene u urbanim i industrijskim područjima, razina zagađenja zraka mora biti poznata jer plinovi i prašina imaju toksičan utjecaj na biljke te također ograničavaju sunčevo zračenje. Na odabranoj lokaciji također treba biti mjesta i za potencijalno proširivanje te pomoćna postrojenja i zgrade. Pristupni putevi, blizina transportne mreže, pristup komunikacijskoj mreži i izvoru energije moraju biti osigurani. Staklenici moraju biti orijentirani tako da se izbjegnu sjene reljefa koji ih okružuje. Potrebno je prilagoditi nagib i oblik krova staklenika i plastenika prema vjetrovima koji prevladavaju na području dok se istodobno iskorištava maksimalno sunčevo zračenje (Papasolomontos i dr., 2013).

### 6.3. Dizajn, tehnologije i kontrola klime staklenika

Većina kultura koje se uzgajaju u staklenicima i plastenicima jugoistočne Europe su vrste koje se uzgajaju u toplije vrijeme, naročito pogodne za temperature od 17 ˚C do 27 ˚C. Ako je prosječna minimalna vanjska temperatura zraka manja od 10 ˚C, potrebno je grijanje objekta posebice noću, a kada prosječna maksimalna vanjska temperatura zraka doseže 27 ˚C, ventiliranje prostora sprječava prekomjerne unutarnje temperature. Kako bi se odredila pogodnost lokacije i klime uspoređuju se prosječne mjesečne temperature zraka s odgovarajućim sunčevim zračenjem te kao rezultat usporedbe proizlazi odgovarajući period uzgoja određene kulture, uzimajući u obzir zahtjeve grijanja, ventilacije, sjenčanja i hlađenja. Na slici 6-1. je prikazan klimagraf za grad Zagreb za koji je potrebno danonoćno grijanje staklenika od sredine listopada do sredine veljače. S druge strane, potreba za hlađenjem ili sjenčanjem tijekom ljeta gotovo ni nema (Hodder i dr., 2017). Prema klimagrafu i informacijama koje pruža, može se odrediti struktura i dizajn staklenika sukladno sa toplinskim potrebama određene kulture.




**Slika 6-1.** Prikaz potreba za grijanjem staklenika na lokaciji grada Zagreba (Hodder i dr., 2017)

### *6.3.1. Pokrovni materijali staklenika*

Pokrovni materijal koji prekriva čeličnu konstrukciju zaslužan je za stvaranje „efekta staklenika“. Materijali za pokrivanje staklenika sa svojim karakteristikama utječu na stvaranje mikroklime unutrašnjosti. Postoji više vrsta pokrovnog materijala, a to su staklo, polikarbonati, polietilenske folije, polivinilkloridna folija, etilenvinilacetatna folija te akril. Kada se koriste dvoslojne folije razdijeljene zrakom, staklenik postaje energetski učinkovitiji i smanjuju se troškovi grijanja. Prednosti korištenja folija kao pokrovnog materijala su više temperature u plasteniku tijekom noći, zaštita od zamrzavanja, manje potrebne energije za zagrijavanje prostora, a berbe su ranije s višim prinosima (Parađiković i dr., 2018).

Na tržištu postoje različite vrste folija s različitim karakteristikama, uključujući difuzne, termalne, antivirusne i antikondenzacijske folije te polimerne folije s različitim aditivima. Ultraljubičaste (UV) apsorbirajuće folije ne samo da blokiraju insekte i štetočine, već i smanjuju širenje virusa koji prenose insekti. Nadalje, folije koje apsorbiraju UV zrake mogu smanjiti bolesti usjeva uzrokovane gljivicama koje koriste UV za sporulaciju. Primjena fotoselektivnih pokrovnih materijala koji sadrže pigmente koji reflektiraju infracrveno zračenje mogu poboljšati kontrolu mikroklime staklenika. Uz primjenu određenih folija difuzno svijetlo može prodrijeti dublje od izravne svijetlosti i utjecati na fotosintezu biljki. Usjev ima koristi od ravnomjerne raspodjele svjetla na različitim razinama usjeva, a to se

može postići primjenom modernih pokrovnih materijala koji sadrže pigmente, makrostrukture ili mikrostrukture koji mogu transformirati svu dolaznu izravnu svjetlost u difuznu svjetlost. Ostali elementi staklenika mogu biti: nosiva konstrukcija, krovni i bočni otvori, termalni zasloni to jest energetske zavjese, mreže za sjenčanje, mreže protiv insekata, folije protiv prašine, folije koje sprječavaju kondenziranje kapljica, folije koje sadrže pigmente za odbijanje infracrvenog zračenja. Većina navedenih elemenata može se razlikovati prema veličini, poroznosti (odnos otvorene površine i ukupne površine), debljine, teksture, boje, sposobnosti transmisije odnosno refleksije i otpornosti prema strujanju zraka (Hodder i dr., 2017).

### *6.3.2. Kontrola klime staklenika*

Plastenici i staklenici imaju ulogu solarnog kolektora izazivajući „efekt staklenika“ unutar omeđenog prostora. Ako temperatura unutrašnjosti nije regulirana može dovesti do neželjenih uvjeta rasta i razvoja biljki. Reguliranje temperature može se postići smanjenjem sunčevog zračenja sjenčanjem, izmjenama zraka ili ventilacijom i hlađenjem ili grijanjem. Sjenčanje se može izvesti nanošenjem boja na pokrovni materijal, vanjskim materijalima za sjenčanje te termalnim mrežama. Svaka od navedenih tehnika ima prednosti i mana. Sjenčanje je najmanje povoljna tehnika za reguliranje temperature jer može utjecati na produktivnost smanjujući sunčevo zračenje. Ventilacija je najjednostavniji sustav upravljanja klimom. Prirodna ili pasivna ventilacija se postiže kroz bočne i krovne otvore ili njihovom kombinacijom. Hladni zrak ulazi na donjim predjelima staklenika i izlazi kroz krovne otvore. Kako bi se smanjio ulazak insekata i drugih štetočine te smanjila upotreba insekticida, uobičajena je praksa postavljanja zaštitnih mreža na otvore. Budući da prirodna ventilacija ovisi o vanjskim vremenskim i okolišnim uvjetima, nužno je osiguravanje mehaničke ventilacije. Ona se temelji na stvaranju protoka zraka kroz objekt, na jednoj strani ventilatori otpuhuju zrak izvan staklenika dok na drugoj strani otvori omogućuju ulazak zraka. Mehanička ventilacija je najučinkovitiji način ventilacije i izmjene zraka, ali nije i energetski najučinkovitija jer zahtijeva veliku količinu energije za svoj rad. Ni sjenčanje ni ventilacija (prirodna ili mehanička) ne mogu spustiti temperaturu staklenika na razinu ispod vanjske temperature. Ako je potrebna niža temperatura, potrebno je usvojiti sustav hlađenja isparavanjem. Sustav se temelji na isparavanju vode koja se direktno dovodi u atmosferu staklenika. Razlikuje se sustav stvaranja magle gdje se male kapljice raspršuju pod tlakom u zrak iznad biljki što uzrokuje njihov spori pad i isparavanje i zamagljivanje što stvara visoku relativnu vlažnost te rezultira hlađenjem unutarnjeg prostora. Važno je spomenuti i

sustav ventilatora i hladnih podloga gdje se vanjski zrak upuhuje kroz podloge koje se konstantno održavaju vlažnima te voda iz podloga isparava i održava zrak hladnim. Protok vode, sustav distribucije vode te kapacitet pumpe mora biti pažljivo proračunat kako bi se osigurala dovoljna vlažnost podloge i spriječilo raspadanje materijala podloge (Papasolomontos i dr., 2013).

## 6.4. Grijanje staklenika

Staklenici pružaju kontrolirano okruženje za proizvodnju određenih kultura pomoću sunčevog zračenja koje povećava unutarnju temperaturu zraka. Međutim, kako bi se osigurala kvalitetna proizvodnja tijekom cijele godine potrebno je instalirati sustav grijanja. Optimalna temperatura zraka bitna je ne samo za kvalitetnu proizvodnju već i za kontrolu bolesti i opstanak biljaka. Problem niskih temperatura tijekom zimskih razdoblja rješava se toplinskom opskrbom staklenika. Spomenuti problem nije tehničke prirode s obzirom na raznolika rješenja i svakodnevno unapređivanje tehnologije, nego relativno visoki početni kapital i operativni troškovi usporavaju primjenu konvencionalnih ili alternativnih sustava grijanja u zemljama jugoistočne Europe.

### *6.4.1. Proračun ukupnih toplinskih gubitaka staklenika*

Kako bi se odabrao optimalan sustav grijanja za staklenik, nužno je pristupiti određivanju vršne potrošnje toplinske energije za određenu strukturu. Gubitak topline kroz staklenike sastoji se od dvije komponente: transmisijskih toplinskih gubitaka kroz stijenke zidova i krova i toplinskih gubitaka uslijed prodora vanjskog zraka to jest infiltracije i ventilacije (Raferty i dr., 1998). Ukupni toplinski gubici računaju se po sljedećoj formuli:

$$\Phi_{uk} = \Phi_t + \Phi_i \tag{6-1}$$

Gdje su:

$\Phi_{uk}$ - Ukupni toplinski gubici odnosno ukupni toplinski zahtjevi toplinske energije, kW

$\Phi_t$ – Transmisijski toplinski gubici kroz stijene zidova i krova, kW

$\Phi_i$ – Toplinski gubici uslijed prodora vanjskog zraka, kW.

Da bi se izračunali transmisijski toplinski gubici potrebno je izračunati površinu strukture. Ako postoji više vrsta pokrovnih materijala, računanje površine potrebno je podijeliti prema vrstama pokrovnih materijala. Nadalje, vrijednost površine množi se s koeficijentom ukupnog prolaza topline kroz materijal i razlikom vanjske temperature zraka i unutrašnje

temperature staklenika (Raferty i dr., 1998). Formula za računanje transmisijskih toplinskih gubitaka jeste:

$$\Phi_t = (A_1 \times U_1 \times \Delta T) + (A_2 \times U_2 \times \Delta T) + \cdots + (A_n \times U_n \times \Delta T) \quad (6\text{-}2)$$

Gdje su:

$A_1, A_2, A_n$ – Ukupne površine različitih materijala staklenika, $m^2$

$U_1, U_2, U_n$ – Koeficijent ukupnog prolaza topline kroz materijal, $W/m^{2\circ}C$

$\Delta T$ – Razlika vanjske temperature zraka i unutrašnje temperature staklenika, ˚C.

Unutarnja temperatura staklenika je temperatura koja se održava unutar strukture s obzirom na vrstu kulture koja se uzgaja. Za vanjsku temperaturu zraka obično se uzima vrijednost prosječne najniže temperature područja tijekom zimskog razdoblja. Koeficijent ukupnog prolaza topline za pojedine materijale ovisi o brzini vjetra (Raferty i dr., 1998).

Toplinski gubici uslijed prodora vanjskog zraka ili infiltracijski toplinski gubici analizirani su na temelju metode izmjene zraka (*engl. Air Changes per Hour*). Metoda se zasniva na broju izmjena zraka u stakleniku i vanjskog hladnog zraka po satu. Broj izmjena zraka je funkcija brzine vjetra, konstrukcije staklenika te temperaturne razlike. Broj izmjena zraka razlikuje se ovisno o pokrovnom materijalu strukture te za pokrovne materijale staklenika i plastenika može biti u rasponu od 0 do 3,5. Budući da je broj izmjena zraka povezan s volumenom staklenika, potrebno je izračunati volumen strukture (Raferty i dr., 1998). Nadalje, infiltracijski toplinski gubici računaju se po formuli:

$$\Phi_i = \frac{ACH \times V_s \times c_p \times \rho \times \Delta T}{3\,600} \quad (6\text{-}3)$$

Gdje je:

*ACH* – Broj izmjena zraka po satu

$V_s$ – Volumen strukture, $m^3$

$c_p$ – Specifični toplinski kapacitet zraka, J/kg×˚C

$\rho$ – Gustoća zraka, $kg/m^3$

$\Delta T$ - Razlika vanjske temperature zraka i unutarnje temperature staklenika, ˚C.

Ukupni toplinski gubici staklenika odnosno vršna potrošnja toplinske energije jednaka je zbroju transmisijskih i infiltracijskih gubitaka staklenika.

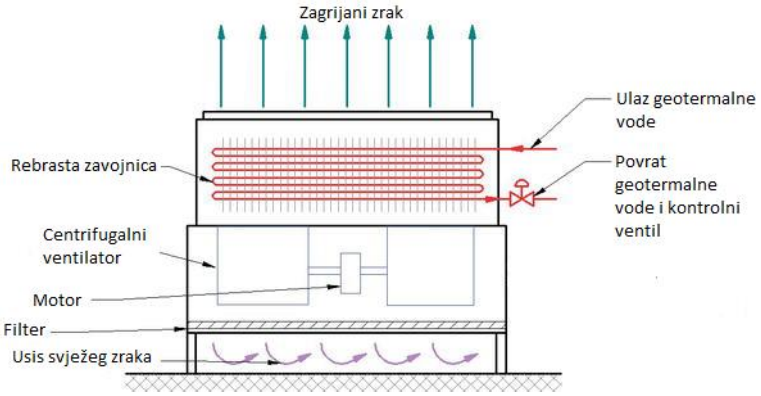
## 6.5. Korištenje geotermalne energije za grijanje staklenika

Grijanje staklenika može predstavljati i do 40 % operativnih troškova, ovisno o klimi podneblja. U posljednjih 25 godina grijanje staklenika je najčešća primjena geotermalne energije u poljoprivredi. U mnogim se europskim zemljama geotermalna energija koristi za grijanje prostora proizvodnje povrća, voća i cvijeća na komercijalnoj razini tijekom cijele godine. Grijanje staklenika predstavlja velik udio u potrošnji energije u poljoprivredi (Hodder i dr., 2017). Korištenje geotermalne energije u poljoprivredi pruža niže troškove u usporedbi s ostalim dostupnim izvorima energije. Instalacija i održavanje sustava je jednostavno te veća je učinkovitost korištenjem lokalno dostupnog izvora energije. Geotermalna energija predstavlja ogroman potencijal za daljnje unaprjeđenje agrarnog sektora (Parađiković i dr., 2008).

### *6.5.1. Najčešće izvedbe sustava za grijanje staklenika pomoću geotermalne energije*

Postoje različite izvedbe grijanja staklenika koristeći geotermalnu energiju. Najčešće su izvedbe sustava pomoću rebrastih cijevi, standardnih grijaćih jedinica, ventilokonvektorskih jedinica i dizalica topline. U većini primjena geotermalne energije potreban je izmjenjivač topline kako bi razdvojio geotermalni fluid od ostatka opreme grijanja jer geotermalni fluid zbog svojih svojstava često uzrokuje nakupljanje kamenca i koroziju. Izmjenjivač topline je najčešće je smješten između dvije petlje, gdje u jednoj cirkulira geotermalni fluid, a u drugoj fluid određenih karakteristika koji preuzima toplinu geotermalnog fluida. Pri predaji topline s jednog fluida na drugi, u izmjenjivaču topline dolazi do određenih gubitaka temperature, ovisno o tipu izmjenjivača topline. Od ostale opreme bitno je spomenuti cirkulacijsku pumpu, zaporne organe te cijevnu mrežu. Rebraste cijevi najčešće su načinjene od čelika ili bakra, a mogu biti kružnog, kvadratnog ili pravokutnog oblika kroz čiju unutrašnjoj struji tok fluida. Najčešće su postavljene pri tlu, duž staklenika, a troškovi održavanja su niski pogotovo kada se upotrebljava izmjenjivač topline. Standardne grijaće jedinice se sastoje od ulaza i izlaza za fluid, motora koji pokreće mali propeler i rebraste zavojnice. Standardne grijaće jedinice su dostupne u horizontalnoj i vertikalnoj izvedbi, a smještene su pri krovu strukture staklenika. Ventilokonvektorske jedinice slične su standardnim grijaćim jedinicama, a sastoje se od rebraste zavojnice te centrifugalnog ventilatora, smještenih u

jednom kućištu. Zavojnica ventilacijskih jedinica puno je deblja i obično ima manji razmak između rebara zavojnice i više redova zavojnice nego što je slučaj kod grijaćih jedinica. Više redova zavojnice omogućava učinkovitiji prijenos topline što rezultira većem iskorištavanju topline iz vode (Raferty i dr., 1998). Shema rada ventilokonvektora i ventilokonvektor prikazani su na slici 6-2. i 6-3.




**Slika 6-2.** Shema rada ventilokonvektora (Seyam, 2018)



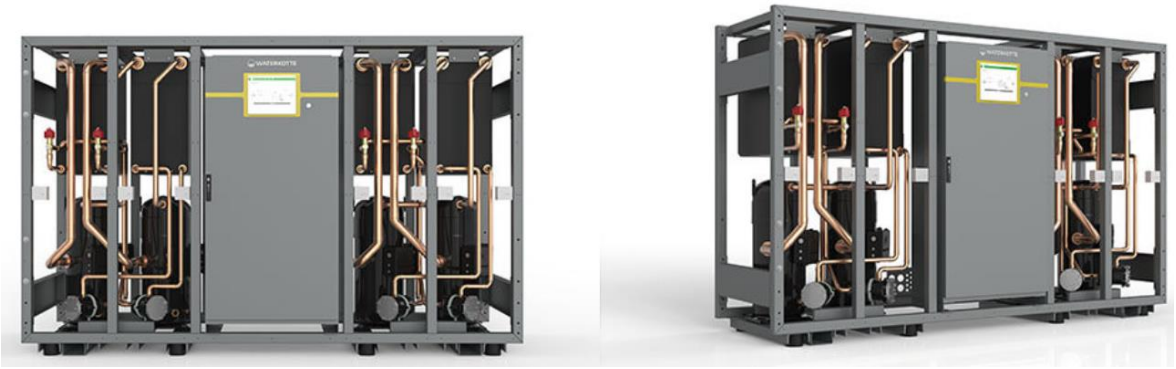
**Slika 6-3.** Stropni ventilokonvektor (Jindun Equipment, 2020)

Dizalica topline ili toplinska pumpa, kao sustav za grijanje staklenika, je izvor jeftinog i ekološki čistog načina grijanja budući da crpi toplinsku energiju iz vode, zemlje ili zraka, a temelji se na lijevokretnom Carnotovom kružnom procesu. Najveća prednost i razlog za

ugradnjom dizalice topline je mogući način rada i kao sustav za hlađenje staklenika. Jedna od negativnih strana ugradnje dizalice topline je visoki investicijskih trošak. Dizalica topline namijenjena za industrijsku upotrebu prikazana je na slici 6-4. i 6-5.



**Slika 6-4.** Vanjski izgled dizalice topline za industrijsku upotrebu (Waterkotte, 2020a)



**Slika 6-5.** Unutrašnjost dizalice topline za industrijsku upotrebu (Waterkotte, 2020b)

# 7. PRORAČUN DINAMIČKOG MODELA ENERGETSKI UČINKOVITOG ISKORIŠTAVANJA GEOTERMALNE ENERGIJE S GEOTERMALNOG POLJA LUNJKOVEC – KUTNJAK U SVRHU GRIJANJA STAKLENIKA

U ovome diplomskome radu bit će prikazan proračun modeliranja energetski učinkovitog iskorištavanja geotermalnog polja Lunjkovec - Kutnjak s pretpostavkom izgradnje objekata i infrastrukture iz I. faze realizacije programa studije „*Koncepcija i izvodljivost programa gospodarske uporabe geotermalne energije na lokaciji Lunjkovec – Kutnjak*“. Dinamički model primjenjiv je na svako naftno ili plinsko polje s podinskim vodonosnikom. Energetski učinkovito iskorištavanje odnositi će se na proizvodnju i prodaju toplinske energije vlasnicima objekata staklenika u svrhu grijanja istih. Nakon prolaza kroz geotermalnu elektranu, geotermalni fluid relativno visoke temperature, 70 - 75 ˚C, može se koristiti kao izvor toplinske energije ili se direktno utiskuje u geotermalno ležište radi podržavanja ležišnog tlaka. Kao izvor toplinske energije, geotermalna voda služi kao energent za grijanje objekata koji se nalaze u neposrednoj blizini postrojenja. Kao i u prvoj fazi realizacije programa, iskorištavanje toplinske energije biti će orijentirano na grijanje staklenika.

## 7.1. Geografski smještaj geotermalnog ležišta

Geotermalno ležište Lunjkovec – Kutnjak masivno je geotermalno ležište čije se granice protežu Varaždinskom i Koprivničko – križevačkom županijom kao što je prikazano na slici 7-1. Okružuju ga obradive površine koje se mogu prenamijeniti u staklenike za sezonsku i vansezonsku proizvodnju povrća, voća i cvijeća grijane toplinskom energijom geotermalnog fluida. Površina jedne klimatske jedinice odnosno staklenika, za potrebe proračuna modela iznositi će 2.000 $m^2$. Slika 7-2. prikazuje površinu polja označenog zelenom bojom, površine 1.996 $m^2$ što je približna površina staklenika proračunskog modela na kojem može biti smješten staklenik u neposrednoj blizini proizvodne bušotine Kt – 1. Polje na kojem se nalazi bušotina, označeno crvenom bojom, ukupne je površine 4.035 $m^2$, od kojih je 719 $m^2$ površina bušotinskog prostora, a preostalih 3.316 $m^2$ je površina oranice. Obje slike prikazuju mnoštvo oranica iste ili veće površine od površine tipskog staklenika, na kojima se mogu modularno slagati staklenici kao nekoliko njih u nizu što direktno povećava prinos kulture koja se proizvodi. Ograničavajući faktor modularnog slaganja staklenika vidljiv je također na slikama, a to je rasparceliranost oranica.




**Slika 7-1.** Katastarski položaj bušotina Kt-1 i Lun-1 (Katastar, 2020)




**Slika 7-2.** Bušotinski prostor i oranica površine tipskog staklenika (Katastar, 2020)

### 7.2. Opis odabranog staklenika

Kao izbor staklenika, za proračun modela izabran je staklenik tipa „Venlo“, prikazan na slici 7-3. i 7-4., kao najčešći tip staklenika, a također i zbog niskih investicijskih i operativnih troškova. Za kulturu koja bi se proizvodila u stakleniku odabrana je rajčica za proizvodnju tijekom cijele godine budući da je njezina proizvodnja moguća u grijanim i negrijanim staklenicima te na otvorenom. Rajčica je jedno je od najvažnijih povrća gledano s ekonomske strane jer njezina proizvodnja iznosi 28,03 % ukupne svjetske proizvodnje povrća (Nikolau i dr., 2019). Popularnost proizvodnje i konzumacije rajčice povećala se u zadnja dva desetljeća, posebno zbog sadržaja vitamina i likopena kao i ostalih prednosti koje pruža za zdravlje čovjeka (Nikolau i dr., 2019.). Okolišni zahtjevi za optimalnu proizvodnju rajčice prikazani su u tablici 7-1. (Parađiković i dr., 2008).



**Slika 7-3.** Staklenik tipa "Venlo" (HortiUsed, 2020)



**Slika 7-4.** Unutrašnjost staklenika "Venlo" (HortiUsed, 2020)

**Tablica 7-1.** Optimalni uvjeti za proizvodnju rajčice (Parađiković i dr., 2008)

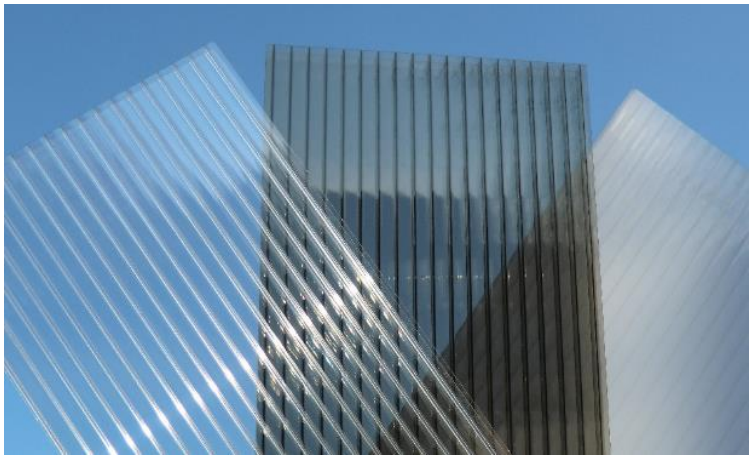
| | |
|---|---|
| Temperatura zraka | Tijekom dana: 20 – 25 ˚C<br>Tijekom noći: 15 – 18 ˚C |
| Vlažnost tla | 70 – 80 % |
| Vlažnost zraka | 65 – 75 % |
| pH hranjive podloge | 6 - 7 |

Kako bi staklenik bio prikladan za proizvodnju rajčice, odabrane su sljedeće dimenzije modularne jedinice staklenika (7-2.):

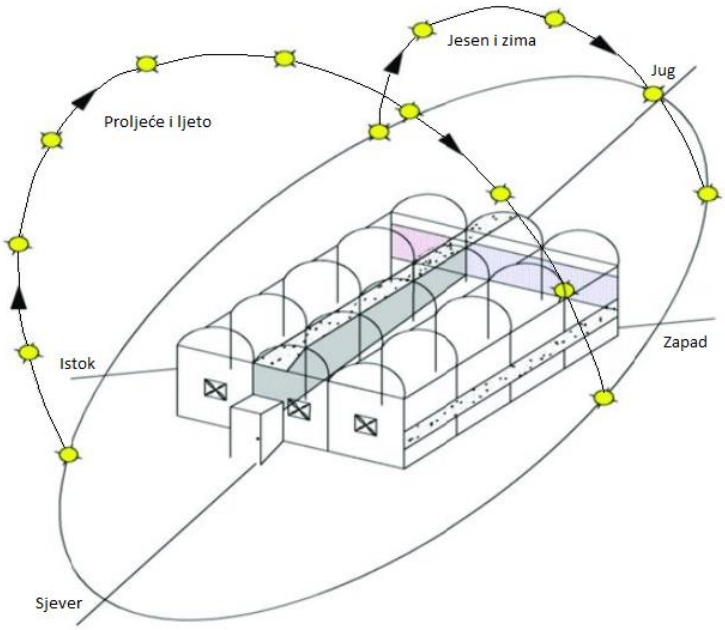
**Tablica 7-2.** Dimenzije tipskog staklenika

| | |
|---|---|
| Površina staklenika | 2.000 $m^2$ |
| Duljina staklenika | 100 m |
| Širina staklenika | 20 m |
| Radna visina | 2,5 m |
| Visina krova | 1 m |
| Duljina stranice krova | 10,05 m |
| Volumen staklenika | 6.000 $m^3$ |

Kao pokrovni materijal odabran je prozirni polikarbonat debljine 16 mm prikazan na slici 7-5., nosiva konstrukcija sastoji se od čeličnih cijevi širine 20 mm koje služe pridržavanje pokrovnih folija i odvodnju oborinskih vode, a na tlu se nalazi nasuta zemlja debljine 20 cm. Orijentacija staklenika je sjever – jug. Za mediteranske geografske širine, orijentacijom staklenika duž sjeverne, odnosno južne strane postiže se veća transmisija sunčeve svijetlosti, osobito tijekom ljetnih mjeseci, kao i veća ujednačenost svijetla budući da se kretanjem sunca s istoka na zapad mijenja i položaj sjene konstrukcijskih elemenata staklenika. Odabrana orijentacija staklenika prikazana je na slici 7-6. Na svakoj strani staklenika nalazi se prozor koji služi kao bočni ventilacijski otvor, površine 60 $m^2$. Na svakoj krovnoj strani nalaze se prozori ukupne površine 541 $m^2$ koji su ujedno i krovna ventilacija staklenika. Modelirani staklenik neće imati dodatne elemente staklenika kao što su insekt mreže i termalne zavjese.



**Slika 7-5**. Polikarbonatni pokrovni materijal (Louna-Esti HaljastuS, 2020)




**Slika 7-6.** Orijentacija staklenika (Nikolaou i dr., 2019)

### 7.3. Tehničke specifičnosti staklenika

Za kontrolu mikroklime staklenika, osim hlađenja i ventilacije, grijanje je od velike važnosti, osobito na područjima gdje prevladavaju niske temperature tijekom godine. Grijanje staklenika bitno je čak i u zemljama s umjerenom klimom, poput mediteranske regije, kako bi se povećala proizvodnja usjeva u smislu količine i kvalitete (Kittas i dr., 2013). Za potrebe izrade diplomskog rada i proračuna modela energetskog iskorištavanja geotermalnog ležišta Lunjkovec – Kutnjak, kontrola mikroklime bit će usmjerena na grijanje staklenika i toplinske zahtjeve istih.

Određivanje toplinskih potreba staklenika temelji se na određivanju transmisijskih i infiltracijskih gubitaka topline. Za računanje transmisijskih gubitaka potrebno je odrediti površine građevnog materijala, razliku između temperature zraka i unutarnje projektirane temperature staklenika te koeficijente ukupnog prolaza topline kroz građevni materijal. Koeficijenti ukupnog prolaza topline kroz odabrani materijal prikazani su u tablici 7-3. (URSA, 2020).

**Tablica 7-3**. Koeficijenti ukupnog prolaza topline (URSA, 2020)

| Dio staklenika | Materijal | Koeficijent ukupnog prolaza topline ($W/m^2K$) |
|---|---|---|
| Pod | Nasuta zemlja | 4,44 |
| Nosiva konstrukcija | Čelik | 5,871 |
| Zapadni kosi krov | Polikarbonat (16 mm) | 2,7 |
| Istočni kosi krov | Polikarbonat (16 mm) | 2,7 |
| Južni prozor | Polikarbonat (16 mm) | 2,7 |
| Sjeverni prozor | Polikarbonat (16 mm) | 2,7 |
| Zapadni prozor | Polikarbonat (16 mm) | 2,7 |
| Istočni prozor | Polikarbonat (10 mm) | 2,7 |

Za računanje infiltracijskih toplinskih gubitaka potrebno je odrediti broj izmjena zraka po satu što za polikarbonat iznosi 2 – 3 izmjene, volumen grijanog prostora, specifični toplinski kapacitet zraka, gustoću zraka te razliku vanjske temperature zraka i unutarnje projektirane temperature staklenika. Za grijanje staklenika čiji obujam grijanog prostora iznosi 6.000 $m^3$, odabrane su 3 izmjene zraka po satu uz projektiranu unutarnju temperaturu grijanja od 18 ˚C i prekid grijanja na 15 ˚C vanjske temperature zraka.

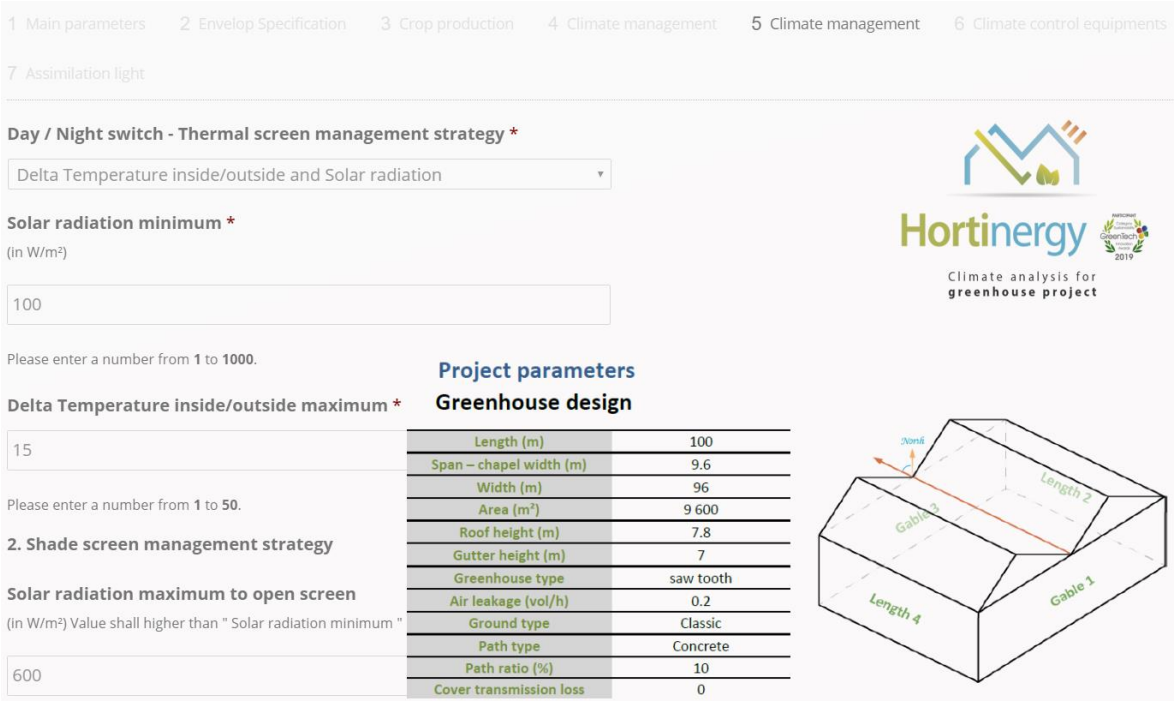
## 7.4. Opis korištenih programa

Kako bi izračun toplinskih potreba staklenika bio što točniji i precizniji korištena su dva komercijalna programa, online program „Hortinergy“ i računalna aplikacija „URSA Građevinska fizika 5.0“. Program „Hortinergy“ namjenski je program za dizajniranje staklenika i računanje godišnje potrošnje energije staklenika te je za potrebe izrade diplomskog rada dobivena besplatna licenca za korištenje u akademske svrhe. Računalna aplikacija „URSA Građevinska fizika 5.0“ upotrebljava se za energetsko certificiranje zgrada i za proračun toplinskih gubitaka i dobitaka dizajniranog objekta. Odabirom građevnih materijala program se može koristiti za dizajn staklenika i proračun godišnjih potrebnih toplinskih energija.

### *7.4.1. Hortinergy ®*

Pomoću Hortinergy programa moguća je inovativna i optimalna konfiguracija staklenika kako bi se smanjila potrošnja energije te je dostupan proračun potrošnje energije i troška

energije. Modeliranje staklenika i proračun energetske učinkovitosti temelji se na dokazanim algoritmima koji su potvrđeni na mjerenjima provedenim pod mediteranskom klimom. Općenita metoda korištenja programa sastoji se od unosa osnovnih podataka kao što su primjerice lokacija i orijentacija strukture te pokrovni materijali, dalje se unose postavke kontrole klime i zahtjeva grijanja, odabir kulture, oprema kontrole klime te prilagodba svijetla. Izvještaj koji se dobije nakon završenog modeliranja uključuje pregled potrošnje energije za grijanje, hlađenje na satnoj, mjesečnoj i godišnjoj bazi, pregled baznog i vršnog sustava grijanja s različitim energentima te krivulju vršne potrošnje toplinske energije, pregled odabrane pomoćne opreme te usporedbu rezultata (Hortinergy, 2020). Korisnički prozor programa Hortinergy prikazan je na slici 7-7.

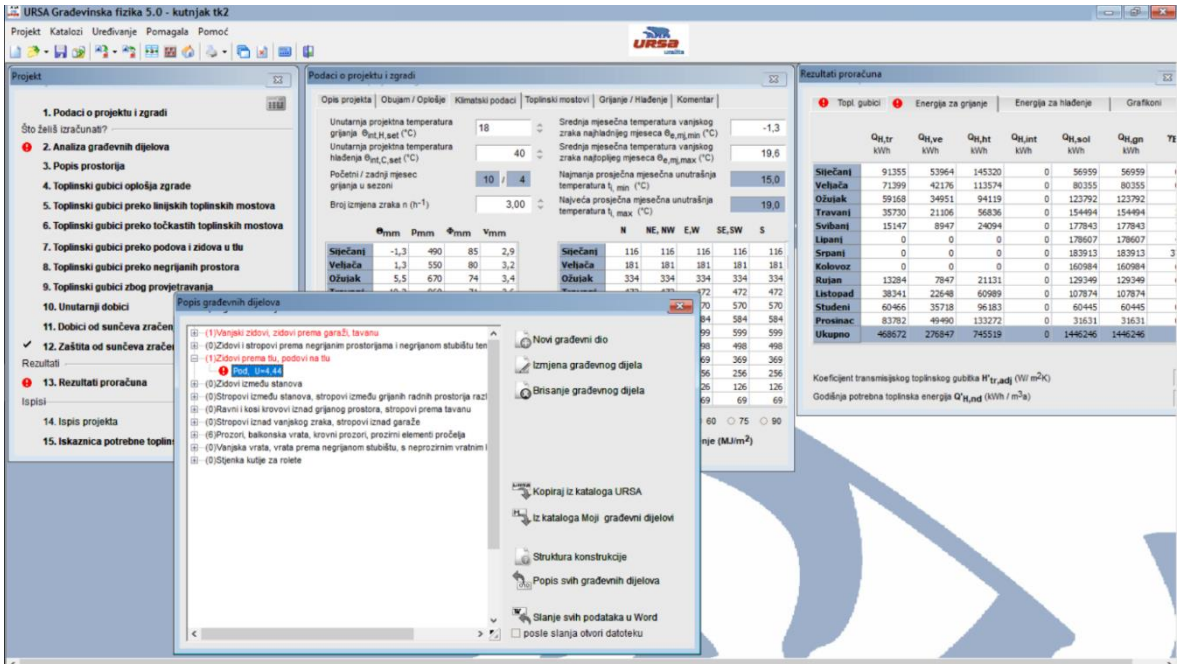



**Slika 7-7.** Interaktivni korisnički prozor programa Hortinergy (Academic Licence) (Hortinergy, 2020)

### *7.4.2. Ursa Građevinska fizika 5.0*

Računalna aplikacija "URSA Građevinska fizika 5.0" namijenjena je proračunu toplinskih gubitaka i difuzije vodene pare u građevnim dijelovima zgrade i zgrade u cjelini.. Program obuhvaća URSA materijale, predložene sustave konstrukcija i preko 150 detalja pravilne upotrebe URSA materijala (URSA, 2020). Modeliranje projekta ili zgrade započinje unošenjem osnovnih podataka u skočni prozor. Korisnički prozor programa URSA

Građevinska fizika 5.0 prikazan je na slici 7-8. Zatim se popunjava popis građevnih dijelova te izračunavaju toplinski gubici oplošja zgrade, gubici preko linijskih i točkastih toplinskih mostova, gubici preko podova i zidova u tlu i preko negrijanih prostora te toplinski gubici uslijed provjetravanja. Slijedi proračun unutarnjih dobitaka i dobitaka od sunčeva zračenja. Rezultati proračuna dobivaju se u posebnom skočnom prozoru gdje su prikazani toplinski gubici, energija za grijanje, energija za hlađenje i grafikoni.

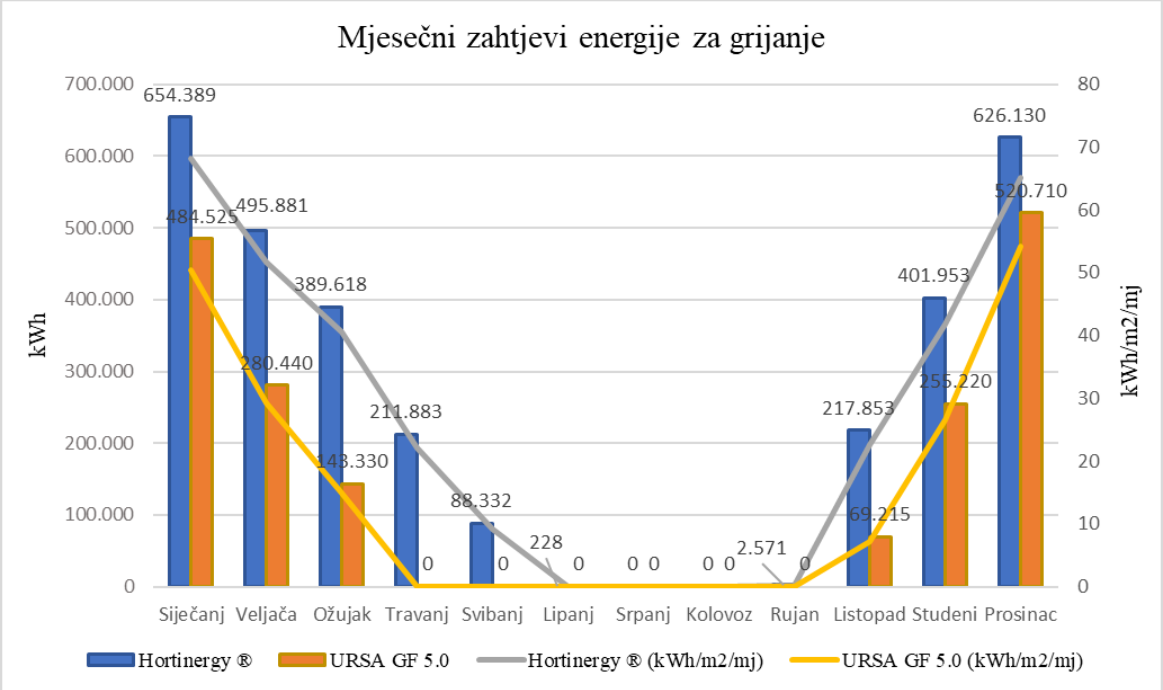



**Slika 7-8.** Interaktivni korisnički prozor programa URSA Građevinska fizika 5.0 (URSA, 2020)

### 7.5. Usporedba rezultata korištenih programa

Nakon unošenja karakteristika staklenika u oba programa i odabira sustava grijanja, rezultati proračuna prikazani su na slici 7.9. Razlike u brojkama očituju se u projektiranju 1 hektara staklenika u softveru Hortinergy te pet tipskih staklenika površine 2.000 $m^2$ u računalnoj aplikaciji URSA Građevinska fizika 5.0. Mjesečna potrošnja energije za grijanje veća je u programu Hortinergy te se najveće razlike primjećuju u prijelaznim mjesecima između sezone grijanja i sezone kada grijanje nije potrebno. U tim mjesecima, u ožujku, listopadu i studenom, prosječne razlike između dva programa sežu i do 55 %. U mjesecima kada je grijanje potrebno cijelo vrijeme, u prosincu, siječnju i veljači, prosječne razlike u grijanju iznose manje od 30 %. Toplinske potrebe za grijanjem izračunate su za ukupnu neto podnu površinu grijanog dijela objekta koja iznosi 9.600 $m^2$. Također je izračunata mjesečna

potrebna toplinska energija po $m^2$ objekta koja prati trend smanjenja potrebne energije za grijanje početkom godine kao i povećanje potrebne toplinske energije tijekom jesenskih i zimskih mjeseci, dok tijekom ljeta uopće nema potrebe za grijanjem. Preciznijim programom smatra se URSA Građevinska fizika 5.0 jer uključuje više parametara u modeliranje zgrade ili objekta, a proračun toplinske energije temelji se na srednjoj temperaturi zraka u posljednjih 30 godina za odabranu lokaciju dok se u softveru Hortinergy proračun temelji na godišnjoj temperaturi zraka.

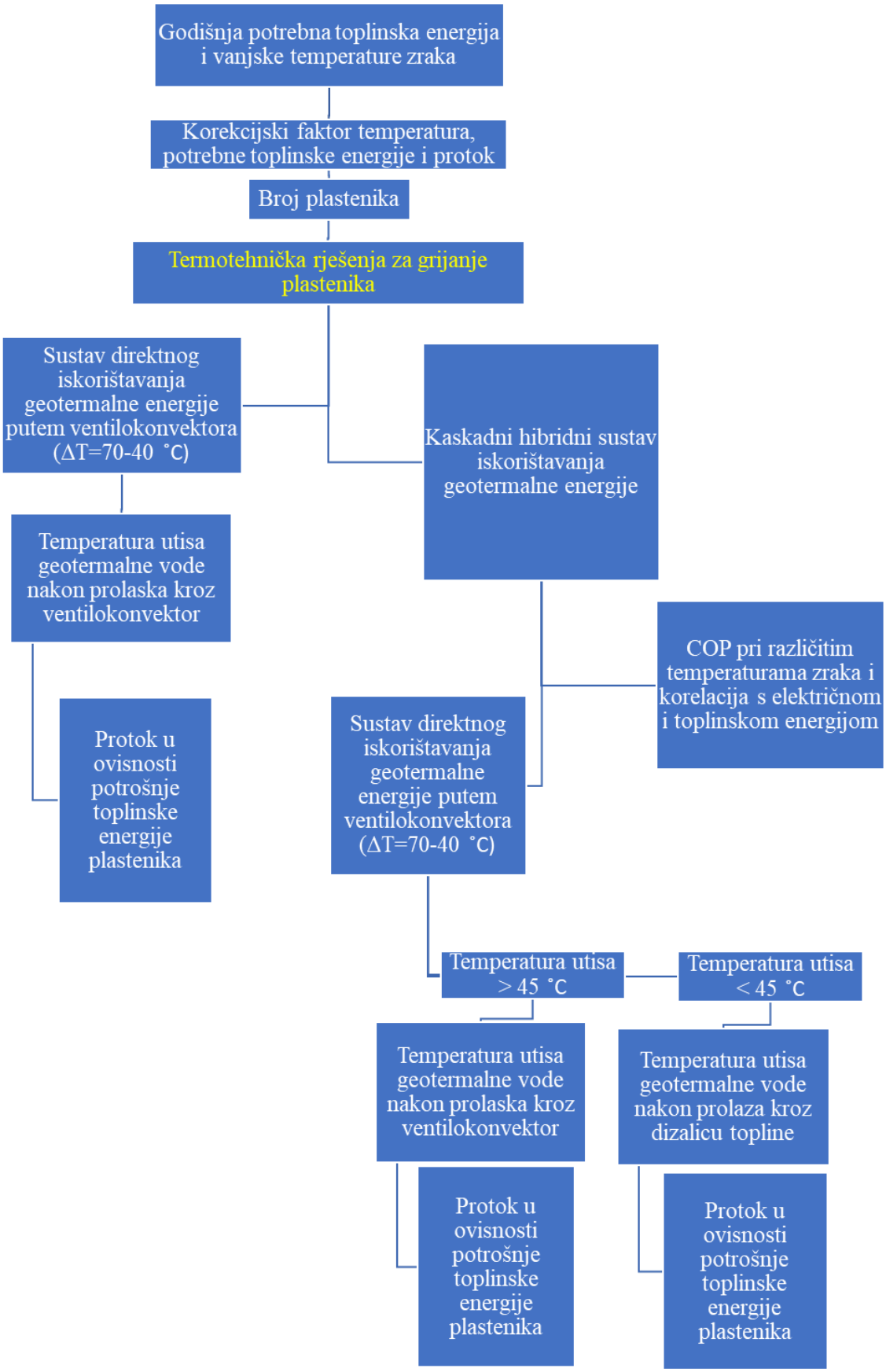



**Slika 7-9.** Usporedba mjesečnih potrebnih toplinskih energija korištenih programa

Nakon usporedbe rezultata i primjetne sukladnosti proračuna, ali za daljnji rad izabrana je računalna aplikacija URSA Građevinska fizika 5.0 koja ujedno služi za energetsko certificiranje zgrade i objekata te se prilagodbom može prenamijeniti za dizajn i energetski proračun staklenika.

### 7.6. Dinamički proračun modela energetski učinkovitog iskorištavanja geotermalne energije

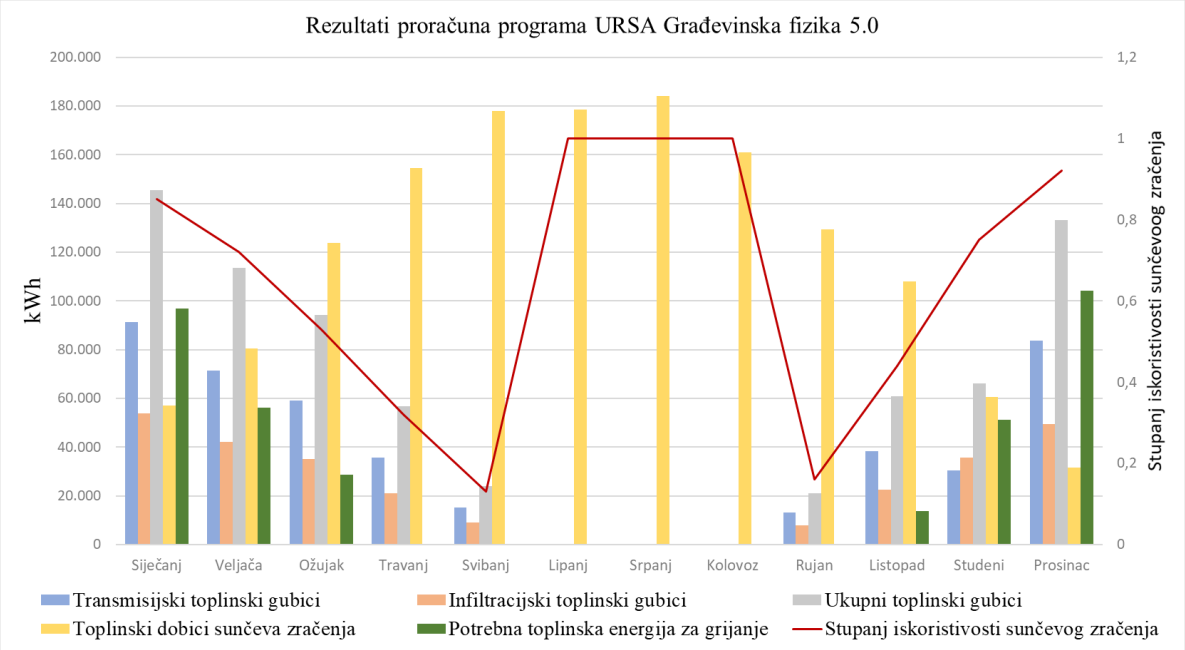
Radi jednostavnijeg pregleda modela proračuna na slici 7-10. prikazan je dijagram toka proračuna modela. Za proračun je korišten Microsoft Excel, program za tablično računanje programskog paketa Microsoft Office. Proračun u MS Excelu odvijao se u 131.496 ćelija, odnosno broja sati u razdoblju uzastopnih 15 godina radi boljeg razumijevanja srednjih temperaturnih režima.




**Slika 7-10.** Dijagram toka proračuna konstruiranog modela

### *7.6.1. Rezultati proračuna računalne aplikacije URSA Građevniska fizika 5.0*

Računalna aplikacija URSA Građevinska fizika 5.0 radi na temelju tridesetogodišnje srednje temperature u Republici Hrvatskoj, odnosno, na temelju tridesetogodišnje srednje temperature na meteorološkoj postaji Križevci koja je najbliža geotermalnom polju Lunjkovec – Kutnjak to jest bušotinama Kt – 1 i Lun – 1. Rezultati proračuna prikazani su na grafu 7-11.



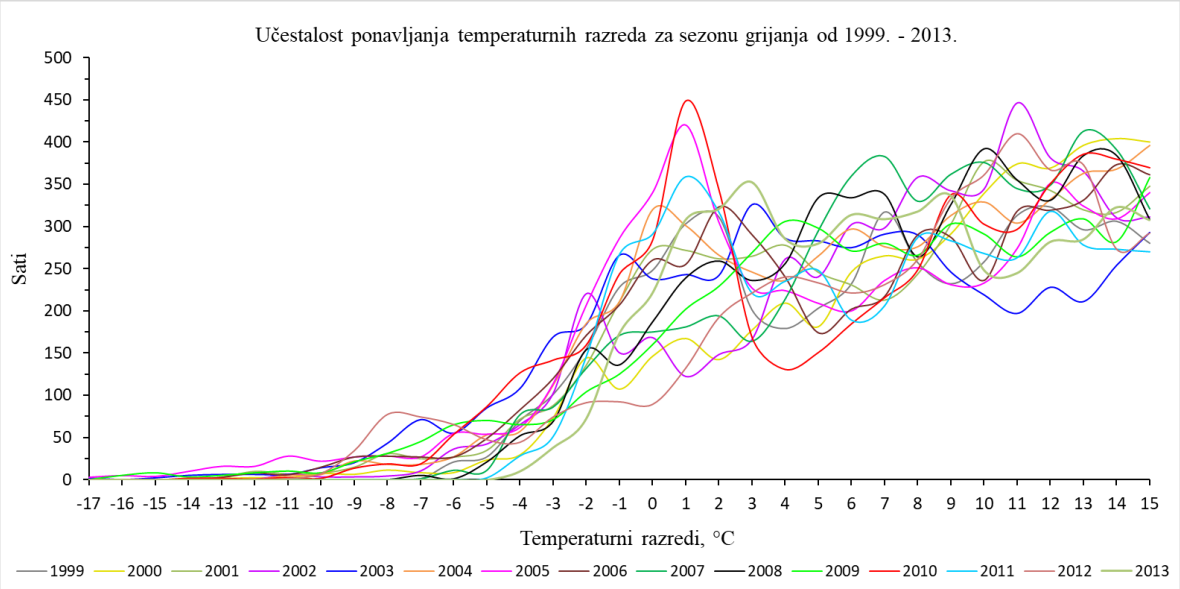

**Slika 7-11.** Rezultati proračuna programa URSA Građevinska fizika 5.0

Primjetno je da toplinski gubici postoje tijekom cijele godine, osim u lipnju, srpnju i kolovozu kada je zbog sunčevog zračenja potrebno hladiti staklenik. Toplinski gubici se najviše događaju kroz prozore (oko 59 %), zatim uslijed ventiliranja (oko 37 %) i kroz tlo (oko 3 %). Prevelika količina toplinskih dobitaka sunčevog zračenja kompenzira toplinske gubitke u travnju i svibnju te u rujnu, gdje je u određenim danima mjeseca također potrebno hlađenje staklenika. Prema rezultatima proračuna može se zaključiti da je toplinska energija potrebna tijekom pola godine, odnosno od listopada do ožujka, a tijekom ostalih mjeseci potreba za grijanjem se kompenzira toplinskim dobicima sunčeva zračenja.

### *7.6.2. Korekcijski faktor temperatura*

Kako bi se napravio dinamički proračun potrošnje toplinske energije iz geotermalnog ležišta i odredio ukupan broj mogućih tipskih staklenika koji bi se mogli grijati pomoću geotermalne vode potrebno je sagledati šire vremensko razdoblje radi pravilnog

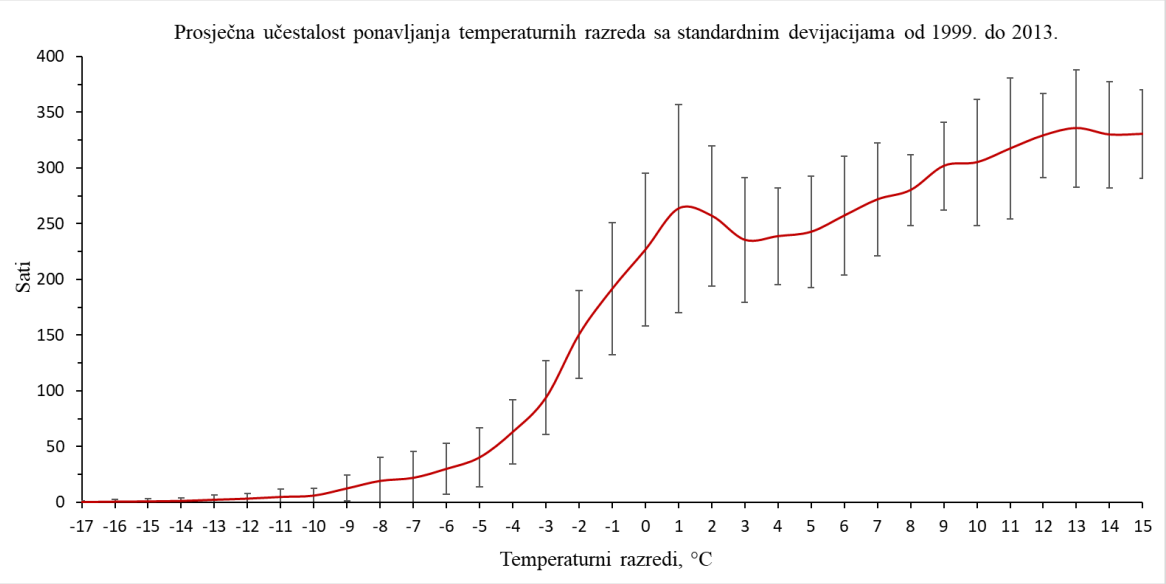
dimenzioniranja staklenika. Vremensko razdoblje na kojem će se temeljiti proračun proteže se kroz 15 godina, od 1999. do 2013., sa zabilježenim satnim temperaturama zraka čije su vrijednosti dobivene u suradnji s Državnim hidrometeorološkim zavodom. Dinamički proračun diplomskog rada biti će izrađen samo za sezone grijanja staklenika. Kao što je već prije rečeno, prekid grijanja staklenika događa se kada vanjska temperatura zraka dosegne 15 ˚C, tada se unutar staklenika projektirana temperatura od 18 ˚C održava pomoću sunčeva zračenja. Slika 7-12. prikazuje učestalost ponavljanja temperaturnih razreda za vremenski period od 1999. do 2013., gdje je za svaku razliku stupnja temperature sumiran broj sati u svih 15 godina. Svaka linija na grafu predstavlja jednu godinu te se može uočiti razlika između „toplijih“ i hladnijih“ godina, odnosno između godina s većim brojem sati pri nižim temperaturama i godina s većim brojem sati pri visokim temperaturama.




**Slika 7-12.** Učestalost ponavljanja temperaturnih razreda za sezonu grijanja od 1999.-2013.

Na slici 7-13., također je prikazana učestalost ponavljanja temperaturnih razreda kao prosjek svih 15 godina te standardna devijacija koja predstavlja odstupanja od prosječne temperature. Najveća standardna devijacija je od -1 ˚C do 3 ˚C što znači da broj sati pri navedenim temperaturama znatno varira od godine do godine. Standardna devijacija postaje ujednačenija i prati silazan trend kako se temperatura zraka spušta što označava približan broj sati u određenom temperaturnom razredu svake godine. Upravo ovakav prikaz temperaturnih razreda i odstupanja od prosjeka ukazuje na godine s nižim i višim temperaturama zraka što predstavlja dobru pozadinu za proračun toplinskih potreba jer

uključuje više temperaturnih varijacija i dimenzioniranje na najniže temperature u 15 godina vremenskog razdoblja.




**Slika 7-13.** Prosječna učestalost ponavljanja temperaturnih razreda sa standardnim devijacijama u periodu od 1999. - 2013.

Kako bi se proračun temeljio na spomenutim petnaestogodišnjim temperaturama potrebno je mjesečne zahtjeve za toplinskom energijom dobivene iz softvera URSA Građevinska fizika 5.0 prilagoditi prema mjesečnim temperaturama unutar 15 godina budući da se temperature zraka mijenjaju relativno učestalo. Prilagodba temperatura za svaki mjesec izvršena je preko korekcijskog faktora koji se izračunava preko formule (7-1).

$$K_f = \frac{T_{gg} - T_{sr,URSA}}{T_{gg} - (-T_{sr,15})} \tag{7-1}$$

Gdje su:

$K_f$ – Korekcijski faktor temperatura, -

$T_{gg}$ – Vanjska temperatura zraka pri kojoj dolazi do gašenja grijanja, ˚C

$T_{sr,URSA}$ – Srednja temperatura zraka prema URSA softveru, ˚C

$T_{sr,15}$ – Srednja temperatura zraka prema mjesecima iz 15.godišnjeg razdoblja, ˚C.

### *7.6.3. Potrebna toplinska snaga*

Nakon što su izračunati mjesečni toplinski zahtjevi za grijanje tipskog staklenika, izračunate su satne i mjesečne temperaturne razlike između projektirane temperature gašenja grijanja i

temperature zraka. Rezultati proračuna temperaturnih razlika korišteni su dalje za proračunavanje toplinske energije utrošene u jednom satu, odnosno potrebna instalirana snaga za grijanje staklenika prema formuli:

$$P_{\ inst} = \frac{\Delta T}{\sum \Delta T} \times P_{topl} \tag{7-2}$$

Gdje su:

$P_{inst}$ – Potrebna instalirana snaga za grijanje staklenika, kW

$\Delta T$ - Temperaturna razlika između temperature zraka i temperature gašenja grijanja, ˚C

$\sum \Delta T$– Zbroj temperaturnih razlika u jednom mjesecu, ˚C

$P_{topl}$ - Toplinski zahtjevi za grijanje staklenika, kW.

### *7.6.4. Potrebni protok*

Najveća potrebna toplinska energija u jednom satu odnosno instalirana snaga koja mora biti dostupna je 308,8 kW. Prema tome temperaturnom zahtjevu pristupa se dimenzioniranju modela i opreme grijanja staklenika. Potrebni protok za zadovoljavanje 308,8 $kWh_t$ toplinske energije u jednom satu, odnosno 308,8 kW instalirane snage izračunat je prema formuli (7-3) i iznosi 2,44 l/s.

$$q = \frac{P_{inst}}{(T_{in} - T_{out}) \times c_p} \tag{7-3}$$

Gdje je:

$q$ - Protok geotermalne vode, l/s

$T_{Ulaz}$ – Temperatura pri izlazu iz geotermalne elektrane to jest na ulazu u sustav grijanja, ˚C

$T_{Izlaz}$ – Najniža projektirana temperatura iskorištavanja, ˚C,

$c_p$ – Specifična toplina vode, $\frac{\text{kJ}}{\text{kg °C}}$.

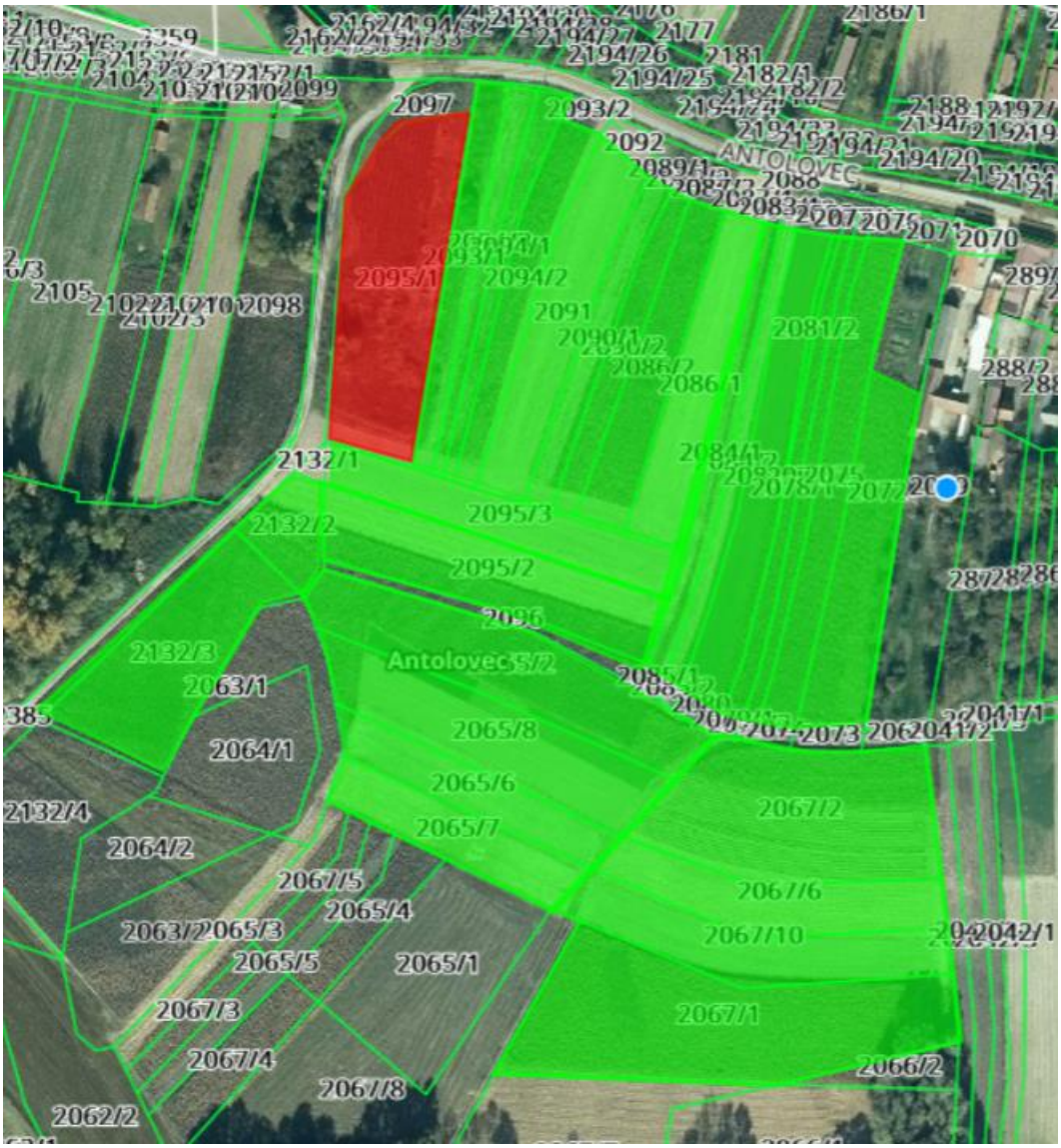
Budući da se samo dio raspoloživog protoka i temperature koristi za zadovoljavanje toplinskih potreba tipskog staklenika, dijeljenjem dvaju protoka, maksimalno raspoloživog i izračunatog, dobiva se ukupni broj tipskih staklenika koji se mogu grijati geotermalnom energijom uz maksimalno iskorištavanje raspoloživog protoka, a on iznosi 28. Računanje broja staklenika može se dobiti i unošenjem vrijednosti u formulu (7-4).

$$N_{plas} = \frac{P_{topl}}{P_{topl}} = \frac{30\,^{\circ}C \times 70\,\frac{l}{s} \times 4{,}21\,\frac{kJ}{kg\,^{\circ}C}}{308{,}8\ kW} \approx 28 \qquad (7\text{-}4)$$

Gdje je:

$N_{plas}$- Broj staklenika, -.

Dakle, iskorištavanjem projektirane temperaturne razlike od 30 ˚C (70 – 40 ˚C) s protokom od 70 l/s, toplinska energija geotermalnog fluida postaje raspoloživa za grijanje 28 tipskih staklenika maksimalno instalirane snage od 308,8 kW, odnosno godišnje potrošnje 360.488 $kWh_t$, što je zapravo 56.000 $m^2$ odnosno 5,6 hektara staklenika. Na sljedećoj slici 7-14. prikazana je ukupna površina oranica različitih veličina na kojima se mogu sagraditi staklenici, grijani geotermalnom vodom, ukupne površine 56.000 $m^2$. Crvenom bojom označena je čestica na kojoj se nalazi proizvodna bušotina. Ovisno o veličini oranice, staklenik može biti jedan ili više njih modularno spojenih.

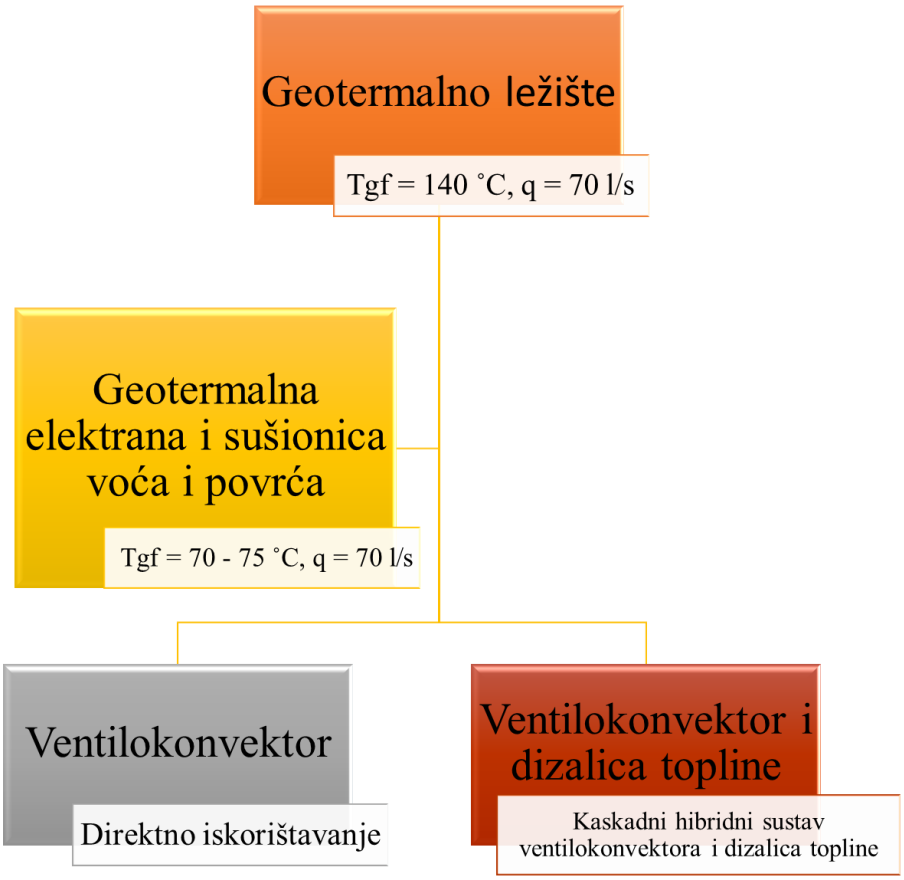



**Slika 7-14**. Prikaz potencijalnog rasporeda staklenika grijanih geotermalnom energijom direktnog sustava iskorištavanja (DGU, 2020)

### 7.7. Dimenzioniranje modela i sustava grijanja staklenika

Nakon eksploatacije geotermalne vode iz ležišta i separacije od ležišnih plinova, geotermalna voda protoka 53 l/s ulazi u energetski objekt geotermalne elektrane i u toplinsku stanicu sušionice voća s protokom od 17 l/s. Nakon prolaza geotermalne vode kroz geotermalnu elektranu i toplinsku stanicu sušionice voća, geotermalna voda protoka 70 l/s i temperature od 70 – 75 ˚C postaje raspoloživa za korištenje transformiranih oblika energije odnosno, za potrebe modela rada, kao energent za grijanje staklenika povrća. Grijanje staklenika može se temeljiti na raznim termotehničkim sustavima čiji je glavni energent može biti geotermalna voda i kao alternativni energent, prirodni plin. Na sljedećem

dijagramu toka 7-15. prikazana su termotehnička rješenja za grijanje staklenika u modelu diplomskog rada. Diplomski rad se neće doticati radnih karakteristika navedenih sustava za grijanje, nego će naglasak biti na maksimiziranju korištenja geotermalnog fluida i toplinske energije iz geotermalnog ležišta. Temperaturni gubici u određenim dijelovima sustava i u izmjenjivačima topline također se zanemaruju.

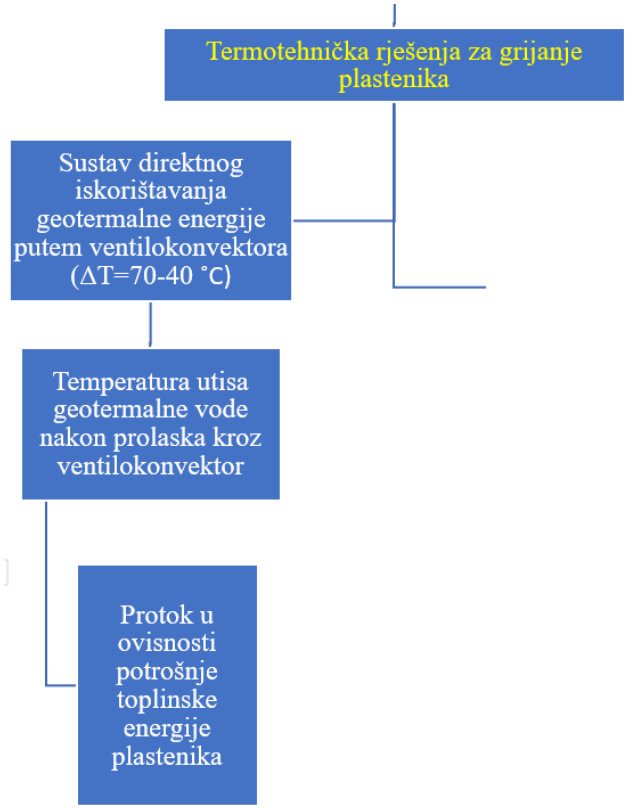



**Slika 7-15.** Termotehnička rješenja za grijanje staklenika

### *7.7.1. Direktno iskorištavanje geotermalne energije ventilokonvektorima*

Direktno iskorištavanje geotermalne vode odnosi se na izravnu predaju topline s geotermalne vode na zrak unutar staklenika. Projektirana ulazna temperatura u ventilokonvektor bit će približno 70 ˚C gdje će se predajom topline kroz zavojnice i rebra uređaja upuhivati zrak približne temperature od oko 15 ˚C. Temperatura usisa svježeg zraka je 10 ˚C, a temperatura povrata geotermalne vode je 40 ˚C kada je vanjska temperatura zraka najniža odnosno pri vršnoj potrošnji toplinske energije. U većini vremena, vanjske temperature zraka biti će puno veće i potreba za toplinskom energijom će se smanjivati. Kako temperatura zraka postaje sve viša, povoljniji postaju i temperaturni režimi rada ventilokonvektora te se povećava

temperatura povrata odnosno utisa geotermalne vode i potrebni protok. Daljnji proračun dinamičkog modela prikazan je dijagramom toka na slici 7-16.




**Slika 7-16.** Tijek proračuna modela za direktno iskorištavanje geotermalne energije

Budući da je u svih 15 godina promatranog vremenskog razdoblja broj dana kada je vanjska temperatura zraka bila manja od 15 ˚C iznosio 3.229 od ukupnih 5.479 dana, a samo je 5 sati bilo pri temperaturi većoj od 17 ˚C i manjoj od 18 ˚C, radi učinkovitog iskorištavanja toplinske energije potrebno je, na osnovu prethodno izračunatih satnih toplinskih zahtjeva, proračunati temperaturu utisa geotermalne vode prema formuli (7-5) koja vrijedi samo za temperature niže od 15 ˚C. U protivnom grijanja nema te je temperatura utisa jednaka temperaturi geotermalne vode nakon izlaska iz geotermalne elektrane.

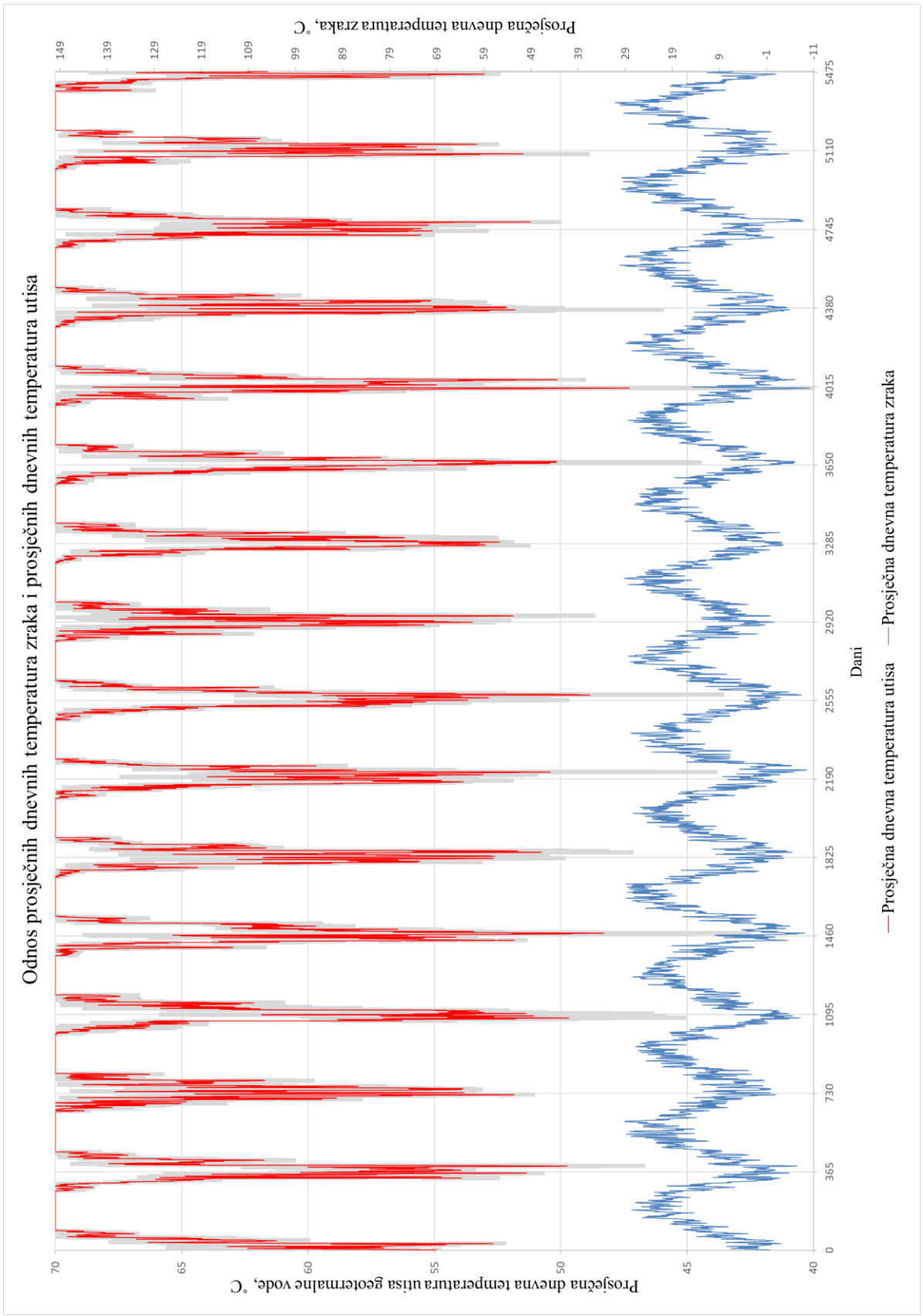
$$T_{Utis} = T_{Ulaz} - \left(\frac{P_{topl} \times N_{plas}}{q \times c_p}\right) \quad (7\text{-}5)$$

Gdje je:

$T_{Utis}$ – Temperatura utisa geotermalnog fluida pri izlazu iz staklenika, ˚C.

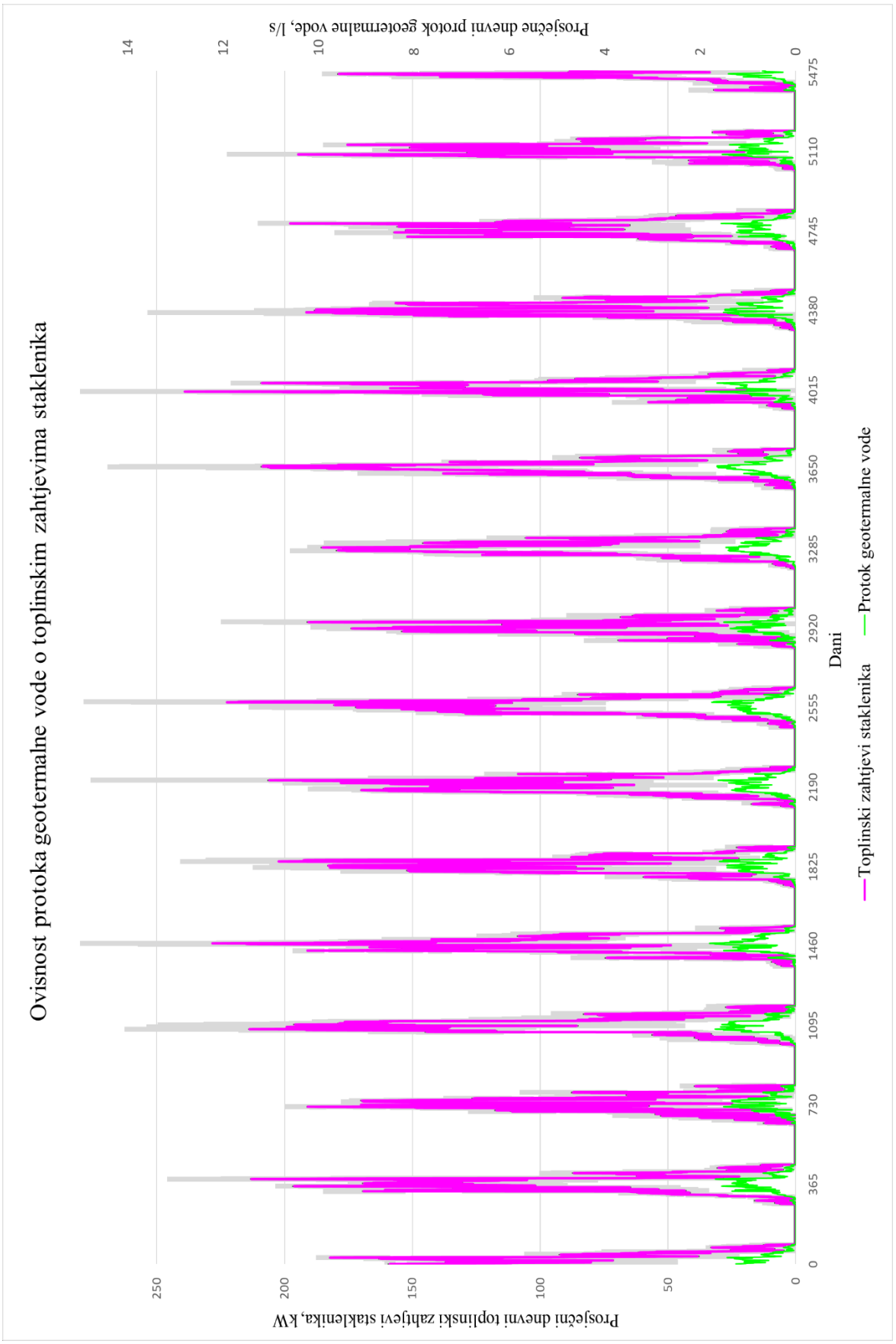
Dobiveni rezultati su satne temperature utisa te su za jednostavniji prikaz korištene dnevne prosječne temperature utisa. Slika 7-17. prikazuje ovisnost prosječnih dnevnih temperatura

zraka i prosječnih dnevnih temperatura utisa gdje se s temperaturom zraka povećava i temperatura utisa. Primjetni su i periodi kada je grijanje nepotrebno pa je temperatura utisa 70 ˚C. Sivom bojom na grafu prikazana je standardna devijacija budući da su prikazane prosječne dnevne temperature utisa dobivene na temelju satnih temperatura utisa. Uočljiva je veća standardna devijacija u godinama koje imaju niže temperature utisa odnosno niže temperature zraka što ukazuje na vrlo hladne zime naspram drugih godina te šire varijacije temperature zraka to jest raspršenost temperaturnih podataka.




**Slika 7-17.** Odnos prosječnih dnevnih temperatura zraka i prosječnih dnevnih temperatura utisa

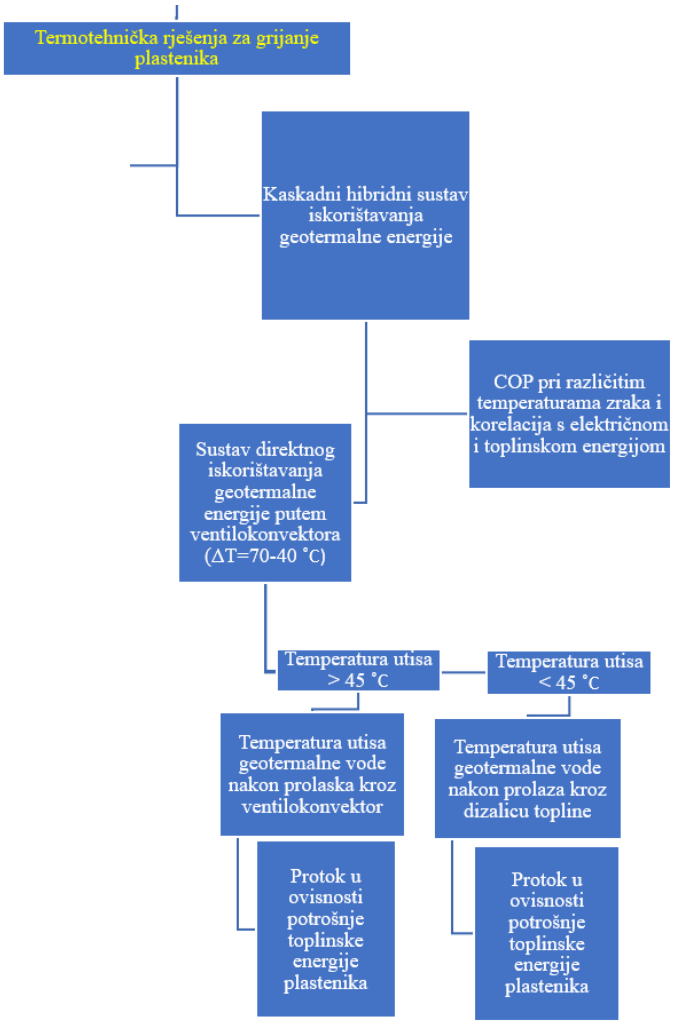
Nadalje, prikaz ovisnosti protoka geotermalne vode o toplinskim zahtjevima staklenika prikazan je na slici 7-18. Povećavanjem toplinskih zahtjeva za grijanjem staklenika povećava se i potreban protok te vrijedi obrnuto kada se toplinski zahtjevi smanjuju. Proračunavanje potrebnog protoka izvršeno je prema formuli (7-3). Uočljivi su i periodi van sezone grijanja kada ne postoje potrebe za grijanjem te je protok geotermalne vode kroz staklenik odnosno ventilokonvektor jednak 0 l/s. Sivom bojom na grafu prikazana je standardna devijacija budući da su prikazani prosječni dnevni toplinski zahtjevi dobiveni na temelju satnih toplinskih zahtjeva. Standardna devijacija je veća kada su zime hladnije to jest kada je satna temperaturna razlika između temperature zraka i temperature gašenja grijanja veća. Protok geotermalne vode pri najnižim vanjskim temperaturama zraka koristi se samo 0,0038 % vremena, gdje je pri svim ostalim višim vanjskim temperaturama zraka manji od projektiranih 2,44 l/s za najgore uvjete temperature zraka. Teoretski, pri višim temperaturama zraka moguće je grijanje više staklenika od projektiranih 28, ovisno o toplinskim zahtjevima to jest raspoloživim protocima, ili je moguće zadovoljavanje vršnih potreba za grijanjem staklenika koji imaju drugačiji bazni energent ili izvor grijanja.




**Slika 7-18.** Ovisnost protoka geotermalne vode o toplinskim zahtjevima staklenika

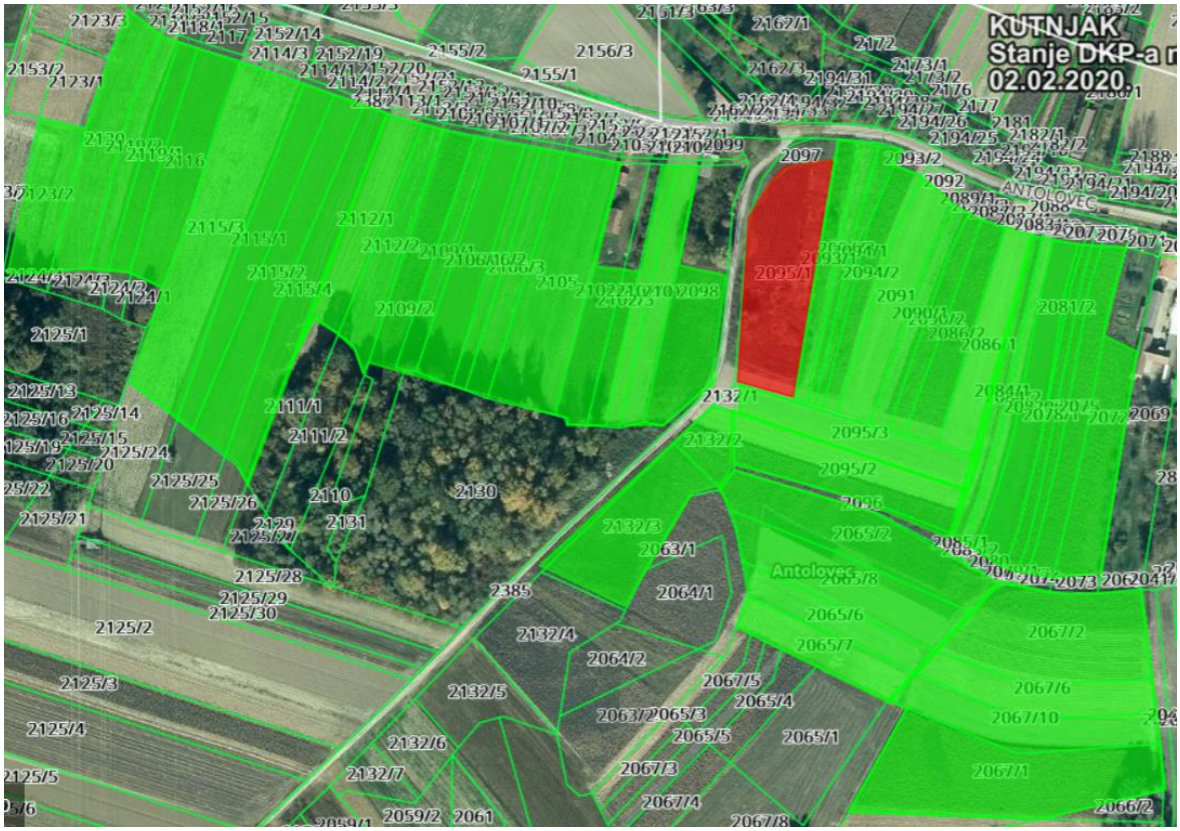
### *7.7.2. Kaskadni hibridni sustav ventilokonvektora i dizalica topline*

Kaskadni hibridni sustav iskorištavanja geotermalne energije za grijanje staklenika sastoji se od prvog kruga sustava direktnog iskorištavanja geotermalne energije s temperaturnim rasponom od 70 ˚C do 40 ˚C i protokom geotermalne vode od 70 l/s, preko klasičnih sustava ventilokonvektora kao što je opisano u poglavlju 7.7.1., te drugog kruga i ponovne direktne upotrebe ventilokonvektora za nižu radnu temperaturnu razliku i dizalica topline. Nakon prolaza kroz prvi krug sustava direktnog iskorištavanja, geotermalna voda je relativno visoke temperature, od približno 40 ˚C i više kada su toplinski zahtjevi za grijanjem manji. Takva temperatura se može dalje iskorištavati za grijanje staklenika. Jedno od termotehničkih rješenja za grijanje dodatnog broja staklenika je upotreba ventilokonvektora za niže temperature rada i dizalica topline (*engl. HP – Heat Pump*). Projektiranje sustava grijanja pomoću ventilokonvektora i dizalice topline prikazano je na sljedećem dijagramu toka 7-19.




**Slika 7-19.** Tijek proračuna modela za kaskadni hibridni sustav iskorištavanja geotermalne energije

Kako se sustav projektira na najniže uvjete vanjske temperature zraka, projektirana temperatura ulaza geotermalne vode u sustav dizalice topline biti će 40 ˚C dok minimalna projektirana temperatura izlaza iz sustava dizalice topline ili temperatura utisa iznosi 20 ˚C. Uz raspoloživi protok od 70 l/s i temperaturnu razliku od 20 ˚C te poznatu potrebnu instaliranu toplinsku snagu u stakleniku od 308,8 kW za uvjete najniže temperature zraka, broj dodatnih staklenika koji se mogu grijati pomoću sustava dizalica topline je 23, izračunat prema formuli (7-4), odnosno 46.000 $m^2$ staklenika. Slika 7-20. prikazuje ukupnu površinu oranica na kojima se može izgraditi jedan ili više tipskih modularnih staklenika u blizini bušotine Kt-1 koji bi se spojili na kaskadni hibridni sustav grijanja staklenika. Ukupna površina oranica, odnosno površina staklenika je 102.000 $m^2$.

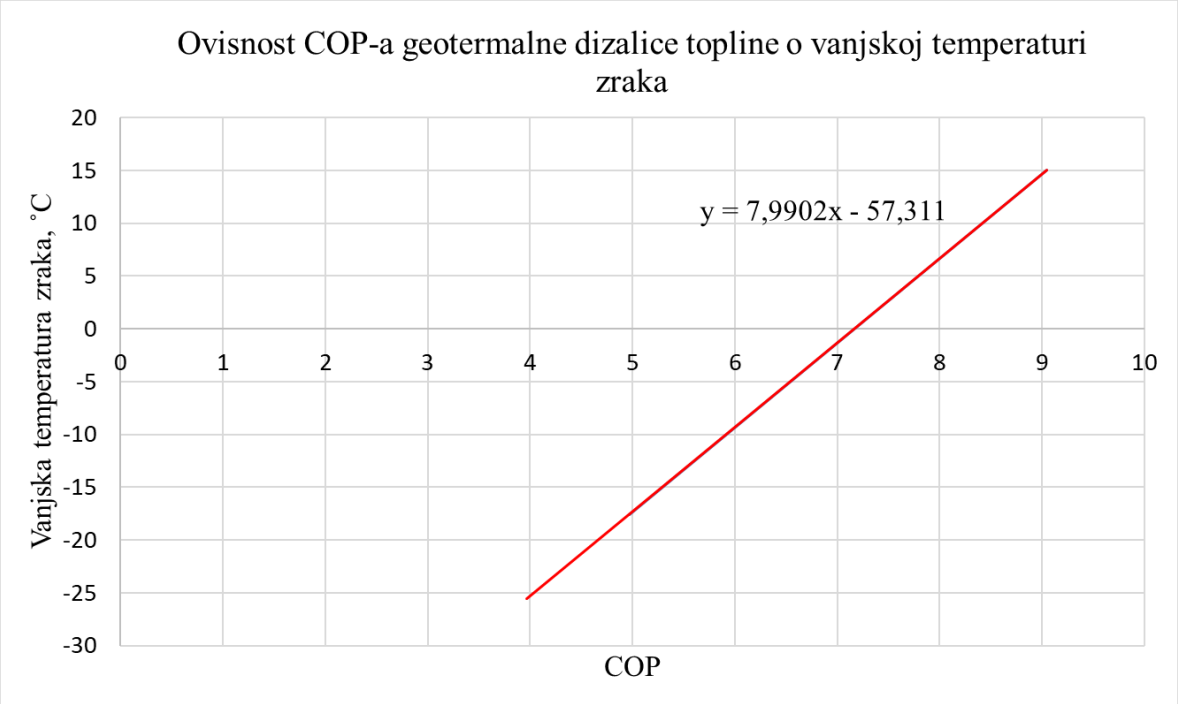



**Slika 7-20.** Prikaz potencijalnog rasporeda staklenika okupljenih oko bušotine Kt-1 i grijanih kaskadnim hibridnim sustavom (DGU, 2020)

Radi pojednostavljenja proračuna, projektirani temperaturni režim rada dizalice topline, odnosno temperatura isparivača, $T_{EST}$ (*engl. EST – Entering Source Temperature*), je uvijek za 5 ˚C manja od temperature izlaza geotermalne vode iz sustava dizalice topline to jest temperature utisa. Temperatura na ekspanzijskom ventilu, $T_{LST}$ (*engl. Leaving Source Temperature*) je za par stupnjeva niža od temperature pri isparivaču.

### *7.7.3. Koeficijent energetske učinkovitosti dizalice topline*

Kako bi se maksimizirale mogućnosti iskorištavanja geotermalne energije pomoću dizalice topline najprije potrebno je odrediti koeficijent energetske učinkovitosti (*engl. COP – Coefficient of Performance*) dizalice topline to jest toplinski množitelj za određenu vanjsku temperaturu zraka. COP je omjer ukupne dobivene toplinske energije i uložene električne energije za rad dizalice topline. Slika 7-21. pokazuje posrednu ovisnost COP-a o vanjskim temperaturama zraka preko toplinskih zahtjeva staklenika. Za dimenzioniranu snagu staklenika od 308,8 kW to jest pri temperaturi zraka od -17,6 ˚C, COP iznosi 4,97 što znači da dizalica topline potroši 62,12 $kW_e$ odnosno, 62,12 $kW_t$ preda kompresijom rashladnog fluida, a preostalih 246,66 $kW_t$ preuzme iz geotermalne vode.

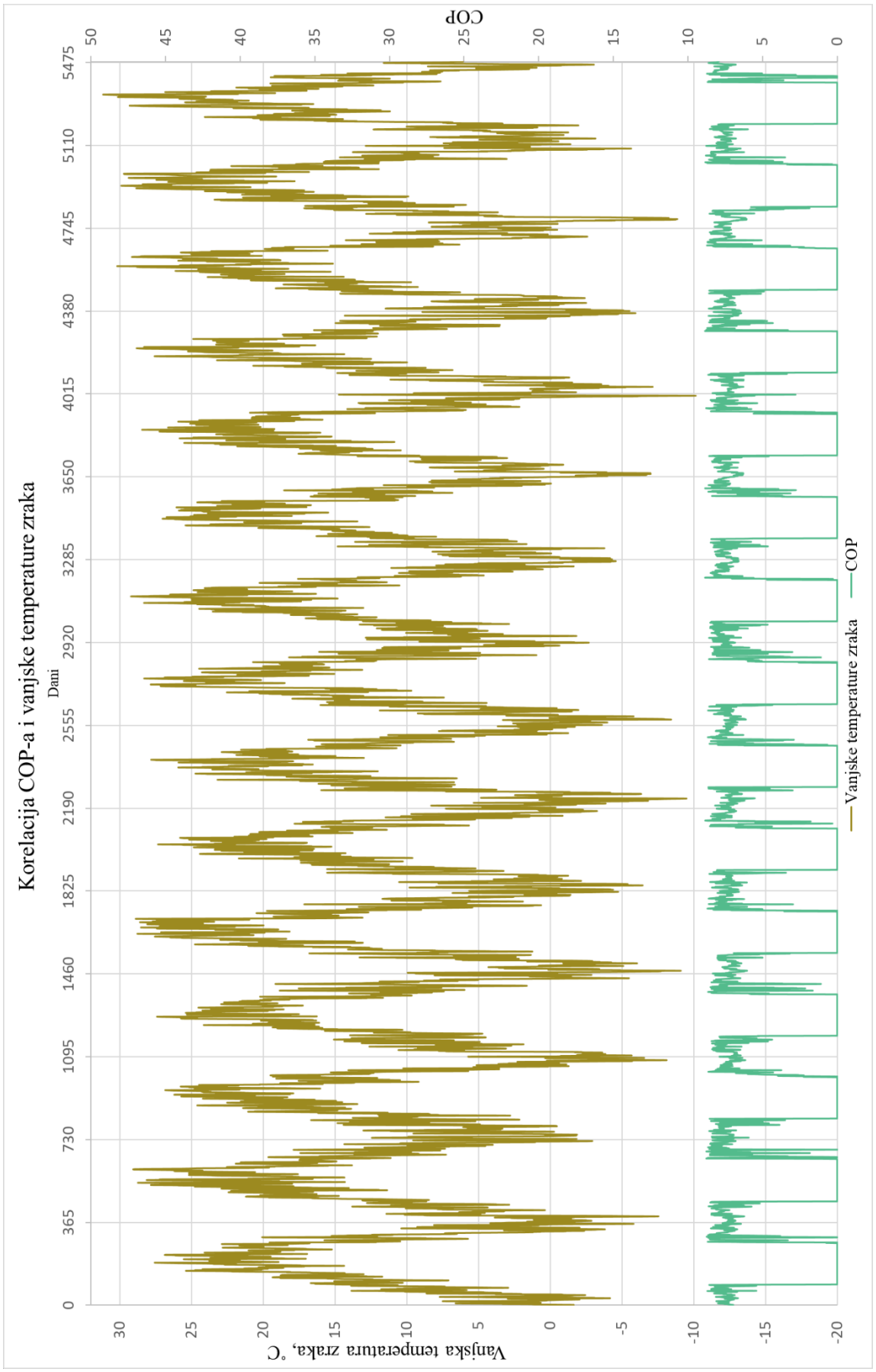



**Slika 7-21.** Utjecaj vanjske temperature zraka na toplinske zahtjeve staklenika i COP geotermalne dizalice topline

Povećanjem vanjske temperature zraka, smanjuju se toplinski zahtjevi za grijanjem staklenika. Tada staklenici u prvom krugu kaskade manje pothlađuju protok geotermalne vode koji je dostupan za daljnje iskorištavanje. Geotermalna voda relativno visoke temperature ulazi u drugi krug kaskade, odnosno $T_{EST}$ je veća kada su manji toplinski zahtjevi staklenika, a veća temperatura zraka. Ulaskom geotermalne vode povišene temperature na isparivač u geotermalnoj dizalici topline, povećavaju se temperaturni režimi rada dizalice topline te je manje električne energije, potrebno da se zadovolje toplinski

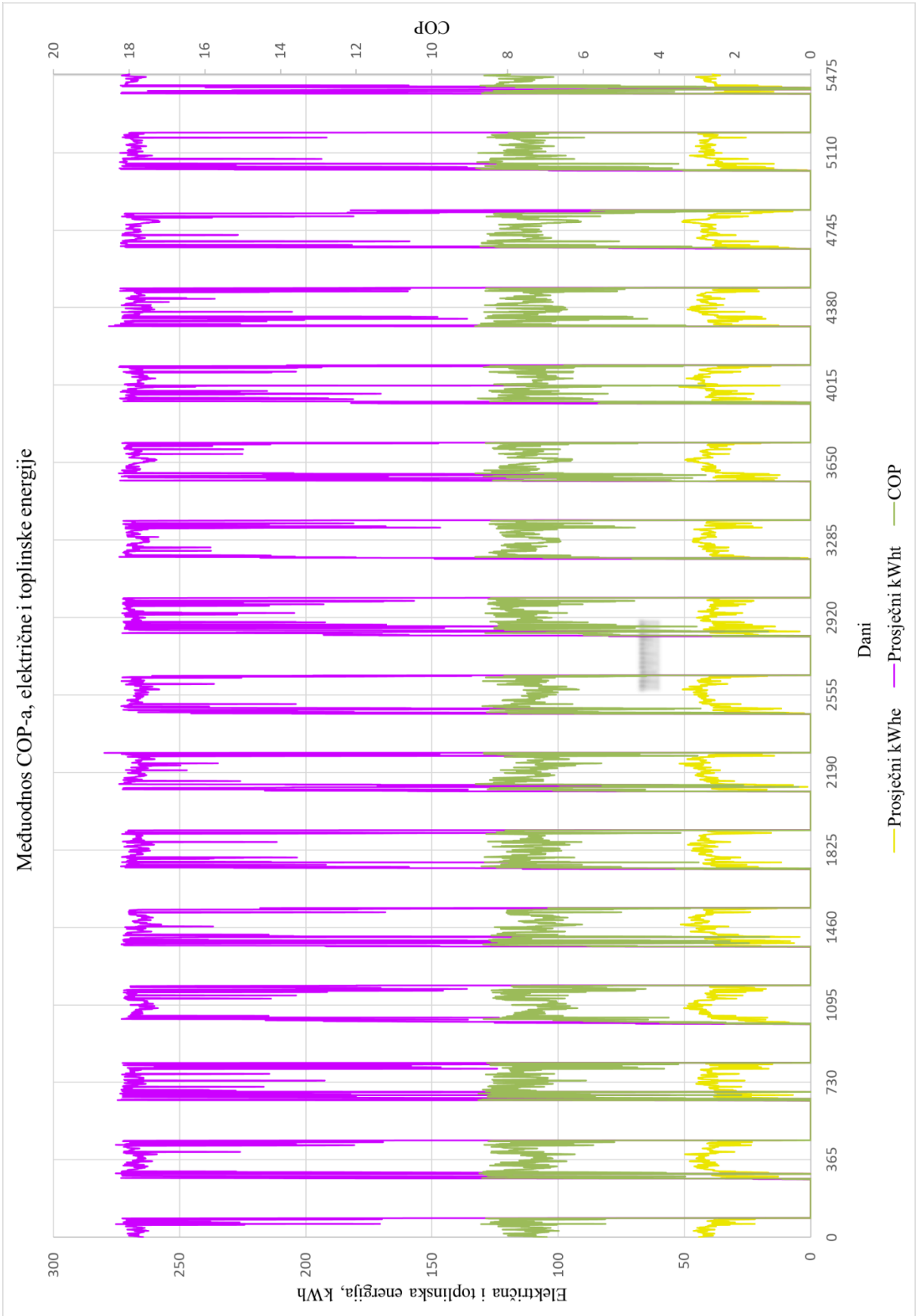
zahtjevi koji se većim dijelom zadovoljavaju iz geotermalne vode. To jest, povećava se COP. Kada se vanjska temperatura zraka snižava, povećavaju se toplinski zahtjevi staklenika te se tok geotermalne vode više pothlađuje. Geotermalna voda niže temperature ulazi u sustav dizalice topline koja radi nižim temperaturnim režimom te se povećava udio električne energije, kojom se zadovoljavaju toplinski zahtjevi staklenika, a smanjuje se udio geotermalne energije, odnosno smanjuje se COP.

Prema navedenoj korelaciji određen je COP za prosječne dnevne temperature zraka prikazan na slici 7-22. gdje se može uočiti da se vrijednost COP-a smanjuje kako se vanjska temperatura zraka smanjuje, a kako se temperatura zraka povećava vrijednost COP-a se povećava. Pri temperaturi zraka iznad 15 ˚C rad dizalice topline prestaje, a prestanak rada je označen sa nultom vrijednošću COP-a. Može se zaključiti da je pri nižim temperaturama zraka potrebno utrošiti više električne energije za rad dizalice topline jer su veće toplinske potrebe staklenika i niži temperaturni režimi budući da je ulazna temperatura geotermalne vode niža. Pri višim temperaturama zraka manja je količina topline potrebna za grijanje staklenika, a COP veći što bi značilo manje utrošene električne energije za rad dizalice topline, a veće iskorištavanje geotermalne energije i povoljniji temperaturni režimi rada dizalice jer je ulazna temperatura geotermalne vode viša.




**Slika 7-22.** Ovisnost COP-a o vanjskim temperaturama zraka promatranog razdoblja

Prema poznatim COP-ovima za svaku temperaturu zraka mogu se odrediti količine toplinske i električne energije koje zajedno čine ukupnu toplinsku energiju predanu stakleniku za grijanje. Kako je sustav dimenzioniran na 308,8 kW, povećavanjem COP-a smanjuje se udio uložene električne energije, a povećava se udio dostupne toplinske energije koja može biti preuzeta iz geotermalne vode. Teoretski, pri većim temperaturama, povećava se broj staklenika koji se mogu grijati putem geotermalne energije ili se mogu zadovoljiti vršne potrebe grijanja staklenika koji imaju različiti bazni energent ili izvor grijanja. Na slici 7-23. prikazan je odnos COP-a, utrošene električne energije za rad odnosno energije predane kompresijom rashladnog fluida i toplinske energije geotermalne vode. Primjetan obrnuto proporcionalni odnos između COP-a i električne energije te električne energije i toplinske energije za zadovoljavanje toplinskog zahtjeva, odnosno 308,8 kW instalirane snage.

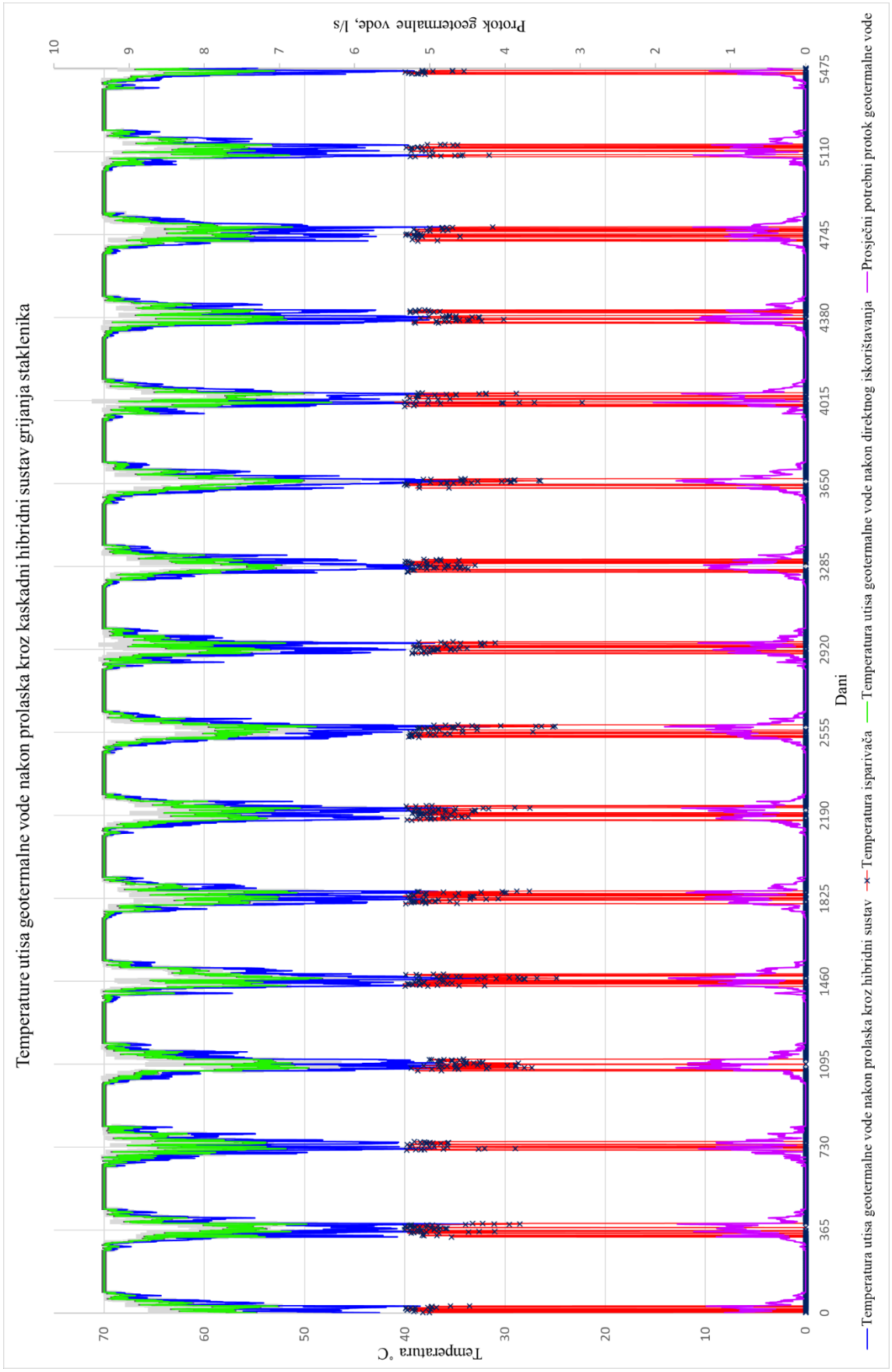



**Slika 7-23.** Međuodnos COP-a, električne i toplinske energije

### *7.7.4. Drugi krug - Direktno iskorištavanje ventilokonvektorom za niže temperature rada i dizalicom topline*

Temperatura geotermalne vode pri izlasku iz sustava direktnog iskorištavanja gotovo nikada nije 40 ˚C što je vidljivo na slici 7-17. Potrebno je napraviti proračun modela gdje geotermalna voda određene temperature na izlazu iz prvog kruga sustava direktnog iskorištavanja ulazi u drugi krug odnosno hibridni sustav ventilokonvektora i dizalica topline. Pri spomenutim uvjetima izlazne temperature, rješenje je ugradnja mimovodnog ventila (*engl. bypass valve*). Ugradnjom ventila omogućuje se iskorištavanje veće temperaturne razlike geotermalnog fluida odnosno dodatno spuštanje utisne temperature geotermalnog fluida. Mimovodni ventil pri temperaturi geotermalne vode većoj od 45 ˚C automatski usmjerava tok geotermalne vode na sustav direktnog iskorištavanja preko ventilokonvektora, a kada je temperatura geotermalnog fluida manja od 45 ˚C tok geotermalne vode usmjeren je na dizalicu topline. Razlog ugradnje mimovodnog ventila te ventilokonvektora i dizalice topline je nemogućnost rada ventilokonvertera pri niskim temperaturama i temperaturnim razlikama zbog samog principa rada i nemogućnosti prijenosa toplinske energije te radni uvjet dizalice topline odnosno maksimalna radna temperatura dizalice topline, $T_{EST}$, koja u modelu proračuna iznosi 40 ˚C. Na temelju poznatih toplinskih zahtjeva staklenika, određenih COP-ova na temelju vanjske temperature zraka i poznate izlazne temperature geotermalne vode iz sustava direktnog iskorištavanja, temperatura utisa geotermalne vode nakon prolaza kroz mimovodni ventil odnosno ventilokonvektor ili dizalicu topline prikazana je plavom bojoj na slici 7-25. Kada je temperatura na mimohodnom ventilu veća od 45 ˚C, temperatura utisa izračunata je prema formuli (7-5), a kada je temperatura manja 45 ˚C računata je također po formuli (7-5) u kojoj je dnevni toplinski zahtjev umanjen za dio koji mu pruža električna energija dizalice topline određena prema prosječnom dnevnom COP-u. Radi usporedbe, zelenom bojom označena je ulazna temperaturna odnosno temperatura utisa geotermalne vode nakon prolaza kroz sustav direktnog iskorištavanja. Može se uočiti da obje temperature prate isti trend osim kada se temperatura utisa geotermalne vode nakon sustava direktnog iskorištavanja spušta ispod 45 ˚C, gdje se povećava raskorak između dviju temperatura. Pri temperaturama geotermalne vode od 45 ˚C, dizalica topline radi pri najvećoj mogućoj radnoj temperaturi, $T_{EST}$ = 40 ˚C koja je ujedno predstavlja najveći temperaturni režim rada dizalice. Pri svakoj manjoj ulaznoj temperaturi geotermalne vode smanjuje se i temperaturni režim rada dizalice topline. Crvenom bojom, odnosno križićima, prikazana je $T_{EST}$ u funkciji ulazne temperature

geotermalne vode. Kako je proračun temeljen na satnim temperaturama, postoje sati u danu gdje je temperatura veća i manja od 45 ˚C, odnosno kada se staklenik grije putem ventilokonvektora i dizalice topline, dakle križići predstavljaju dnevni prosjek $T_{EST}$ u satima kada dizalica topline radi te se njezina vrijednost najčešće kreće od 40 ˚C do 30 ˚C. Pri nižim temperaturama zraka, odnosno temperaturama utisa geotermalne vode nakon direktnog korištenja, $T_{EST}$ doseže i 22,3 ˚C. Ljubičastom bojom označen je prosječni dnevni protok geotermalne vode potreban za zadovoljavanje toplinskih zahtjeva staklenika, izračunat prema formuli (7-3), u kojoj je dnevni toplinski zahtjev umanjen za dio koji mu pruža električna energija dizalice topline određena prema prosječnom dnevnom COP-u kada je temperatura na mimohodnom ventilu manja od 45 °C. Protok se povećava kako rastu toplinski zahtjevi staklenika odnosno kako se smanjuje temperatura geotermalne vode nakon prolaza kroz sustav direktnog iskorištavanja. Ono što je važno napomenuti je da se protok ne povećava razmjerno za isti stupanj promjene toplinskog zahtjeva pri radu ventilokonvektora i dizalice topline, nego je potrebni protok manji kada dizalica topline radi budući da se dio toplinskog zahtjeva ispuni putem električne energije, odnosno kompresijom rashladnom fluida, a ostali dio preuzme iz geotermalnog fluida. Protok je na slici 7-25. prikazan kao dnevni prosjek satnih protoka bilo da se staklenik grije preko ventilokonvertera ili dizalice topline. Na slici se također mogu primijetiti sezone kada grijanja nema to jest kada je protok na 0 l/s, temperature utisa na 70 ˚C, a $T_{EST}$ također na 0 ˚C.




**Slika 7-24.** Temperature utisa geotermalne vode nakon prolaza kroz kaskadni hibridni sustav grijanja staklenika

## 7.8. Proračun temperature pridobivene vode u funkciji vremena iskorištavanja ležišta

Eksploatacijom geotermalne vode pri gotovo konstantnom radu geotermalne elektrane i sustava za grijanje staklenika, nameće se pitanje pothlađivanja ležišta sa utiskivanjem geotermalne vode znatno niže temperature. Vrijeme iskorištavanja geotermalnog ležišta pri konstantnoj temperaturi geotermalne vode i protoku geotermalne vode od 70 l/s računa se prema formuli:

$$\tau = \frac{A \times h \times (c\rho)_L}{q \times (c\rho)_W} \tag{7-6}$$

Gdje je:

$\tau$ – Vrijeme iskorištavanja ležišta, god

$A$ – Utisno–drenažna površina, $m^2$

$h$ – Efektivna debljina ležišta zasićenog s geotermalnom vodom, m

$(c\rho)_L$ – Obujamska specifična toplina ležišta, $\frac{J}{m^3\ ℃}$

$(c\rho)_V$ – Obujamska specifična toplina vode, $\frac{J}{m^3\ ℃}$.

Prema karakteristikama geotermalnog ležišta Lunjkovec – Kutnjak vrijeme izotermne proizvodnje iznosi 610 godina. Nakon 610 godina temperatura geotermalne vode u ležištu se smanjuje uslijed prodora hladne fronte u krovinsku propusnu zonu ležišta. Promjena temperature vode u ležištu računa se prema sljedećoj jednadžbi:

$$T_L = T_{Utis} + (T_0 - T_{Utis}) \times erf\left(\frac{A \times \sqrt{\lambda (c\rho)_S}}{q \times (c\rho)_V \times \sqrt{\tau - \frac{A \times h \times (c\rho)_L}{q \times (c\rho)_V}}}\right) \tag{7-7}$$

Gdje je:

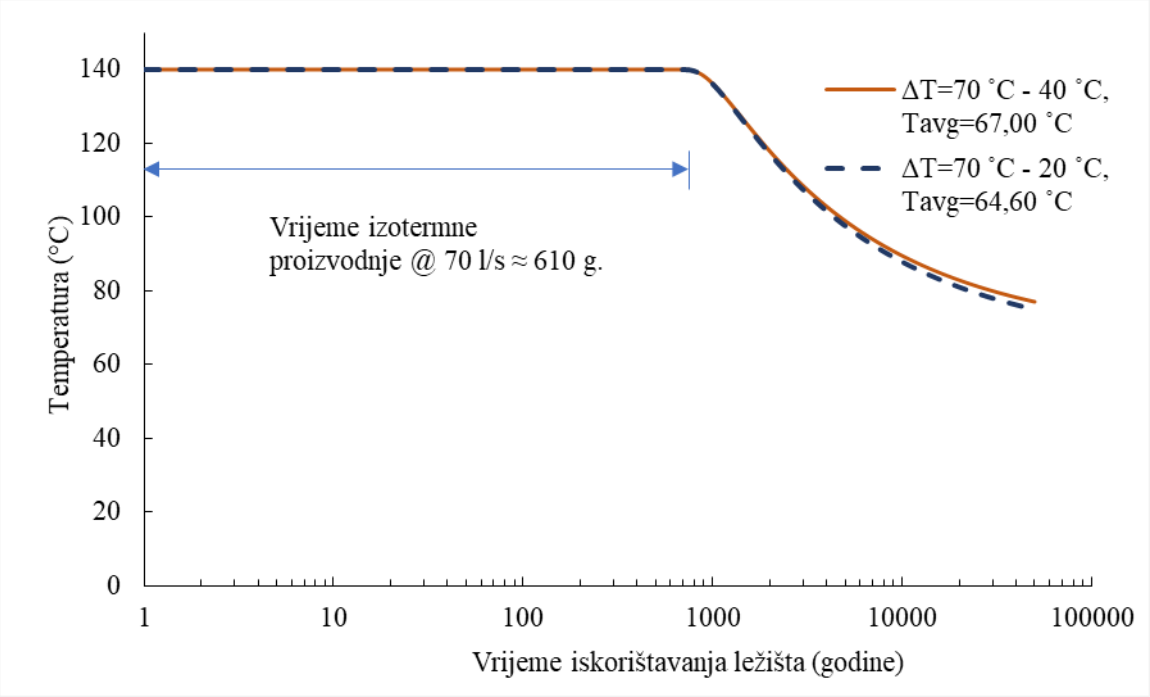
$T_L$ – Temperatura geotermalne vode u ležištu u trenutku τ, ˚C

$T_0$ – Temperatura ležišta u vremenu τ, ˚C

$\lambda$ – Toplinska vodljivost stijene, $\frac{W}{m℃}$

$(c\rho)_S$ – Obujamska specifična toplina matriksa stijene, $\frac{J}{m^3\ ℃}$.

Na slici 7-26. prikazana je temperatura geotermalne vode u ležištu za sustav direktnog iskorištavanja geotermalne vode i kaskadni hibridni sustav iskorištavanja geotermalnog ležišta. Budući da proračun nije dinamički, nego se temelji na prosječnim temperaturama utisa geotermalne vode za svaki sustav grijanja, točke na grafu predstavljaju minimume temperatura utisa jer se u obzir ne uzima zagrijavanje ležišta kada grijanja nema gdje se utiskuje geotermalna voda temperature 70 ˚C. Upravo je to i glavni nedostatak proračuna jer se time usporava smanjenje temperature geotermalne vode u ležištu za određeni period vremena. Primjetan je nešto niži trend pada geotermalne vode kod kaskadnog hibridnog sustava nego kod sustava direktnog iskorištavanje jer je i temperatura utisa geotermalne vode za niža. Uočljiva je i jako mala razlika između temperatura dvaju sustava koja postaje sve veća kako vrijeme eksploatacije teče. Za ovakav proračun izotermnog vremena geotermalnog ležišta Lunjkovec – Kutnjak, čija je udaljenost proizvodne i utisne bušotine oko 4 km, predviđa se oko 610 godina izotermne proizvodnje geotermalne vode temperature i smanjenje temperature geotermalne vode na 77 ˚C za 50.000 godina eksploatacije geotermalne vode protoka 70 l/s. Ovakav proračun bitan je kod manjih ležišta gdje se nekontroliranom proizvodnjom vrlo brzo može pothladiti ležište i smanjiti temperatura proizvedene geotermalne vode.




**Slika 7-25.** Prikaz vremena izotermne proizvodnje i vremena pothlađivanja ležišta

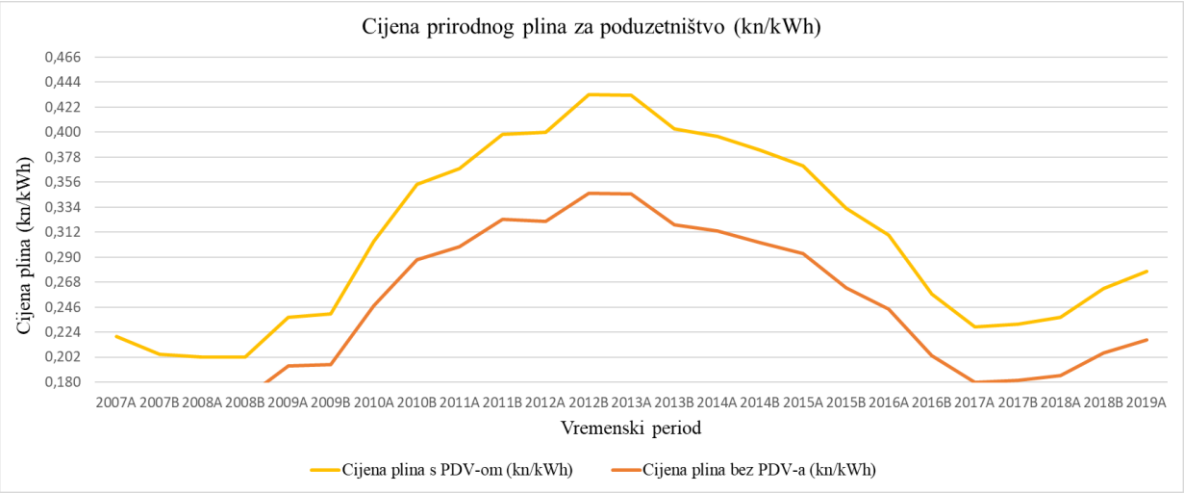
# 8. ENERGETSKO - EKONOMSKA ANALIZA PRORAČUNA MODELA ENERGETSKI UČINKOVITOG ISKORIŠTAVANJA GEOTERMALNE ENERGIJE S GEOTERMALNOG POLJA LUNJKOVEC – KUTNJAK

Budući da u Republici Hrvatskoj udio BDP-a iz agrarnog sektora, u koji također spada staklenička proizvodnja različitih kultura, iznosi 3,7 %, otvara se pitanje povećavanja kvalitete agrarnog sektora i razvijanje proizvodnje u staklenicima na osnovu energije pridobivene iz geotermalnog ležišta (CIA, 2017). Na temelju prethodne izrade modela iskorištavanja geotermalne energije iz geotermalnog polja Lunjkovec – Kutnjak izvesti će se energetsko - ekonomska analiza mogućih ostvarivih prihoda od proizvodnje i prodaje geotermalne toplinske energije.

Kako bi privukao korisnike za kupnju geotermalne toplinske energije, koncesionar geotermalne elektrane sklapa razne modele ugovaranja otkupa gdje može kreirati cijenu kako bi ona bila što atraktivnija korisnicima. Prodajom geotermalne toplinske energije, gdje troška proizvodnje gotovo i nema, koncesionar pokriva operativne troškove rada postrojenja, a kupac se opskrbljuje energijom niske cijene kako bi bio operativan. Osim klasičnog modela ugovaranja između dvije strane, moguće je i osnivanje energetskih zadruga i investiranje u kupovinu bušotina i pripadajuće infrastrukture kako bi se izbjegla kupovina geotermalne toplinske energije. Primjer za to su tvrtke Zarja grupa d.o.o. iz Svete Nedelje i Ruris d.o.o. iz Županje. Prodaja geotermalne toplinske energije je način unapređivanja i stvaranja dodatnih prihoda cjelokupnog projekta iskorištavanja geotermalnog ležišta jer je otpadna geotermalna voda nusprodukt proizvodnji električne energije i biva utisnuta natrag u ležište.

## 8.1. Prodajne količine i prihodi od prodaje geotermalne toplinske energije na temelju modela proračuna diplomskog rada

Cijena prirodnog plina za poduzetništvo prema zadnjim dostupnim podacima iz Eurostat-ove baze podataka (Eurostat, 2020), (slika 8-1.), iznosila je 0,2174 kn/kWh u prvoj polovici 2019. godine, bez poreza. Struktura krajnje cijene plina, osim troška nabave i opskrbne marže, sastoji se i od troška transporta plina, troška distribucije plina te poreza. Kako bi se izračunala prodajna cijena geotermalne toplinske energije, određen je postotak od 25% za koji se cijena plina umanjuje, a prema kojem prodajna cijena geotermalne toplinske energije iznosi 0,1631 kn/kWh$_t$. Cijena geotermalne toplinske energije određena je kako bi bila što konkurentnija cijeni plina i privukla zainteresirane strane na korištenje geotermalne energije.




**Slika 8-1**. Cijena prirodnog plina za poduzetništvo (Eurostat, 2020)

### *8.1.1. Direktni sustav iskorištavanja geotermalne energije*

Ako godišnja potrebna toplinska energija za grijanje jednog tipskog staklenika iznosi 360.488 $kWh_t$ uz raspoloživi protok od 70 l/s i temperaturnu razliku od 70 – 40 ˚C, najveći broj staklenika dimenzioniranih na uvjete najniže temperature u petnaestogodišnjem razdoblju je 28 staklenika koji su spojeni na sustav direktnog iskorištavanja geotermalne energije ventilokonvektorima odnosno prvi krug kaskade. U većini vremena broj staklenika, odnosno dostupna toplinska energija za grijanje je puno veća jer je energija koja je potrebna stakleniku za grijanje manja od instalirane snage te se otvara mogućnost priključenja drugih stakleničkih objekata na sustav grijanja na račun razlike toplinskih zahtjeva projektiranih staklenika i instalirane snage. Daljnji proračun biti će izveden na poznatom broju staklenika i njihovim potrebnim godišnjim toplinskim energijama. Ukupan prihod od prodaje geotermalne toplinske energije je produkt godišnje potrebne toplinske energije staklenika, broja staklenika priključenih na sustav grijanja i cijene geotermalne toplinske energije te iznosi 1.646.276 kn. Navedeni prihod je najmanji prihod koji se može ostvariti kada se 28 staklenika grije na geotermalnu energiju. Prihod od prodaje može biti veći priključenjem dodatnih objekata za zadovoljavanje vršnih potreba grijanja kada su toplinski zahtjevi staklenika manji od dimenzionirane instalirane snage staklenika.

### *8.1.2. Kaskadni hibridni sustav iskorištavanja geotermalne energije*

Kaskadni hibridni sustav sastoji se od direktnog iskorištavanja geotermalne energije iz geotermalne vode protoka 70 l/s i temperaturne razlike od 70 – 40 ˚C sa 28 priključenih

staklenika i hibridnog sustava ventilokonvektora i dizalice topline pri raspoloživom protoku od 70 l/s i temperaturnoj razlici od 40 – 20 ˚C za grijanje dodatnog broja staklenika. Kako je hibridni sustav dimenzioniran na najniže temperature zraka u petnaestogodišnjem razdoblju pri kojima se tok geotermalne vode usmjerava na dizalice topline, proračun zarade računati će se za 23 staklenika koje je moguće grijati uz COP koji iznosi 4,97. Budući da godišnja potrebna toplinska energija za grijanje jednog tipskog staklenika iznosi 360.488 $kWh_t$, 72.532 kWh će dizalica topline prenijeti kompresijom rashladnog fluida, a preostalih 287.955 kWh će dizalica topline preuzeti iz protoka geotermalne vode. Ukupni prihod od prodaje geotermalne toplinske energije u hibridnom sustavu grijanja (drugom krugu sustava grijanja) je produkt godišnje potrebne toplinske energije staklenika koja je preuzeta iz protoka geotermalne vode, broja staklenika priključenih na sustav grijanja te cijene geotermalne toplinske energije te ona iznosi 1.080.206 kn. Ukupni prihod kaskadnog hibridnog sustava je zbroj sustava direktnog iskorištavanja i hibridnog sustava ventilokonvektora i dizalice topline i ona iznosi 2.726.482 kn za grijanje 51 staklenika, odnosno 102.000 $m^2$ površine staklenika. Važno je napomenuti kako se ukupni prihod od prodaje geotermalne toplinske energije povećava s povećanjem temperature zraka. Staklenici u prvom krugu kaskade, spojeni na sustav direktnog iskorištavanja geotermalne vode, manje pothlađuju geotermalnu vodu kada su više temperature zraka vani i manji toplinski zahtjevi za grijanjem. Tada je u drugom krugu kaskadnog sustava veća $T_{EST}$, odnosno povećava se COP i temperaturni režim rada dizalice, a samim time i veća količina potrebne toplinske energije staklenika dolazi iz energije geotermalne vode. Kada je $T_{EST}$ > 45 ˚C, sustav grijanja temelji se na ventilokonvektoru te se ukupne toplinske potrebe za grijanjem staklenika zadovoljavaju putem energije geotermalne vode. U većini vremena broj staklenika, odnosno dostupna toplinska energija za grijanje, je puno veća jer je energija koja je potrebna stakleniku za grijanje manja od instalirane snage te se otvara mogućnost priključenja drugih stakleničkih objekata na sustav grijanja na račun razlike toplinskih zahtjeva projektiranih staklenika i instalirane snage.

### 8.2. Usporedba operativnih troškova energenata na temelju godišnje potrebne toplinske energije

U tablici 8-1. prikazani su godišnji operativni troškovi potrebne toplinske energije za različite sustave grijanja staklenika.

**Tablica 8-1.** Godišnji operativni troškovi toplinske energije različitih sustava grijanja

| Sustav grijanja | Direktno iskorištavanje geotermalne energije (ΔT= 70 – 40 ˚C) | Hibridni sustav ventilokonvektora i dizalice topline | Prirodni plin |
|---|---|---|---|
| Trošak energenta (kn) | 59.000 | 108.800 | 92.200 |

Trošak energenta sustava direktnog iskorištavanja geotermalne energije rezultat je množenja potrebne godišnje količine toplinske energije i cijene toplinske energije za 28 tipskih staklenika dobivenih proračunom modela. Za daljnje iskorištavanje geotermalne energije potrebna je ugradnja hibridnog sustava odnosno ventilokonvektora i dizalice topline. Trošak energenta izračunat je za uvjete najniže temperature zraka kada se upotrebljava dizalica topline za grijanje staklenika. Uz poznati COP za navedene uvjete rada, 72.532 $kWh_e$ će biti utrošeno za rad dizalice topline to jest kompresiju rashladnog fluida, a preostalih 287.955 $kWh_t$ će dizalica topline preuzeti iz protoka geotermalne vode. Cijena električne energije za poduzetništvo određena je prema srednjenaponskoj razini i bijelom tarifnom modelu nakon prva dva mjeseca korištenja zajamčene opskrbe koji je u primjeni od 1. siječnja 2020. godine (HEP, 2019). Prosječna cijena električne energije izračunata je prema cijeni radne energije i naknade za korištenje mreže pri višoj i nižoj tarifi, i naknadi za poticanje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije i kogeneracije te iznosi 0,8515 kn/kWh. Godišnja naknada za obračunsko mjerno mjesto iznosi 792 kn te neće ulaziti u daljnji proračun kao ni porez. Prema navedenome, godišnji trošak električne energije za rad dizalice topline iznosi 61.761 kn. Preostalih 287.955 $kWh_t$ preuzima se iz protoka geotermalne vode, a njihov iznos je 47.000 kn. Više od 50 % cijene energenta hibridnog sustava je cijena električne energije. Smanjenjem toplinskih zahtjeva, povećava se COP dizalice topline te se troškovi električne energije i ukupni troškovi energenta smanjuju. Pri upotrebi prirodnog plina kao energenta za grijanje staklenika operativni godišnji troškovi grijanja su nešto manji od troškova grijanja hibridnog sustava. Na ukupnu cijenu troška energenta utječe cijena plina za poduzetništvo i iskoristivost plinskog kotla. Cijena plina za kategoriju poduzetništvo u

posljednje je vrijeme niska te je cjenovno ispod europskog prosjeka cijene plina za poduzetništvo odnosno industriju. Radi pojednostavljenja proračuna, određena je iskoristivost plinskog kotla u iznosu od 85 %. Godišnji trošak prirodnog plina dobiven je kao produkt godišnje potrebne toplinske energije staklenika, odnosno potrebne količine prirodnog plina ovisno o iskoristivosti plinskog kotla, i cijene plina.

Najmanje godišnje troškove energenta ima sustav direktnog iskorištavanja geotermalne energije preko ventilokonvektora, a za dodatan broj staklenika određenih toplinskih potreba ugrađuje se hibridni sustav ventilokonvektora i dizalice topline ili plinski kotao približnih godišnjih troškova energenata. Postavlja se pitanje isplativosti ugradnje dvaju sustava u kratkoj godišnjoj sezoni grijanja, budući da su troškovi investicije u sustav dizalica topline viši od ugradnje plinskog kotla i pripadajuće opreme. Ugradnja sustava dizalice topline isplatila bi se kada bi cijena plina za poduzetništvo rasla ili kada bi ugradnja sustava dizalica topline bila subvencionirana od strane države ili putem modela ugovaranja prodaje toplinske energije. U Republici Hrvatskoj trenutačno ne postoji sustav potpora koji bi ubrzao razvoj i poboljšao kvalitetu projekata obnovljivih izvora energije za poljoprivredne svrhe. Kroz model ugovaranja između koncesionara i kupca toplinske energije ugradnja sustava dizalice topline može postati isplativa kada bi, primjerice, cijena toplinske energije bila za određeni postotak jeftinija tijekom određenog broja godina kako bi se pokrio investicijski trošak i trošak električne energije. Na taj način bi si koncesionar osigurao otkup toplinske energije, a kupac bi si opravdao početnu investiciju, osigurao nisku cijenu toplinske energije te pridonio općem cilju smanjenja emisije stakleničkih plinova korištenjem obnovljivih izvora energije.

# 9. ZAKLJUČAK

Izgradnjom objekata iz „*Koncepcije i izvodljivosti programa gospodarske upotrebe geotermalne energije na lokaciji Lunjkovec – Kutnjak*“ Hrvatska bi se približila ostvarenju ciljeva određenih „*Nacrtom prijedloga Strategije energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050.*“. Iskorištavanje obnovljivog izvora energije povećava sigurnost opskrbe energijom, promiče energetsku učinkovitost te smanjuje emisiju stakleničkih plinova u atmosferu. Iskorištavanjem geotermalne energije s geotermalnog ležišta Lunjkovec – Kutnjak otvara se mogućnost unaprjeđivanja kvalitete gospodarskog razvoja okolice kroz korištenje geotermalne toplinske energije. U ovome diplomskome radu gospodarski razvoj očituje se kroz grijanje staklenika tipske veličine. Kao pokrovni materijal odabran je polikarbonat zbog svojstava i dugotrajnosti materijala i cijene. Za proizvodnu kulturu odabrana je rajčica jer proizvodnja rajčice zauzima gotovo trećinu udjela u svjetskoj proizvodnji povrća. Prema projektiranim unutarnjim temperaturama i vanjskim temperaturama zraka u razdoblju od 1999. do 2013. određene su toplinske potrebe tipskog staklenika. Staklenik je projektiran tako da instalirana snaga zadovoljava toplinske potrebe pri najnižoj temperaturi u 15 godina. U radu su prikazana i dva termotehnička rješenja za grijanje: sustav direktnog iskorištavanja i kaskadni hibridni sustav. Kod sustava direktnog iskorištavanja geotermalne energije putem ventilokonvektora moguće je grijanje 28 tipska staklenika odnosno 56.000 $m^2$. U većini vremena se instalirana snaga ne upotrebljava u potpunosti te dio nje postaje dostupan za grijanje većeg broja staklenika određene površine ili za zadovoljavanje vršnih toplinskih potreba staklenika s različitim baznim energentom ili izvorom grijanja. Kod kaskadnog hibridnog sustava, nakon sustava direktnog iskorištavanja, protok geotermalne vode se kreće prema ventilokonvektoru ili dizalici topline, ovisno o ulaznoj temperaturi geotermalne vode. Kod kaskadnog hibridnog sustava, iskorištavanjem geotermalne energije moguće je grijanje 23 tipska staklenika, odnosno 46.000 $m^2$. Kao što je slučaj i kod sustava direktnog iskorištavanja, instalirana snaga nije u potpunosti iskorištena te je dio nje raspoloživ za grijanje većeg broja staklenika ili zadovoljavanje vršnih potreba staklenika s drugačijim baznim energentom ili izvorom grijanja. Dakle, s raspoloživim protokom od 70 l/s i temperaturom geotermalne vode od 140 ˚C moguće je grijanje najmanje 51 tipskog staklenika površine 2.000 $m^2$ to jest 102.000 $m^2$ staklenika. Geotermalna toplinska energija temelji se na cijeni plina za poduzetništvo koja je u posljednje vrijeme iznimno niska te za potrebe proračuna diplomskog rada ona iznosi 0,1631 kn/$kWh_t$. Dakle, prodajom geotermalne toplinske energije koja je način unapređivanja i

stvaranja dodatnog prihoda cjelokupnog projekta iskorištavanja geotermalnog ležišta, koncesionar može ostvariti prihod od 2.726.482 kn bez gotovo ikakvih troškova proizvodnje iste. Usporedbom godišnjih troškova energenta između dva sustava iskorištavanja geotermalne energije i upotrebe plina i sustava plinskog kotla, geotermalna energija dokazuje svoju konkurentsku ulogu konvencionalnim izvorima energije gdje su godišnji troškovi energenta direktnog sustava iskorištavanja najpovoljniji, zatim slijedi kaskadni hibridni sustav te sustav grijanja plinom. Nadalje se postavlja pitanje isplativosti ulaganja u ugradnju pojedinog sustava grijanja kod kojeg može prevagnuti model ugovaranja između koncesionara i kupca koji bi zadovoljio obje strane i privukao druge potencijalne stranke na ulaganje u sustave i projekte iskorištavanja geotermalne energije. Na ovakav način ostvareni su ciljevi korištenja obnovljivih izvora energije, smanjenja emitiranja stakleničkih plinova te poboljšanja kvalitete poljoprivredne proizvodnje.

## 10. POPIS LITERATURE


1. ANGELINO, L., DUMAS, P., BARTOSIK, A., 2013. 14 Reports on Evaluation of Market Barriers for Geothermal District Heating in Europe: State of play, implementation of the RES Directive and Recommendations. GeoDH.
2. BRUKETA, N., 2010. Koncepcija i stanje realizacije geotermalnog programa Kutnjak – Lunjkovec (Geotermalni program). Zagreb, Geopodravina.
3. HODDER, A., BAUDOIN, W., NERISIYAN, A., TUZELC, Y., BALLIU, A., GRUDA,N., POPSIMONOVA, G., KITTAS,C., KATSOULAS, N., BARTZANAS, T., 2017. Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable production in the South East Europeans countries: Principles for sustainable intensification of smallholder farms. Food and Agriculture Organization of the United Nations, ISBN 978-92-5-109622-2. Rim.
4. HELD, A., RAGWITZ, M., GEPHART, M., KLESSMANN, C., VISSER, E., 2014. D5.2: Best practice design features for RES-E support schemes and best practice methodologies to determinate remuneration levels. DiaCore, Fraunhofer ISI, Ecofys.
5. K4RES-H2004., 2004. KeyIsue 4: *Financial Incentives Schemes For Geothermal Energy*. EGEC – European Geothermal Energy Council. Project "Key Issues for Renewable Heat in Europe" (K4RES-H), EIE/04/204/S07.38607.
6. KITTAS, C., KATSOULAS, N., BARTZANAS, T., BAKKER, S., 2013. Good Agricultural Practices for grenhouse vegetable crops: Principles for Mediterranean climate areas. Food and Agriculture Organization of the United Nations, ISBN 978-92-5-107649-1. Rim.
7. KOJAKOVIĆ, A. I DR., 2019a. Analize i podloge za izradu Strategije energetskog razvoja Republike Hrvatska, Zelena Knjiga. Energetski institut Hrvoje Požar. Zagreb.
8. KOJAKOVIĆ, A. I DR., 2019b. Analiza i podloge za izradu Strategije energetskog razvoja Republike Hrvatske, Bijela Knjiga. Energetski institut Hrvoje Požar. Zagreb.
9. KOJAKOVIĆ, A. I DR., 2019c. Nacrt prijedloga Strategije energetskog razvoja Republike Hrvatske do 2030. s pogledom na 2050. godinu. Energetski institut Hrvoje Požar. Zagreb.

10. KOLBACH, S., BALTIĆ, A., SMOLJANOVIĆ, S., CAZIN, V., ŠKRLEC, M., MURŠIĆ, R., VASARI, T., ĆORKOVIĆ, D., LEDENKO, D., DADIĆ, J., ŠUŠNJAR, I., VRKIĆ HRIBAR, V., ZGORELEC, V., MALVIĆ, T., 2011. Elaborat o rezervama geotermalne vode eksploatacijskog polja Lunjkovec – Kutnjak - 1. Obnova (Stanje 31.12.2009). Zagreb, INA, SD Istraživanje i proizvodnja nafte i plina.
11. KOLBACH, S., ŠKRLEC, M., GOLUB, M., 2018. Kvantifikacija indiciranog geotermalnog potencijala Republike Hrvatske za proizvodnju električne energije. Inženjerstvo okoliša, Vol 5, No. 1-2. Zagreb.
12. KOMERČKI, Z., MILOŠ SPRČIĆ, D., HORAK, H., MAGDIĆ, M., DUMANČIĆ, K., REŽEK, B., HECER, D., 2009. Isplativost ulaganja u energetske projekte i uređenje gospodarske zone geotermalnog programa Kutnjak – Lunjkovec. Zagreb, EKONERG – Institut za energetiku i zaštitu okoliša.
13. KUREVIJA, T., MACENIĆ, M., 2018. Iskorištavanje geotermijskih ležišta. Radna skripta. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
14. NIKOLAOU, G., NEOCLEOUS, D., KATSOULAS, N., KITTAS, C., 2019. Effects of Cooling Systems on Greenhouse Microclimate and Cucumber Growth under Mediterranean Climatic Conditions. MDPI, Agronomy 2019, 9, 300.
15. PAPASOLOMONTOS, A., BAUDOIN, W., LUTALADIO, N., CASTILLA, N., BAEZA, E., MONTERO, J.I., TEITEL, M., LOPEZ, J.C., KACIRA, M., KITTAS, C., KATSOULAS, N., BARTZANAS, T., BAKKER, S., 2013. Good Agricultural Practices for grenhouse vegetable crops: Principles for Mediterranean climate areas. Food and Agriculture Organization of the United Nations, ISBN 978-92-5-107649-1. Rim.
16. PARAĐIKOVIĆ N., KRALJIČEK, Ž., 2008. Zaštićeni prostori – Plastenici i Staklenici. Sveučilište J. J. Strossmayera u Osijeku, Poljoprivredni fakultet u Osijeku. Osijek.
17. RAFERTY, K., KAVANAUGH, S., 1998. Geothermal Direct–Use Engineering and Design Guidebook, 3rd Edition. Geo – Heat Center, Oregon Institute of Technology. Klamath Falls, Oregon: United States Department of Energy.
18. SEYAM, S. Types of HVAC Systems, 2018. Intech Open 2018, Chapter 4, 49-66.
19. SRPAK, M., ZEMAN, S., SABOL, G., 2019. Analiza i postojeće stanje izvora geotermalnih voda na području Varaždinske županije. Podravina, Volumen 18, str. 190-200.

20. TIPURIĆ, D. I DR., 2006. Koncepcija i izvodljivost programa gospodarske uporabe geotermalne energije na lokaciji Lunjkovec – Kutnjak. Zagreb: Ekonomski fakultet.
21. VESELINOVIĆ, M., ĐUREKOVIĆ, M., ŽUGEC, N., KRPAN, M., DADIĆ, J., DOMITROVIĆ, D., RAJIČ, P., VUČEMILOVIĆ, M., LUKIĆ, Ž., 2005. Elaborat o rezervama geotermalne vode u istražnom prostoru „Drava“ – Istražni lokalitet Lunjkovec – Kutnjak (Stanje 31.12.2004.). Zagreb, INA, SD Istraživanje i proizvodnja nafte i plina.
22. VESELINOVIĆ, M., ĐUREKOVIĆ, M., ŽUGEC-KULIĆ, N., KRPAN, M., DADIĆ, J., JELIĆ BALTA, J., KOLBAH, S., 2004. Geološko fizikalna studija geotermalnog polja Lunjkovec – Kutnjak. Zagreb, INA, Sektor za razradu.
23. ŽIVKOVIĆ, S., HEMERT, R., TUMARA, D., STUPIN, K., RUNAR MAGNUSSON, J., HJARTARSON, H., ROBINSON HAIZLIP, J., STOVER, M., 2017. Geotermal Energy Utilization Potential in Croatia, Field and Study Visits Report. Energetski institut Hrvoje Požar. Zagreb.

Web izvori:

24. AZU – AGENCIJA ZA UGLJIKOVODIKE. Povijest istraživanja i eksploatacije. 2018. URL:https://www.azu.hr/istra%C5%BEivanje-i-eksploatacija/povijest-istra%C5%BEivanja-i-eksploatacije/ (12.07.2019)

25. CIA – CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY. The World Factbook. 2017. URL:https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/hr.html (11.08.2019)

26. DGU. Državna geodetska uprava. URL:https://geoportal.dgu.hr/ (02.02.2020)

27. EC – European Commission, 2013. European Commission guidance for the design of renewables support schemes. URL:https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/com_2013_public_intervention_swd04_en.pdf (26.01.2020.)

28. EUROSTAT. Gas prices by the type of user. URL:https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do (19.01.2020.)

29. FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Crops. URL: http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC (15.11.2019.)

30. FZOEU. Fond za zaštitu okoliša i energetsku učinkovitost. O fondu. 2019. URL: http://www.fzoeu.hr/hr/o_fondu/ (28.10.2019.)

31. HEP Elektra. Tarifne stavke (cijene). URL: http://www.hep.hr/elektra/poduzetnistvo/tarifne-stavke-cijene-1578/1578 (20.12.2019.)

32. HORTINERGY. Climate analysis for greenhouse project. URL: https://www.hortinergy.com/en/energy-efficient-greenhouse/ (03.01.2020.)

33. HORTIUSED. Venlo Grenhouses. URL: https://horti-used.com/15677594156 (11.01.2020.)

34. HROTE. Hrvatski operator tržišta energije. Poticajne cijene. 2019a. URL: https://www.hrote.hr/poticajne-cijene (28.10.2019.)

35. IMI CRITICAL ENGINEERING. VHB and VHBS Bypass Valves. URL: http://www.imi-critical.com/products/Pages/Product-VHB.aspx (15.01.2020.)

36. INA – INDUSTRIJA NAFTE. Istraživanje i proizvodnje nafte i plina. URL:https://www.ina.hr/o-kompaniji/temeljne-djelatnosti/istrazivanje-i-proizvodnja-nafte-i-plina/28 (12.07.2019)

37. JINDUN EQUIPMENT. 2pipe 4 pipe type ceiling concealed Fan Coil for greenhouse, hotel, restaurant. URL: http://www.jdventilation.com/2pipe-4pipe-type-ceiling-concealed-Fan-Coil-for-green-house-hotel-restaurant-pd6790266.html (10.01.2020.)

38. KATASTAR. Državna geodetska uprava. URL: https://www.katastar.hr/#/ (11.01.2020.)

39. LOUNA-ESTI HALJASTUS. Industrial Greenhouses. URL: https://lounaeestihaljastus.weebly.com/industrial-greenhouses-for-sale.html (10.01.2020.)

40. OPĆINA LEGRAD. Stanovništvo, Opće kretanje stanovništva. URL: https://opcinalegrad.hr/legrad-i-okolica/stanovnistvo/ (21.11.2019.)

41. URSA. Program URSA Građevinska fizika 5.0. URL: https://www.ursa.hr/program-ursa-gradbena-fizika (03.01.2020.)

42. Watterkotte. Industrial Line Goliath 6900a.
URL:https://www.waterkotte.eu/industrial/heat-pump-191-1000kw/product/industrial-line-goliath-6900-geo-heat-pump-690-1000-kw/ (03.02.2020.)

43. Watterkotte. Industrial Line Goliath 6900b.
URL:https://www.waterkotte.eu/industrial/heat-pump-191-1000kw/product/industrial-line-goliath-6900-geo-heat-pump-690-1000-kw-1/ (03.02.2020)

44. ZAKON. Zakon o istraživanju i eksploataciji ugljikovodika. 2019.
URL:https://www.zakon.hr/z/656/Zakon-o-istra%C5%BEivanju-i-eksploataciji-ugljikovodika (13.07.2019.)

IZJAVA

Izjavljujem da sam ovaj rad s naslovom „*Energetska analiza kaskadnog korištenja geotermalne vode u stakleničkoj proizvodnji na primjeru polja Lunjovec - Kutnjak*“ izradila samostalno uz pomoć i savjete mentora te na temelju znanja stečenih na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu služeći se navedenom literaturom.

_____

Josipa Hranić