

Razvoj algoritma za simulaciju potrošnje vode pri evaporativnom hlađenju podatkovnog centra

Merkaš, Antonio

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:235:908936>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-23**

Repository / Repozitorij:

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Antonio Merkaš

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentorica:

Doc. dr. sc. Tea Žakula

Student:

Antonio Merkaš

Zagreb, 2021.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem na savjetima, stručnoj pomoći pri pisanju rada, prenesenom znanju i prilici za izradu diplomskog na ovu temu, mentorici **doc. dr. sc. Tei Žakuli**.

Također sam zahvalan cimeru, koji je uz mene bio sve godine mojeg studija i bez kojeg bi mi studentski život bio naporan i dosadan, **Ivoru Pleiću**.

Zahvaljujem svojem užem krugu prijatelja, kolegicama **Eni Đukanović** i **Niki Nikolac** te kolegi **Marku Mušici**, koji su mi bili konstantna potpora za vrijeme studiranja i pisanja rada.

Posebno zahvaljujem svojoj baki **Katarini Merkaš**, koja mi je bila odgojna uloga cijeloga života i zahvaljujući njoj sam postavio ciljeve koje i ostvarujem.

Naposljetku, zahvalan sam i posvećujem ovaj rad **Hrvoju Kovačićeku**, bez kojeg bi moja posljednja godina studija bila neispunjena i promašena. Hvala ti, naučio si me više nego što je bilo tko očekivao.

Antonio Merkaš



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

| | |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: 602 - 04 / 21 - 6 / 1 | |
| Ur. broj: 15 - 1703 - 21 - | |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Antonio Merkaš** Mat. br.: 0035208713

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Razvoj algoritma za simulaciju potrošnje vode pri evaporativnom hlađenju podatkovnog centra**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Development of an algorithm for the simulation of water consumption for data center evaporative cooling**

Opis zadatka:

Cilj rada je razvoj algoritma za satnu simulaciju rada sustava evaporativnog hlađenja podatkovnog centra za bilo koju geografsku lokaciju na svijetu. Pri tome je glavna svrha procjena potrošnje vode u ovisnosti o meteorološkim uvjetima i tehničkim karakteristikama klimatizacijske jedinice. Potrebno je razviti algoritam i provesti dinamičku simulaciju hlađenja podatkovnog centra za svaki sat u godini korištenjem programskog jezika MATLAB®. Analize je potrebno provesti za gradove Stockholm, Istanbul, Madrid, Frankfurt i Zagreb, korištenjem podataka za tipičnu meteorološku godinu za pojedinu lokaciju. Tehničke karakteristike i način regulacije klimatizacijske jedinice potrebno je usuglasiti u dogovoru s mentoricom. Rad se provodi u suradnji s tvrtkom *Vertiv Croatia d.o.o.*

Rad treba sadržavati:

- opis sustava hlađenja podatkovnog centra,
- opis klasifikacije sustava hlađenja za podatkovne centre,
- opis metode i pretpostavke korištene pri razvoju algoritma za simulaciju rada sustava hlađenja,
- opis razvijenog algoritma te njegovih ograničenja,
- rezultate i zaključke simulacije analiziranog sustava.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
06. svibnja 2021.

Datum predaje rada:
08. srpnja 2021.

Predviđeni datum obrane:
12. – 16. srpnja 2021.

Zadatak zadala:

Doc. dr. sc. Tea Žakula

Predsjednica Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

SADRŽAJ

| | |
|--|------|
| SADRŽAJ | I |
| POPIS SLIKA | II |
| POPIS TABLICA..... | IV |
| POPIS OZNAKA | V |
| SAŽETAK..... | VII |
| SUMMARY | VIII |
| 1. UVOD..... | 1 |
| 2. TERMODINAMIČKI MODEL ALGORITMA | 3 |
| 2.1. Teorijske osnove vlažnog zraka | 3 |
| 2.2. Veličine stanja vlažnog zraka | 4 |
| 2.3. Mollierov h-x dijagram za vlažni zrak | 6 |
| 2.4. Procesi s vlažnim zrakom | 8 |
| 2.4.1. Miješanje dviju struja zraka | 8 |
| 2.4.2. Ovlaživanje struje zraka..... | 10 |
| 2.5. Adijabatsko hlađenje..... | 12 |
| 2.5.1. Direktni adijabatski hladnjak | 13 |
| 2.5.2. Indirektni adijabatski hladnjak..... | 15 |
| 3. UVJETI KVALITETE ZRAKA U PODATKOVNIM CENTRIMA | 18 |
| 3.1. Klase kvalitete zraka | 18 |
| 4. STRUKTURA ALGORITMA | 20 |
| 4.1. Potprogram „Klasa“ | 21 |
| 4.2. Potprogram „Adhladnjak“ | 22 |
| 4.3. Potprogram „Stat“ | 24 |
| 4.4. Potprogram „Komora“ | 25 |
| 4.4.1. Zimski režim rada | 28 |
| 4.4.2. Ljetni režim rada | 34 |
| 5. REZULTATI | 39 |
| 5.1. Rezultati za Zagreb | 39 |
| 5.1.1. Usporedba rezultata za različite klase..... | 42 |
| 5.2. Rezultati za ostale gradove | 47 |
| 5.2.1. Frankfurt | 47 |
| 5.2.2. Istanbul..... | 49 |
| 5.2.3. Madrid..... | 51 |
| 5.2.4. Stockholm | 53 |
| 5.2.5. Usporedba rezultata..... | 55 |
| 5.3. Unaprjeđenja i ograničenja modela..... | 56 |
| 6. ZAKLJUČAK..... | 57 |
| PRILOZI..... | 60 |

POPIS SLIKA

| | |
|---|----|
| Slika 1. Fazni dijagram vode (krivulje napetosti) (iz [1]) | 3 |
| Slika 2. Mollierov h-x dijagram za vlažni zrak [3] | 7 |
| Slika 3. Shematski prikaz mješališta | 8 |
| Slika 4. Prikaz procesa miješanja u h-x dijagramu | 10 |
| Slika 5. Prikaz procesa ovlaživanja u h-x dijagramu | 12 |
| Slika 6. Prednji pogled na direktni ovlaživač tvrtke Munters [5] | 13 |
| Slika 7. Prikaz realnog i idealnog procesa adijabatskog hlađenja u h-x dijagramu | 14 |
| Slika 8. Prikaz procesa indirektnog adijabatskog hlađenja za obje struje zraka u h-x dijagramu | 16 |
| Slika 9. Psihometrijski dijagram s ucrtanim klasama [7] | 19 |
| Slika 10. Struktura razvijenog računalnog algoritma | 20 |
| Slika 11. Blok shema s ulaznim i izlaznim podacima potprograma „Klasa“ | 22 |
| Slika 12. Blok shema s ulaznim i izlaznim podacima potprograma „Adhladnjak“ | 23 |
| Slika 13. Blok shema s ulaznim i izlaznim podacima potprograma „Stat“ | 25 |
| Slika 14. Blok shema s ulaznim i izlaznim podacima za potprogram „Komora“ | 26 |
| Slika 15. Prikaz slučaja kada povratni zrak zadovoljava uvjete klase A2 u h-x dijagramu | 28 |
| Slika 16. Prikaz slučaja kada mješalište može osigurati uvjete klase | 30 |
| Slika 17. Prikaz slučaja kada mješalište ne može osigurati uvjete klase te se uključuje ovlaživač | 31 |
| Slika 18. Prikaz posebnog slučaja u kojem mješalište osigurava uvjete klase s neregularnim stanjem vanjskog zraka | 32 |
| Slika 19. Prikaz slučaja u kojem niti jedno od stanja ne može osigurati uvjete klase | 33 |
| Slika 20. Prikaz slučaja u kojem obje struje zraka ljeti mogu osigurati uvjete klase ovlaživanjem | 35 |
| Slika 21. Prikaz slučaja u kojem struja manje entalpijske vrijednosti nije u mogućnosti osigurati uvjete klase | 36 |
| Slika 22. Prikaz slučaja u kojem nijedna od struja zraka ljeti nije u mogućnosti osigurati uvjete klase | 37 |
| Slika 23. Prikaz potrošnje vode po satima u godini na primjeru klase A2 za Zagreb | 39 |
| Slika 24. Prikaz dobavnih temperatura po satima u godini na primjeru klase A2 za Zagreb .. | 40 |
| Slika 25. Prikaz satnih stanja zraka u T-x dijagramu na primjeru klase A2 s ucrtanim granicama klase za Zagreb | 42 |
| Slika 26. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A4 za Zagreb | 44 |
| Slika 27. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A3 za Zagreb | 44 |
| Slika 28. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A2 za Zagreb | 45 |
| Slika 29. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A1 za Zagreb | 45 |
| Slika 30. Satna stanja dobavnog zraka za klasu R za Zagreb | 46 |
| Slika 31. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A4 za Frankfurt | 48 |
| Slika 32. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A2 za Frankfurt | 48 |
| Slika 33. Satna stanja dobavnog zraka za klasu R za Frankfurt | 49 |
| Slika 34. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A4 za Istanbul | 50 |
| Slika 35. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A2 za Istanbul | 50 |
| Slika 36. Satna stanja dobavnog zraka za klasu R za Istanbul | 51 |
| Slika 37. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A4 za Madrid | 52 |
| Slika 38. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A2 za Madrid | 52 |
| Slika 39. Satna stanja dobavnog zraka za klasu R za Madrid | 53 |
| Slika 40. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A4 za Stockholm | 54 |

| | |
|--|----|
| Slika 41. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A2 za Stockholm | 54 |
| Slika 42. Satna stanja dobavnog zraka za klasu R za Stockholm | 55 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1. Podjela zahtjeva na zrak po klasama i njihovi uvjeti [7]..... | 18 |
| Tablica 2. Statistički prikaz zadovoljenja uvjeta klase na primjeru klase A2 za Zagreb | 41 |
| Tablica 3. Rezultati simulacija za Zagreb za sve klase | 43 |
| Tablica 4. Sumarni prikaz rezultata za Frankfurt | 47 |
| Tablica 5. Sumarni prikaz rezultata za Istanbul | 49 |
| Tablica 6. Sumarni prikaz rezultata za Madrid | 51 |
| Tablica 7. Sumarni prikaz rezultata za Stockholm..... | 53 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Jedinica | Opis |
|---------------|----------|---|
| C | - | Broj ciklusa koncentracija |
| c_{pd} | J/kgK | Specifični toplinski kapacitet pri stalnom tlaku vodene pare |
| c_{pz} | J/kgK | Specifični toplinski kapacitet pri stalnom tlaku suhog zraka |
| h | J | Ukupna specifična entalpija vlažnog zraka |
| h_d | J | Specifična entalpija vlage u zraku |
| h_m | J/kg | Specifična entalpija mješavine dviju struja zraka |
| h_z | J | Specifična entalpija suhog zraka |
| m_d | kg | Masa vlage u zraku |
| m_o | kg | Masa vode potrošene odmuljivanjem |
| m_{uk} | kg | Ukupni utrošak vode na adijabatskom hladnjaku |
| m_w | kg | Masa vode dodane u struju zraka |
| m_{we} | kg | Masa vode potrošene ishlapljivanjem na adijabatskom hladnjaku |
| m_z | kg | Masa suhog zraka |
| p | Pa | Ukupni tlak zraka |
| p_d | Pa | Parcijalni tlak vodene pare u vlažnom zraku |
| p_s | Pa | Tlak zasićenja vlažnog zraka |
| p_z | Pa | Parcijalni tlak suhog zraka u vlažnom zraku |
| q_m | kg/h | Ukupni maseni protok suhog zraka |
| q_{m1} | kg/h | Maseni protok primarne struje suhog zraka |
| q_{m2} | kg/h | Maseni protok sekundarne struje suhog zraka |
| q_{mw} | kg/h | Maseni protok vlage |
| r_0 | J/kg | Specifična latentna toplina isparavanja vode |
| R_d | J/kgK | Plinska konstanta vodene pare |
| R_z | J/kgK | Plinska konstanta zraka |
| T | K | Termodinamička temperatura suhog termometra |
| T_1 | K | Termodinamička temperature suhog termometra primarne struje |
| T_2 | K | Termodinamička temperatura suhog termometra sekundarne struje |
| V | m^3/h | Volumni protok zraka |
| x | kg/kg | Sadržaj vlage vlažnog zraka |
| x_1 | kg/kg | Sadržaj vlage struje primarnog vlažnog zraka |
| x_2 | kg/kg | Sadržaj vlage struje sekundarnog vlažnog zraka |
| x_d | kg/kg | Sadržaj vlage nezasićenog zraka |
| x_m | kg/kg | Sadržaj vlage mješavine dviju struja vlažnog zraka |
| Δx | kg/kg | Promjena sadržaja vlage pri ovlaživanju |
| ε | - | Učinkovitost adijabatskog hladnjaka |

| | | |
|---------------|--------------------|---|
| ϑ | $^{\circ}\text{C}$ | Temperatura suhog termometra zraka |
| ϑ_1 | $^{\circ}\text{C}$ | Temperatura suhog termometra struje primarnog zraka |
| ϑ_2 | $^{\circ}\text{C}$ | Temperatura suhog termometra struje sekundarnog zraka |
| ϑ_m | $^{\circ}\text{C}$ | Temperatura suhog termometra mješavine struja zraka |
| ρ_{zr} | kg/m^3 | Gustoća zraka |
| φ | - | Relativna vlažnost zraka |

SAŽETAK

Rad sadrži opis razvijenog algoritma za proračun potrošnje vode pri hlađenju podatkovnog centara. Pri tome je analiziran sustav hlađenja s mješalištem i adijabatskim hladnjakom kao ključnim dijelovima klimatizacijske jedinice. Izrađen je računalni algoritam u MATLAB-u koji je u mogućnosti provesti satnu dinamičku simulaciju hlađenja podatkovnog centra te potrošnje vode za hlađenje na bilo kojoj geografskoj lokaciji te za promjenjiva svojstva ovlaživača (definirana pomoću učinkovitost i broja ciklusa koncentracije vode). Algoritam je testiran za Frankfurt, Istanbul, Madrid, Stockholm i Zagreb, kako bi se procijenio i uspoređio utjecaj različitih klimatskih zona na rad klimatizacijske jedinice. Najveća potrošnja vode primijećena je u Istanbulu, dok je analizirana klimatizacijska jedinica najbolje optimirana za rad u Stockholmu. Rezultati za Madrid ukazuju da u slučaju smanjenih zahtjeva na zrak nema potrebe za uporabom adijabatskog hlađenja. Međutim, rezultati za Madrid i Zagreb za uvjete povećanih zahtjeva na zrak ukazuju na potrebu za ugradnjom rashladnika vode s direktnom ekspanzijom u svrhu optimizacije rada sustava. Algoritam je moguće nadograditi optimizacijom koda za brzinu izvođenja te izradom regulacijskih petlji za rad hladnjaka s direktnom ekspanzijom i postizanje optimalnih stanja vlažnog zraka.

Ključne riječi: adijabatsko hlađenje, podatkovni centar, potrošnja vode, računalna simulacija

SUMMARY

The thesis contains the analysis of an algorithm for calculation of water consumption during cooling of a data center. The analyzed data center is equipped with an air handling unit that contains, among other components, a humidifier and an air mixing box. The algorithm has been written in MATLAB and it enables a dynamic hourly simulation of data center cooling and the corresponding water consumption. This has been implemented for any geographic location and for a variety of humidifier properties (defined by efficiency and cycles of concentration). The algorithm has been tested for Frankfurt, Istanbul, Madrid, Stockholm and Zagreb, to evaluate and compare the effect of different climate zones on the air handling unit operation. The highest water consumption has been observed in Istanbul, while the analyzed air handling unit seems to be most optimized for the operation in Stockholm. It has also been noticed that for the cases of lower air quality requirements, there is no need for the adiabatic cooling in Madrid. On the other hand, the results for higher air quality requirements in Zagreb and Madrid suggest that there is a need for installation of a direct expansion chiller into the air handling unit, in order to achieve the optimal operation. Computational time of the algorithm could be further optimized by utilizing a new solving algorithm. Moreover, the regulation sequences for chiller operation and the optimization of air conditions could also be added in the future.

Key words: adiabatic cooling, data center, water consumption, simulation, algorithm, thermodynamics

1. UVOD

Rastom i razvojem računalne industrije nastala je potreba za koncentriranim skladištenjem i obradom informacija, a koja se danas izvodi u podatkovnim centrima. Velika količina električne opreme pri radu oslobađa ekvivalentno velike iznose topline koju je potrebno odvesti kako bi se osigurao neometan rad. Osim potrebe za regulacijom temperature u prostoru, od iznimne je važnosti osigurati vlažnost zraka u prihvatljivim granicama, kako ne bi došlo do preuranjenog kvarenja opreme ili statičkih izboja.

U prevladavajućoj većini slučajeva, regulacija temperature i vlage takvih prostora omogućava se klimatizacijskim jedinicama manje ili veće kompleksnosti. Kako bi se, što je više moguće, smanjila količina energije potrebne za pogon klimatizacijske jedinice, moguće je korištenje posebnih načina hlađenja zraka, od kojih je adijabatsko hlađenje najzastupljeniji. Adijabatsko hlađenje podrazumijeva ishlapljivanje vode u struju zraka pri čemu dolazi do snižavanja temperature struje zraka i istovremeno, neizbježno, ovlaživanja tog istog zraka. Pri tome, navedeni proces može se izvoditi sa dobavnom strujom zraka, koja se ubacuje u prostoriju, što se naziva direktno adijabatsko hlađenje. Ukoliko se proces izvodi s povratnom strujom, nakon čega se rekuperativno hladi dobavna struja, takav se proces naziva indirektno adijabatsko hlađenje.

Spomenuti sustav izvodi se s relativno složenom regulacijom uvjetovanom graničnim stanjima zraka koja se žele postići. Zbog toga je nemoguće predvidjeti, na makroskopskoj razini, ponašanje sustava pri eksploataciji. To za sobom povlači potrebu za dinamičkim modeliranjem sustava u svrhu analize rada i učinkovitosti sustava te potrošnje energije i vode.

Naravno, simulacija rada takve klimatizacijske jedinice ne uključuje samo adijabatsko hlađenje, već i obavezne uvjete poput rekuperacije topline (bilo mješalištem ili izmjenjivačima topline), dodatnih hladnjaka s direktnom ekspanzijom i zagrijavanja zraka na pogonskim elementima. Povećanje broja uređaja u klimatizacijskoj jedinici direktno utječe na rast složenosti proračuna takvog sustava. Iz tog razloga potrebno je razviti algoritam koji će sa zadovoljavajućom točnošću simulirati rad spomenutog sustava i omogućiti lakše projektiranje, dimenzioniranje, optimiranje i analize isplativosti pri instalaciji navedenih rješenja.

Najveći problem pri korištenju adijabatskog hlađenja kao centralnog dijela sustava, proizlazi iz činjenice da je ono izrazito ograničeno u spektru svoje primjene te mu odgovaraju

klimatski uvjeti koje karakterizira niska vlažnost i visoka prosječna temperatura. Stoga je dodatna pažnja pri razvoju algoritma dana mogućnosti analize za različite geografske lokacije, to jest, različite klimatološke uvjete pogona. Štoviše, opći algoritam trebao bi biti nezavisan o ulaznim varijablama, te bi se sve varijable, specifične za pojedinu varijantu klimatizacijske jedinice koja se analizira, morale moći naknadno definirati.

Strogi zahtjevi regulacije, velik broj ulaznih podataka te dinamička priroda proračuna, koji uz to mora zadovoljiti i određenu točnost, uvjetuju primjenu programskih jezika i računalnih alata za što uspješniji razvoj i implementaciju definiranog algoritma. Iz navedenih razloga, algoritam je razvijen u programskom jeziku MATLAB korištenjem termodinamičkih zakona i podataka proizvođača *Vertiv Croatia* d.o.o. Algoritam u svojem konačnom stanju omogućuje precizno dimenzioniranje adijabatskog hladnjaka zraka na temelju vršne potrošnje vode u godini, daje uvid u stanja zraka kojima se opskrbljuje podatkovni centar u svakom satu eksploatacije i proračunava ukupnu potrošnju vode koja je potrebna za opskrbu takvog sustava, čime se na koncu može zaključiti o isplativosti investicije za pojedinu klimatsku regiju i potrebe pogona.

2. TERMODINAMIČKI MODEL ALGORITMA

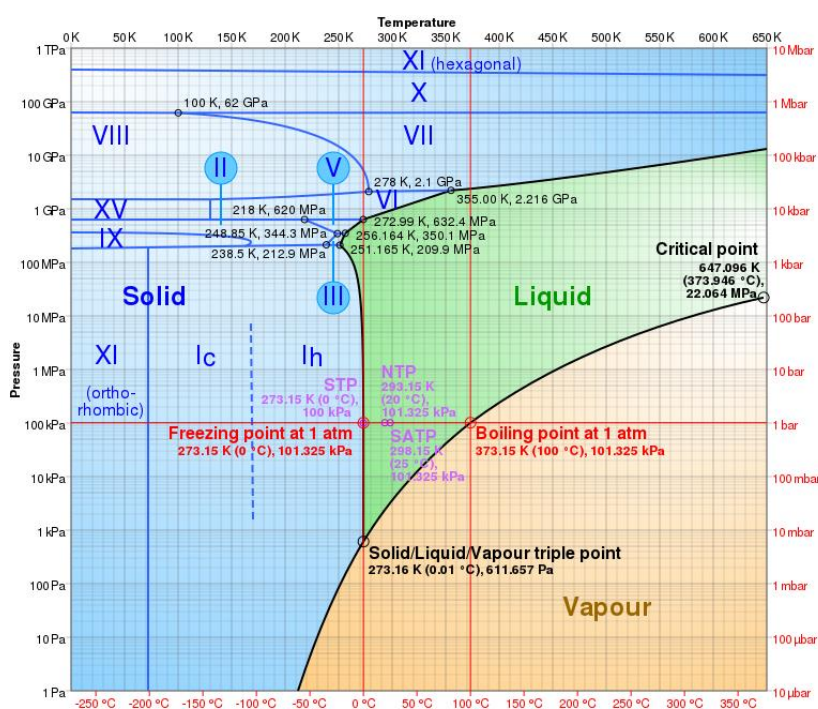
Kako bi modeliranje problema bilo što uspješnije, fizikalna podloga prema kojoj se algoritam gradi mora biti što kompletnija. Stoga se pristupa opisu medija i operacija s kojima se vrše postupci pri klimatizaciji i adijabatskom hlađenju.

2.1. Teorijske osnove vlažnog zraka

Vlažni zrak binarna je smjesa suhog zraka i vlage, pri čemu se suhi zrak smatra smjesom idealnih plinova, koja je i sama idealni plin, dok se vlaga s druge strane može pojavljivati u zraku u sva tri svoja agregatna stanja. Kako bi se opisao najčešći oblik vlažnog zraka, onaj u kojem je vlaga u parovitom stanju, koristi se Daltonov zakon, prema kojem je ukupni tlak smjese plinova p jednak zbroju parcijalnih tlakova suhog zraka p_z i vodene pare p_d . Prema čemu vrijedi jednakost (1):

$$p = p_z + p_d \text{ [Pa]} \quad (1)$$

Bitno je kod razmatranja parcijalnih tlakova navedene smjese, napomenuti njihova ograničenja. Dok će se suhi zrak koristiti na tlakovima koji ne ograničavaju proračun njegovih fizikalnih veličina, vlaga će biti ograničena tlakom zasićenja p_s , koji prema krivulji napetosti ovisi o temperaturi, kako je prikazano Slikom 1.



Slika 1. Fazni dijagram vode (krivulje napetosti) (iz [1])

Prisutnost suhog zraka uz vlagu u smjesi ne mijenja položaj ni karakteristike linija napetosti vode, stoga linije kapljevina-para i krutina-para definiraju tri varijante vlažnog zraka [2]:

- a. **Nezasićeni vlažni zrak**, pri kojem je parcijalni tlak vodene pare manji od tlaka zasićenja za temperaturu smjese ($p_s > p_d$). U tom području vlaga se u zraku nalazi u obliku pregrijane vodene pare. Granično stanje predstavlja zasićeni vlažni zrak pri kojem je $p_s = p_d$, u kojem još nema izlučivanja vlage ni u kojem obliku kondenzata, već je vlaga u zraku prisutna u suhozasićenom stanju.
- b. **Zasićeni vlažni zrak s kapljevitim kondenzatom**, koji je definiran temperaturom vlažnog zraka višom od trojne točke vode ($0,01^\circ\text{C}$), a u kojem je suvišak vodene pare u zraku bio toliki da je parcijalni tlak vode jednak tlaku zasićenja, a ostatak se kondenzirao u vodu (u obliku magle ili kapljičastog kondenzata).
- c. **Zasićeni vlažni zrak s krutim kondenzatom**, nastaje jednako kao i vlažni zrak s kapljevitim kondenzatom, jedina je razlika što mu je temperatura niža od temperature trojne točke vode. Vlaga u suvišku u ovakvom stanju vlažnog zraka najčešće je prisutna u zraku kao led u obliku mraza ili ledene magle.

2.2. Veličine stanja vlažnog zraka

Kako bi se termodinamički prikazalo stanje vlažnog zraka, potrebno je uvesti određene oznake i veličine specifične za vlažni zrak. Zbog činjenica da je vlažni zrak smjesa, osim dvije osnovne veličine stanja (npr. tlaka i temperature), potrebno je poznavati i masene ili količinske udjele konstituenata smjese. Stoga se opisuje i jedna od najbitnijih veličina stanja vlažnog zraka, sadržaj vlage x , kao omjer mase vlage u zraku m_w i mase suhog zraka m_z , kako prikazuje jednadžba (2):

$$x = \frac{m_w}{m_z} \quad [-] \quad (2)$$

Iz definicijske jednadžbe sadržaja vlage vidljivo je da suhi zrak opisuje stanje $x=0$, pri kojem je masa vlaga u zraku ništavna, dok druga krajnost $x=\infty$, a što predstavlja čistu vodu.

Sve dok je parcijalni tlak vodene pare niži od tlaka zasićenja na nekoj temperaturi, moguće je konstituente vlažnog zraka promatrati kao idealne plinove. Odnosno, prema ranije spomenutom Daltonovom zakonu, svaki plin zauzima cijeli raspoloživi volumen pri svojem parcijalnom tlaku, određenom vrstom plina, temperaturom T i volumenom V . Stoga se za vodenu paru (3) i suhi zrak (4) mogu postaviti sljedeći oblici jednadžbe stanja idealnog plina:

$$p_d V = m_d R_d T \quad (3)$$

$$p_z V = m_z R_z T \quad (4)$$

gdje su:

p_x -parcijalni tlak sudionika smjese (d – vlaga (njem. *dampf*)) [Pa]

V -volumen vlažnog zraka [m^3]

R_x -individualna plinska konstanta sudionika smjese [J/kgK]

Algebarskom manipulacijom izraza (3) i (4) te uz uvrštavanje molarnih masa zraka (28,96 g/mol) i vode (18 g/mol) može se izraziti sadržaj vlage izražen preko parcijalnih tlakova, kako to prikazuje jednadžba (5):

$$x_d = 0,622 \frac{p_d}{p_z} [-] \quad (5)$$

Izraz (5) se zatim u kombinaciji sa izrazom (1) može kombinirati kako bi se izrazio parcijalni tlak vodene pare u ovisnosti o sadržaju vlage i apsolutnom tlaku vlažnog zraka, kako je to učinjeno u jednadžbi (6):

$$p_d = \frac{p x_d}{0,622 + x_d} [Pa] \quad (6)$$

Stanje na granici zasićenja, liniji napetosti kapljevina-para, u praksi se najčešće opisuje tablično, no funkcijska ovisnost $p_s(T)$ može se opisati empirijskom jednadžbom (7) oblika (prema [3]):

$$p_s = \frac{e^{(77,3450 + 0,0057 T - \frac{7235}{T})}}{T^{8,2}} [Pa] \quad (7)$$

Osim sadržaja vlage, često korišten način prikazivanja količine vlage u zraku je pomoću relativne vlažnosti φ , koja se definira kao omjer parcijalnog tlaka vlage i parcijalnog tlaka zasićenja pri nekoj temperaturi zraka:

$$\varphi = \frac{p_d(T)}{p_s(T)} [-] \quad (8)$$

Pri tome relativna vlažnost može poprimiti vrijednosti u intervalu od 0 do 1, pri čemu 0 označava suhi zrak, dok je zrak relativne vlažnosti 1 zapravo zasićeni zrak. Meteorološki podaci često se zapisuju i iskazuju putem relativne vlažnosti zraka.

U svrhu analize termodinamičkih procesa s vlažnim zrakom, poput grijanja ili hlađenja, također je potrebno definirati entalpiju vlažnog zraka. Entalpija smjese definira se kao zbroj

entalpija konstituenata smjese, pri čemu je iznimno bitno obratiti pažnju da se kod definiranja apsolutne entalpije mora uzeti u obzir integracijska konstanta. Ona je za proračune vlažnog zraka odabrana kao ništavna pri 0°C.

Entalpija suhog zraka računa se kao umnožak specifičnog toplinskog kapaciteta zraka pri stalnom tlaku ($c_{pz}=1.005$ kJ/kgK) kako to prikazuje jednadžba:

$$h_z = c_{pz}\vartheta \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (9)$$

S druge strane, entalpija vlage u zraku ovisit će o njenom pojavnom agregatnom stanju. S obzirom da se za potrebe termodinamičkih procesa u ovom radu vlažni zrak neće pojavljivati niti u jednom drugom stanju osim nezasićenog, dovoljno je opisati entalpiju vlage u nezasićenom vlažnom zraku kako slijedi:

$$h_d = r_0 + c_{pd}\vartheta \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (10)$$

pri čemu su:

r_0 -specifična latentna toplina isparavanja vode pri 0°C (2500 kJ/kg)

c_{pd} -specifični toplinski kapacitet vodene pare pri stalnom tlaku (1.930 kJ/kgK)

Uvrštavanjem navedenih konstanti u jednadžbe (9) i (10), njihovim zbrajanjem te svedenjem na masu suhog zraka u procesu, dobiva se jednadžba za specifičnu entalpiju vlažnog zraka koja glasi:

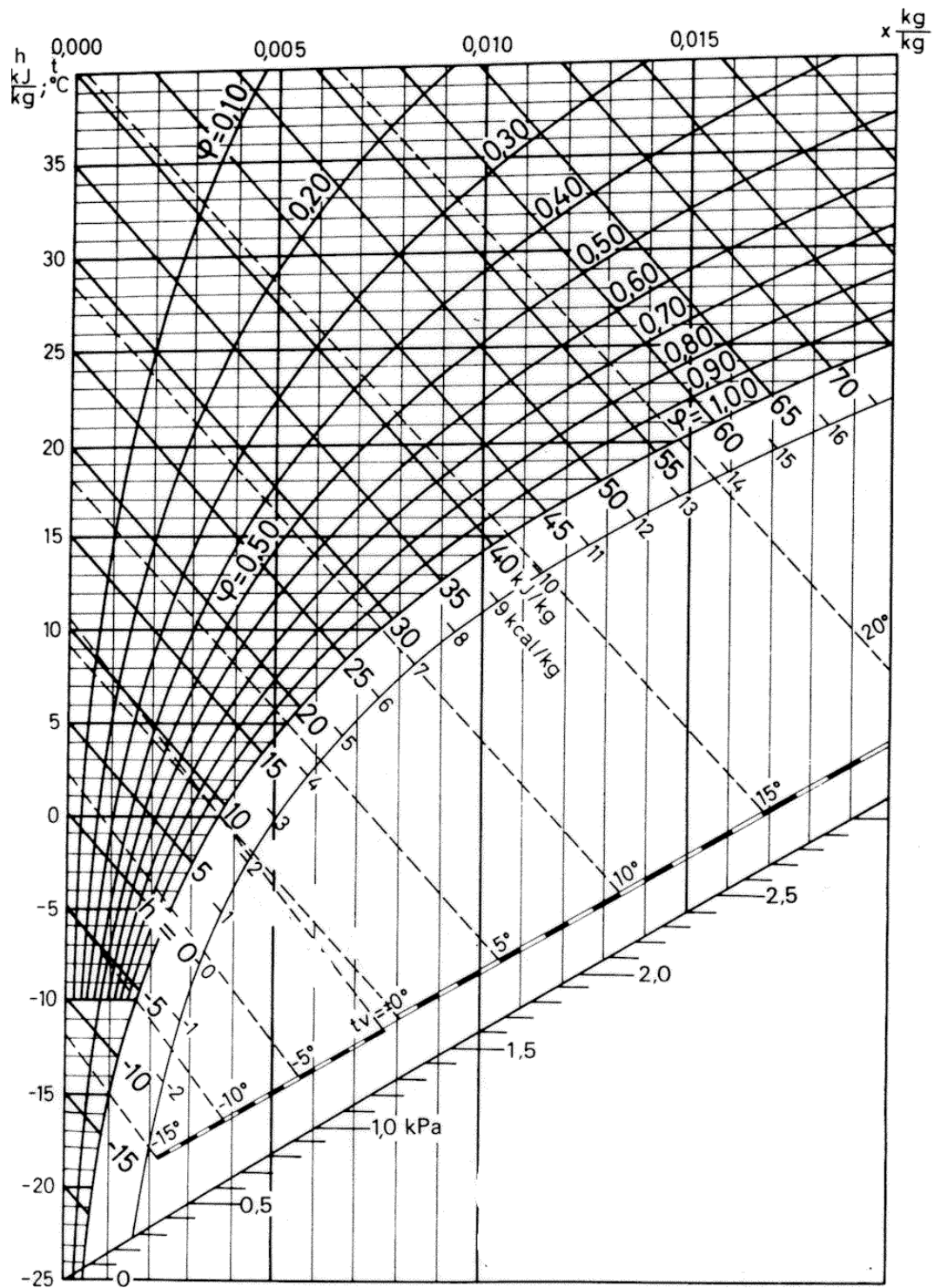
$$h = 1,005\vartheta + x_d(2500 + 1.930\vartheta) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \quad (11)$$

2.3. Mollierov h-x dijagram za vlažni zrak

Prikazivanje procesa s vlažnim zrakom nešto je složenije od klasičnih termodinamičkih procesa s idealnim plinom, što zbog činjenice da se radi o smjesi, što zbog prisustva granice faza. Iz tog razloga, prethodno navedene veličine stanja vlažnog zraka prikazuju se u posebnom h-x dijagramu za vlažni zrak. Na apscisu koordinatnog sustava nanosi se sadržaj vlage, dok je na ordinati prikazana specifična entalpija (svedena na kilogram suhog zraka). Dijagram tog oblika također je poznat kao Mollierov dijagram za vlažni zrak, dok njegova američka inačica, psihrometrijski dijagram, ima zrcalno postavljene osi.

Kako bi se olakšalo korištenje dijagrama, Mollier je konstruirao kosokutni h-x dijagram, čime je proširio nezasićeno područje dijagrama, koje je najbitnije za procese s vlažnim zrakom.

Najčešće je dijagram konstruiran za 1.0135 bara, odnosno tlak normalnog stanja, zbog činjenice da se zrak u klimatizacijske svrhe najčešće koristi pri atmosferskom tlaku. Slikom 2. prikazan je tipični Mollierov h-x dijagram za vlažni zrak.



Slika 2. Mollierov h-x dijagram za vlažni zrak [3]

Na dijagramu prikazanom Slikom 2. lijeva okomita mjerna skala prikazuje temperature zraka, dok horizontalna apscisa prikazuje sadržaj vlage. Entalpije su u kosokutnom dijagramu prikazane dijagonalnim linijama. Zakrivljene linije kroz područje dijagrama predstavljaju linije konstantne relativne vlažnosti, s rasponom od 0 do 1, gdje 1 predstavlja zasićeni zrak i stoji najdesnije u dijagramu.

2.4. Proces s vlažnim zrakom

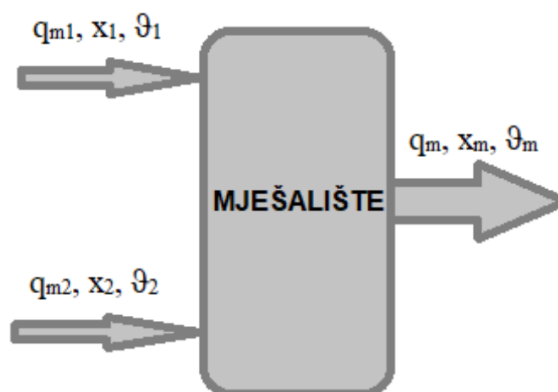
Najčešće promjene stanja i procesi sa vlažnim zrakom uključuju [2]:

- zagrijavanje i ohlađivanje struje zraka,
- miješanje struja vlažnog zraka,
- ubrizgavanje vodene pare u vlažni zrak,
- ubrizgavanje kapljevite vode u vlažni zrak.

Za potrebe algoritma i klimatizacijske jedinice razradit će se fizikalna podloga miješanja struja zraka te ubrizgavanje kapljevite vode u vlažni zrak.

2.4.1. Miješanje dviju struja zraka

Sustavi povrata topline u klimatizacijskim jedinicama su praktično obavezna komponenta [4]. Najjednostavniji način povrata topline je miješanje svježeg zraka s povratnom strujom zraka. Zbog brzog prolaska zraka kroz mješalište i dodatne izolacije, pretpostavljaju se adijabatski uvjeti. Ukoliko se mješalište zamisli kao komora s 2 ulaza i 1 izlazom, kako to prikazuje Slika 3., te se oko njega postavi granica sustava, mogu se napisati bilance za masu i energiju.



Slika 3. Shematski prikaz mješališta

Razlikujemo jednadžbu očuvanja mase suhog zraka (12) i jednadžbu očuvanja mase vlage (13):

$$q_m = q_{m1} + q_{m2} \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (12)$$

$$q_m x_m = q_{m1} x_1 + q_{m2} x_2 \left[\frac{kg}{s} \right] \quad (13)$$

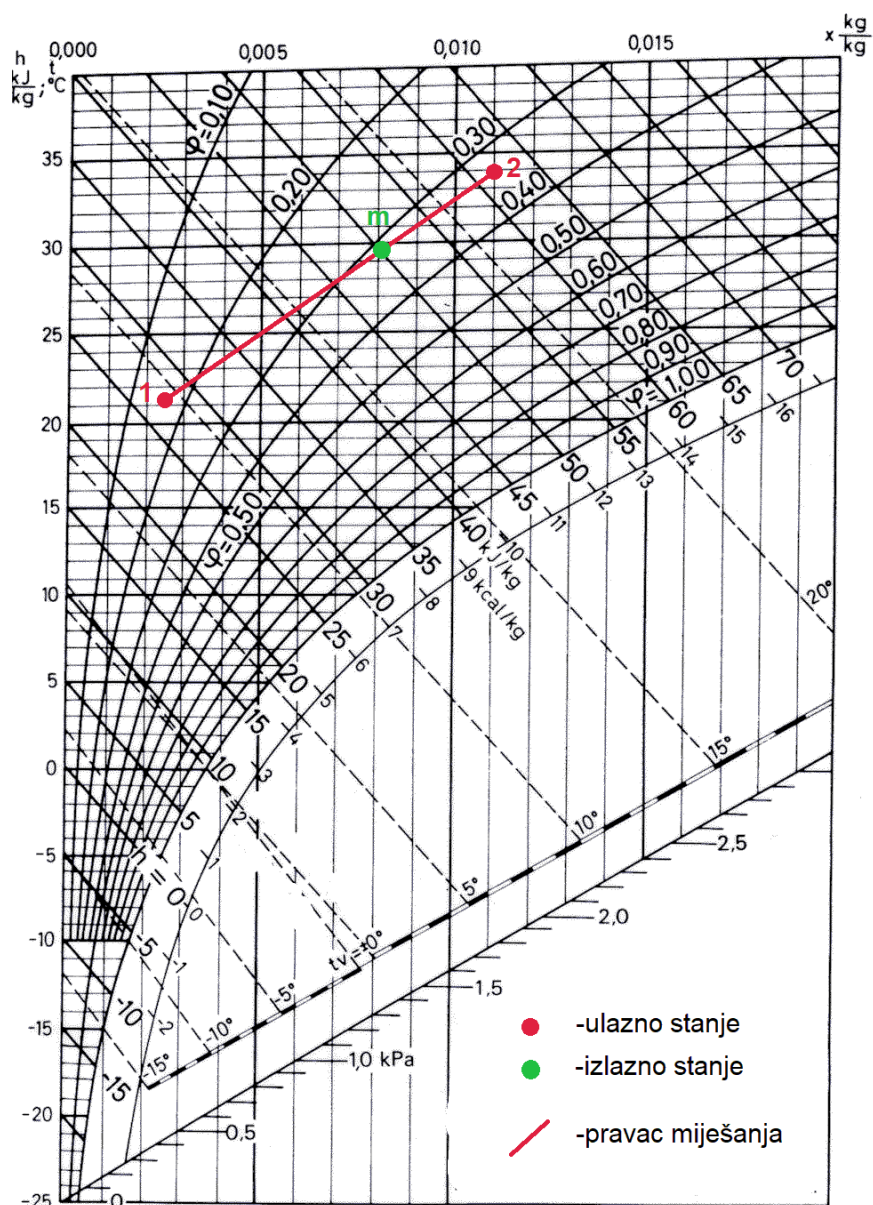
Kombinacijom jednadžbi (12) i (13) može se izraziti sadržaj vlage struje zraka nakon miješanja kao što to prikazuje jednadžba (14):

$$x_m = \frac{q_{m1} x_1 + q_{m2} x_2}{q_{m1} + q_{m2}} \left[\frac{kg}{kg} \right] \quad (14)$$

Postavljanjem jednadžbe očuvanja energije (I. glavni stavak termodinamike) na ovakav sustav dobije se specifična entalpija izlaznog stanja vlažnog zraka u obliku:

$$h_m = \frac{q_{m1} h_1 + q_{m2} h_2}{q_{m1} + q_{m2}} \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (15)$$

Miješanje se zbog svojih karakteristika te činjenice da se radi sa smjesama, lako prikazuje u h-x dijagramu, kako je to prikazano na Slici 4. Stanja 1 i 2 povezuje pravac miješanja, na kojem se mora nalaziti izlazno stanje zraka, dok položaj izlaznog stanja ovisi o masenim udjelima ulaznih struja.



Slika 4. Prikaz procesa miješanja u h-x dijagramu

2.4.2. Ovlaživanje struje zraka

Ubrizgavanje kapljevite vode u struju vlažnog zraka može se smatrati i ovlaživanjem struje zraka s obzirom da dolazi do povećanja sadržaja vlage struje koja je podvrgnuta tom procesu. U bilanci mase suhog zraka pri ovlaživanju ne dolazi do promjena, već se cijeli fizikalni proces prikazuje pomoću bilance mase vlage kako prikazuje:

$$q_{m2}x_2 = q_{m1}x_1 + q_{mw} \left[\frac{kg}{kg} \right] \quad (16)$$

pri čemu je q_{mw} masa vode ubrizgane u struju zraka. Zbog jednakosti mase ulaznog i izlaznog suhog zraka, može se izraziti promjena sadržaja vlage kao:

$$\Delta x = x_2 - x_1 = \frac{q_{mw}}{q_{m1}} \left[\frac{kg}{kg} \right] \quad (17)$$

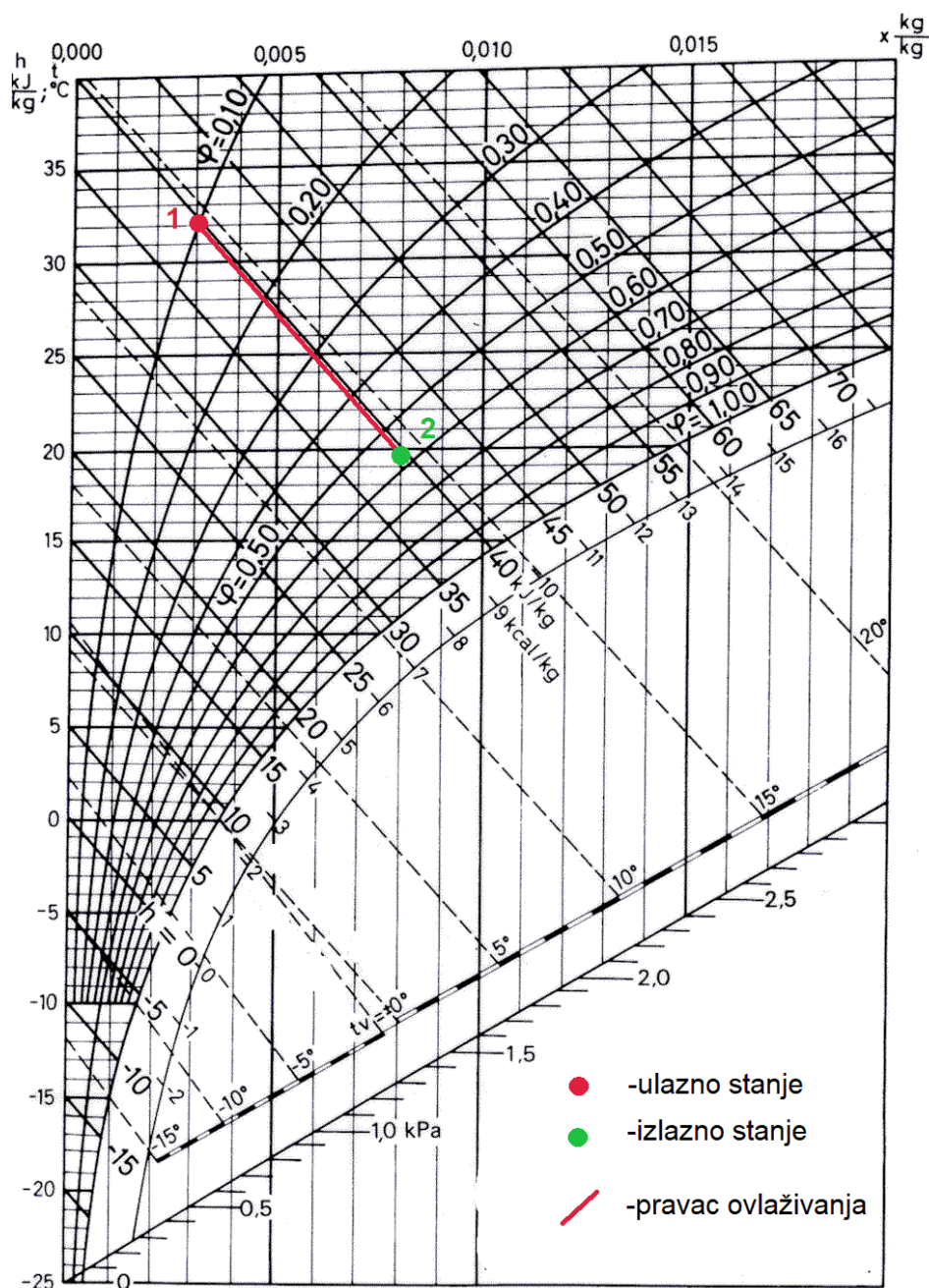
Energetska bilanca također se postavlja uz pretpostavku da nema izmjene topline s vanjskim okolišem, stoga ima oblik:

$$q_{m2}h_2 = q_{m1}h_1 - q_{mw}h_w \quad [kJ] \quad (18)$$

Zbog činjenice da je kapljevita voda na nižoj energetskej razini od vlage u zraku, zadnji član jednadžbe (18) može se zanemariti, te se zbog jednakosti masa zraka energetska bilanca svodi na:

$$h_2 = h_1 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \quad (19)$$

Proces ovlaživanja može se također jednostavno prikazati u h-x dijagramu (Slika 5). Vidljivo je da pri povećanju sadržaja vlage i konstantnoj entalpiji dolazi do smanjenja osjetne temperature zraka. Taj se fenomen pripisuje činjenici da se određeni dio unutarnje energije zraka koristi na ishlapljivanje kapljevite vode kako bi se, u obliku vlage, spojila sa zrakom. Zbog tog svojstva, ovlaživanje kapljevitom vodom često se koristi i u svrhu hlađenja, gdje se zbog oblika jednadžbe (19) naziva i adijabatsko hlađenje. Spomenuti procesi odvijaju se na komponentama koje se nazivaju adijabatski hladnjaci i glavni su dio klimatizacijske jedinice za koju se razvija algoritam u ovom radu.



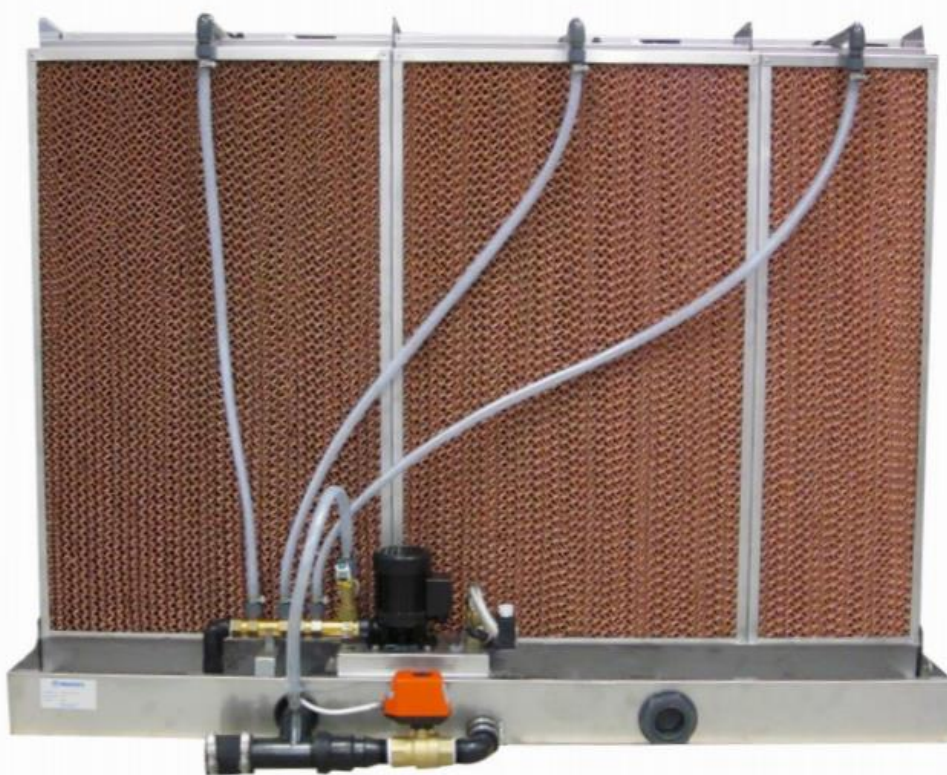
Slika 5. Prikaz procesa ovlaživanja u h-x dijagramu

2.5. Adijabatsko hlađenje

Kako je spomenuto u prijašnjem poglavlju, adijabatsko hlađenje je termodinamički proces pri kojem se struja vlažnog zraka hladi i ovlažuje uslijed ishlapljivanja vode. U klimatizacijskoj tehnici razlikuju se direktni i indirektni adijabatski hladnjak te njihova kombinacija.

2.5.1. Direktni adijabatski hladnjak

Direktni adijabatski hladnjak najjednostavniji je tip primjene adijabatskog hlađenja.. Najčešća izvedba direktnog hladnjaka je putem medija velike površine (npr. poroznih blokova ili valovitih limova) preko kojih se propušta voda. Na dnu se u najvećem broju izvedbi nalazi posuda za sakupljanje viška vode u slučaju izvedbe s cirkulacijom vode. Međutim, hladnjaci se mogu izvesti i protočno, ovisno o kvaliteti dostupne vode. Na izlazu iz ovlaživača ugrađuje se odvajač kapljica koji sprječava da višak vode sa strujom zraka ulazi u ventilacijske kanale. Prikaz klasičnog direktnog ovlaživača dan je na Slici 6.



Slika 6. Prednji pogled na direktni ovlaživač tvrtke Munters [5]

Kao što je i na Slici 6. vidljivo, voda se cijevima dovodi do vrha ovlaživača i propušta preko medija koji zadržava kapljice svojom strukturom i svojstvima.

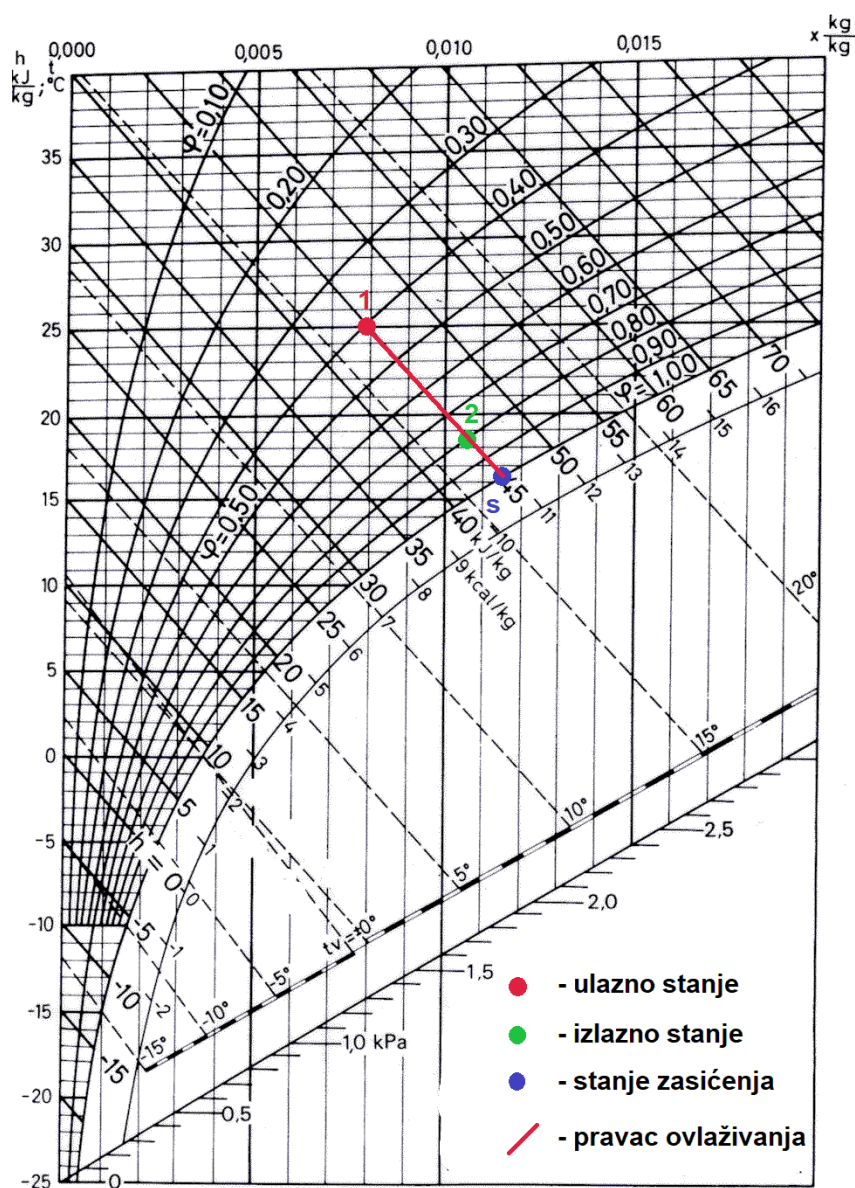
Pri proračunu direktnih ovlaživača, i svih ostalih aparata koji rade na principu ovlaživanja zraka, polazi se od činjenice da postoji maksimalna zasićenost zraka vlagom koja se ne može prijeći. U stvarnosti, adijabatski hladnjak nikad neće moći ovlažiti struju zraka do maksimuma zbog svoje konačne površine. Prikaz stvarnog i idealnog procesa ovlaživanja u h-

x dijagramu dan je Slikom 7. Maksimalno moguće ovlaživanje određeno je od strane proizvođača putem učinkovitosti ovlaživača ε , koja se može izraziti jednačbom:

$$\varepsilon = \frac{x_2 - x_1}{x_s - x_1} [-] \quad (20)$$

pri čemu vrijedi:

- x_1 - ulazni sadržaj vlage [kg/kg]
- x_2 - izlazni sadržaj vlage [kg/kg]
- x_s - maksimalni sadržaj vlage (u stanju zasićenja) [kg/kg]



Slika 7. Prikaz realnog i idealnog procesa adijabatskog hlađenja u h-x dijagramu

Ukoliko je potrebna dodatna regulacija vlažnosti, na ovlaživaču se može kontrolirati broj aktivnih sekcija, dobava vode i sl. Za primjenu u hlađenju računalne tehnike regulacija je bitan parametar, zato što previsoka vlažnost dovodi do uništavanja elektronike.

Za primjer prikazan Slikom 7., odnosno za direktni ovlaživač, potrošnja vode za hlađenje proporcionalna je promjeni sadržaja vlage zraka. Potrošnja vode uslijed ishlapljivanja stoga se može definirati kao [6]:

$$m_{we} = q_{vzr} \rho_{zr} (x_2 - x_1) \text{ [kg/s]} \quad (21)$$

gdje su:

q_{vzr} - volumenski protok zraka kroz ovlaživač [m^3/s]

ρ_{zr} - gustoća zraka [kg/m^3]

Ukoliko se smatra da eliminator kapljica radi savršeno ili da propušta kapljice u zanemarivom broju, što je najčešće slučaj, tada potrošnja ishlapljivanjem čini ukupnu potrošnju za adijabatsko ovlaživanje, ako se radi o sustavu s direktnim protokom. U slučaju sustava s cirkulacijom, dodatnu potrošnju, odnosno gubitak vode, čini postupak odmuljivanja (eng. bleed-off) koji se provodi zbog porasta koncentracije kemikalija kojima se tretira voda u zatvorenom krugu. Odmuljivanje zapravo uključuje ispuštanje vode iz sustava, a može se procijeniti putem broja ciklusa koncentracije C , kojeg definira proizvođač i ovisi o kvaliteti dostupne vode, a prikazuje se jednadžbom [5]:

$$m_o = \frac{m_w}{C - 1} \text{ [kg/s]} \quad (22)$$

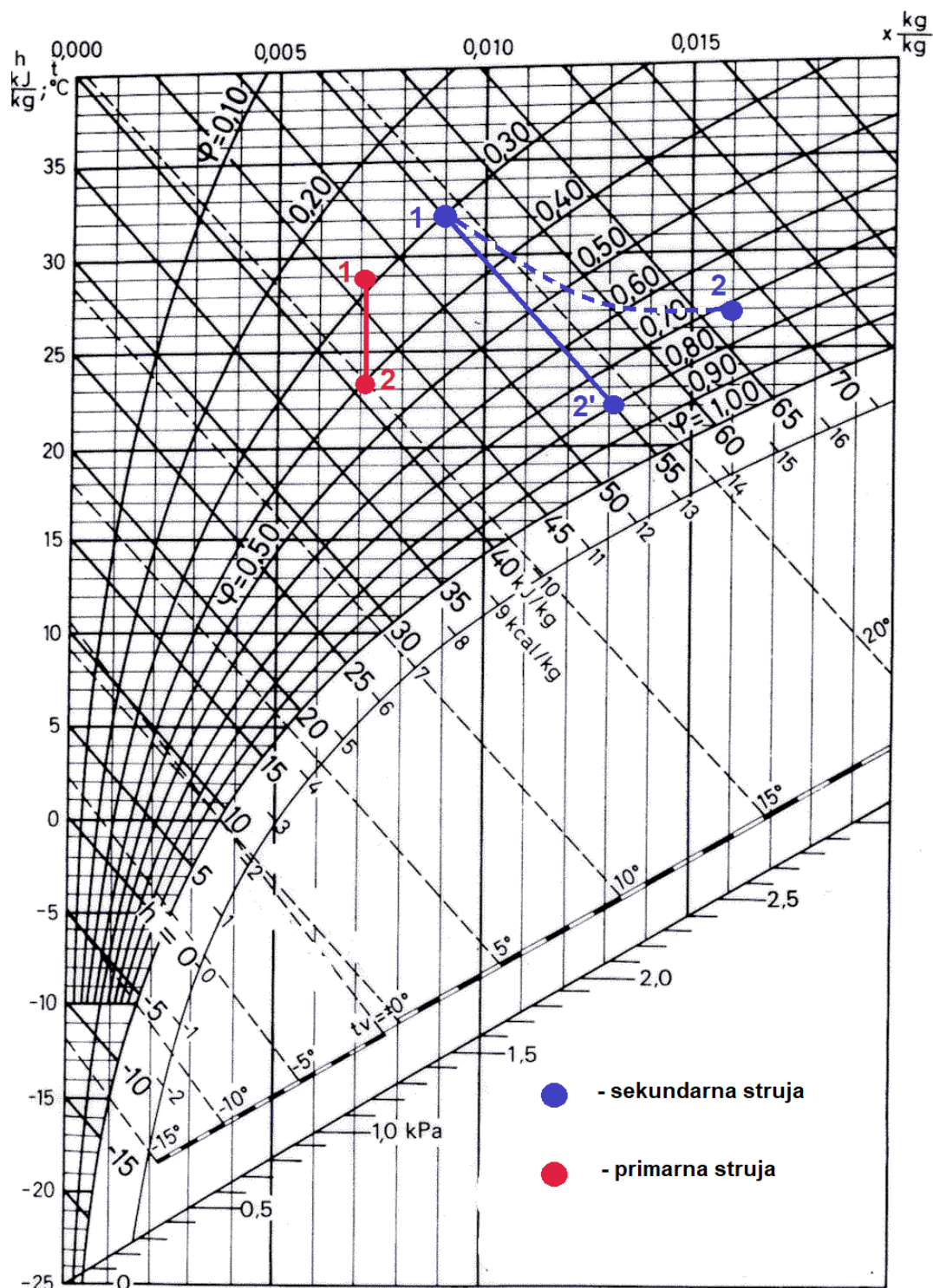
Prema tome, ukupna potrošnja vode na direktnom hladnjaku je zbroj dviju navedenih iznosa te se može izraziti kao:

$$m_{uk} = m_w + m_o \text{ [kg/s]} \quad (23)$$

2.5.2. Indirektni adijabatski hladnjak

Indirektni adijabatski hladnjak radi na istoj teorijskoj podlozi kao i direktni hladnjak, no razlika je u tome što se adijabatski ne hladi primarna, već sekundarna struja, najčešće je to struja povratnog zraka ili vanjski zrak. Sekundarna struja zbog svoje smanjene temperature tada

osjetno hladi primarnu struju koju se želi ohladiti, odnosno dovesti u prostor. Prednost ovakvog načina hlađenja je u činjenici da pri tome ne dolazi do povećanja sadržaja vlage primarne struje. Proces je prikazan u h-x dijagramu na Slici 8.



Slika 8. Prikaz procesa indirektnog adijabatskog hlađenja za obje struje zraka u h-x dijagramu

Na Slici 8. je vidljivo kako se sekundarna struja istovremeno adijabatski hladi uslijed ishlapljivanja vode te osjetno grije uslijed izmjene topline s primarnom strujom, zbog čega izlazno stanje sporedne struje klizi u desno. Glavna struja se pritom hladi uz zadržavanje konstantnog sadržaja vlage, što se također očituje na dijagramu.

Daljnja analiza indirektnih adijabatskih hladnjaka nije potrebna u sklopu ovog rada, s obzirom da se algoritam izrađuje za analizu klimatizacijske jedinice s direktnim adijabatskim hladnjakom s odmuljivanjem.

3. UVJETI KVALITETE ZRAKA U PODATKOVNIM CENTRIMA

U klasičnim, komfornim, primjenama termotehničkih sustava, kvalitetu zraka uvjetuju parametri toplinske ugodnosti te se kvaliteta najčešće definira pomoću temperature i vlažnosti zraka u sezoni grijanja, odnosno hlađenja. Zadani uvjeti se zatim klimatizacijskim sustavom postižu u odnosu na atmosfersko stanje zraka, stanje povratnog zraka iz prostora te gubitke, odnosno dobitke u samom prostoru. U podatkovnim centrima parametri toplinske ugodnosti nisu prevladavajući faktor koji uvjetuje kvalitetu zraka, već je prioritet kvaliteta i trajnost rada računalnog sustava. Stoga varijacije temperature i vlažnosti mogu biti znatno veće nego što to zahtjeva komforna primjena. Uvjeti kvalitete zraka za podatkovne centre izražavaju se klasama, odnosno poljima u h-x dijagramu unutar kojih dobavni zrak zadovoljava tražene uvjete.

3.1. Klase kvalitete zraka

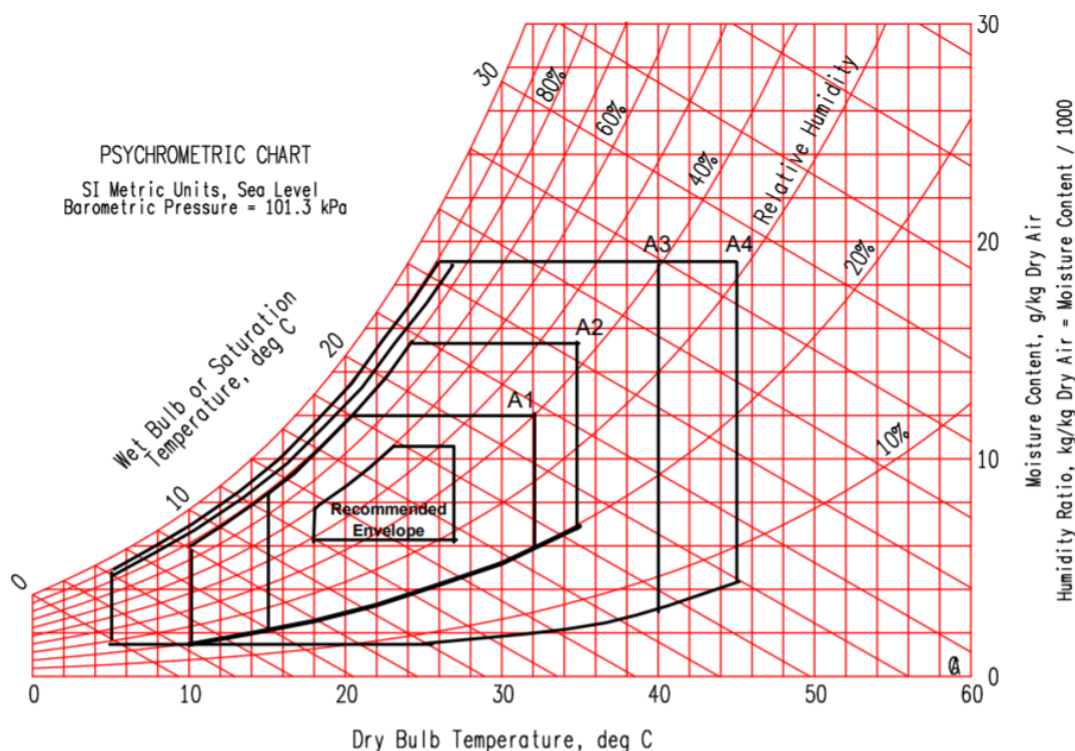
Klase kvalitete zraka propisuju se ovisno o primjeni i potrebama postrojenja ili korisnika. Najraširenije je korištenje podjele u klase prema [7] koje je prikazano Tablicom 1. U tablici, klase B i C su klase za kućnu i industrijsku primjenu te nisu relevantne za ovu analizu. Ostale klase se isključivo koriste za praćenje rada podatkovnih centara. Klasa R ujedno predstavlja i preporučeno područje koje bi svaka od A tipova klasa trebala težiti ispuniti. Strogoća pojedine klase opada povećanjem broja klase, pa je, primjerice, vidljivo da klasa A3 ima slobodnije uvjete od A2 itd.

Tablica 1. Podjela zahtjeva na zrak po klasama i njihovi uvjeti [7]

| Klasa | Raspon temperatura suhog termometra [°C] | Raspon vlažnosti | Najviša točka rošenja (TR) [°C] |
|-------|--|--|---------------------------------|
| R | 18 do 27 | 5,5°C TR do 60% relativne vlažnosti (RV) | 15 |
| A1 | 15 do 32 | 20% do 80% RV | 17 |
| A2 | 10 do 35 | 20% do 80% RV | 21 |
| A3 | 5 do 40 | -12°C TR i 8% RV do 85% RV | 24 |
| A4 | 5 do 45 | -12°C TR i 8% RV do 90% RV | 24 |
| B | 5 do 35 | 8% RV do 80% RV | 28 |

| | | | |
|---|---------|-----------------|----|
| C | 5 do 40 | 8% RV do 80% RV | 28 |
|---|---------|-----------------|----|

Zahtjevi koji su postavljeni klasama mogu se prikazati dijagramski kao polja zadovoljavajućih stanja zraka. Primjer ASHRAE-ove vizualizacije klasa [7] u psihrometrijskom dijagramu prikazan je na Slici 9.



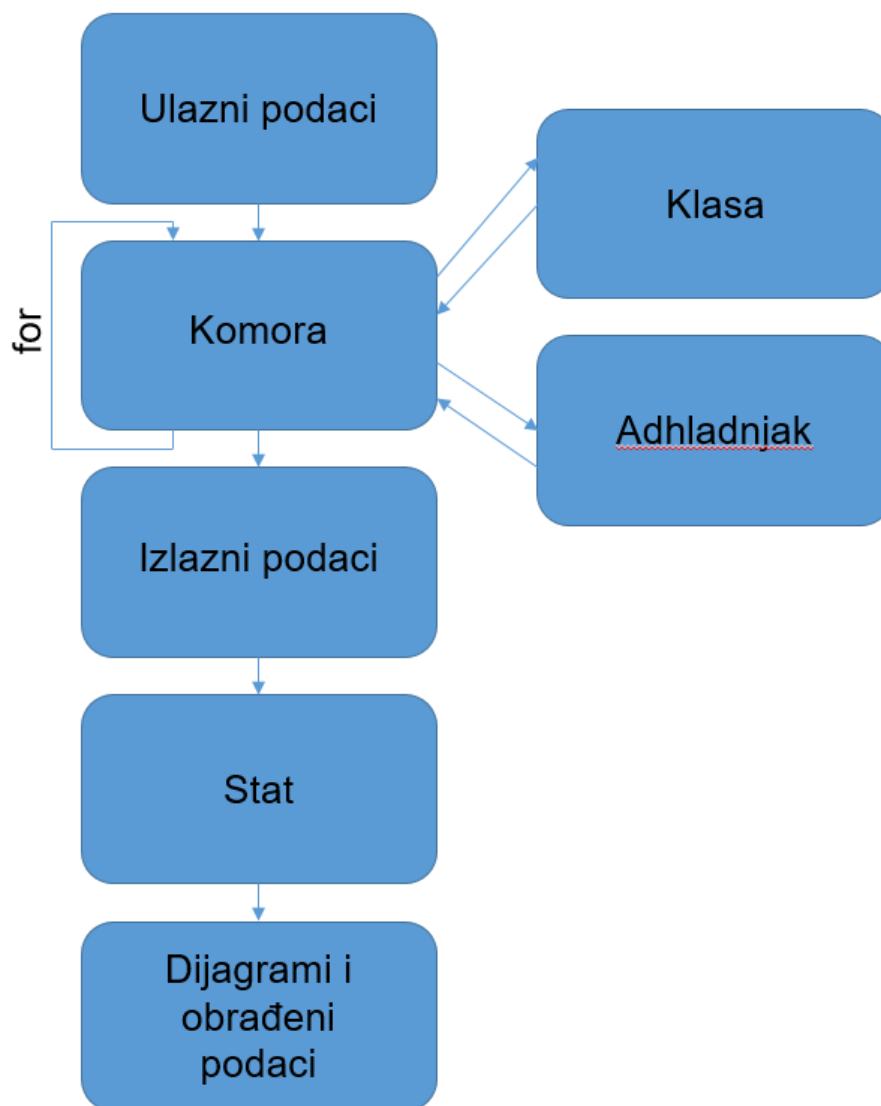
Slika 9. Psihrometrijski dijagram s ucrtanim klasama [7]

Klase A1 i A2 su klase koje se najčešće postavljaju kao zahtjevi za podatkovne centre. Pri tome se sustav regulacije izvodi s ciljem da se kada je to moguće pogoda klasa R, odnosno preporučeno stanje. Klasu R iznimno je teško zadovoljiti veliki postotak vremena u slučaju izvedbe klimatizacijskih jedinica s malim brojem komponenti (primjerice, bez hladnjaka s direktnom ekspanzijom).

Razvijeni algoritam omogućava definiranje željene klase te izračunavanje bitnih parametara rada sustava, ponajprije potrošnje vode za definirane meteorološke podatke. Algoritam također izračunava i identificira sate u godini u kojima je klasa zadovoljena, te u kojima nije.

4. STRUKTURA ALGORITMA

Algoritam se sastoji od tri glavna i jednog pomoćnog potprograma. Centralni dio algoritma čini potprogram „Komora“ u kojem je modelirana regulacija sustava te osigurana komunikacija s druga dva važna potprograma, to jest s potprogramima „Adhladnjak“ i „Klasa“. Shema komunikacije algoritma s ulaznim i izlaznim podacima dana je na Slici 10.



Slika 10. Struktura razvijenog računalnog algoritma

Ulazne podatke algoritama čine:

- satne temperature kroz godinu za odabranu geografsku lokaciju [°C],
- satne relativne vlažnosti kroz godinu za odabranu geografsku lokaciju [%],

- učinkovitost ovlaživača [-],
- broj ciklusa koncentracije [-],
- snaga ventilatora [kW],
- udio predane topline s ventilatora na zrak [-],
- volumenski protok zraka kroz klimatizacijsku jedinicu [m³/h],
- klasa uvjeta kvalitete zraka (R ili A1:4).

Algoritam se izvodi s pretpostavkom da je klimatizacijski sustav podatkovnog centra projektiran na način da toplinski dobici prostora u kombinaciji s protočnim volumenom zraka za hlađenje uzrokuju porast temperature zraka za 12°C u periodu od 1 h [8].

Izlazni podaci algoritma sadrže:

- satnu potrošnju vode kroz godinu [L],
- vršnu potrošnju vode [L/h],
- temperature dobavnog zraka [°C],
- sadržaje vlage dobavnog zraka [kg/kg],
- postotak zadovoljavanja/prekoračenja uvjeta klase [%],
- grafički prikaz dobavnih stanja vlažnog zraka za sve sate u godini.

U nastavku bit će opisan svaki od navedenih potprograma algoritma te objašnjene ulazne i izlazne veličine te način na koji su strukturirani.

4.1. Potprogram „Klasa“

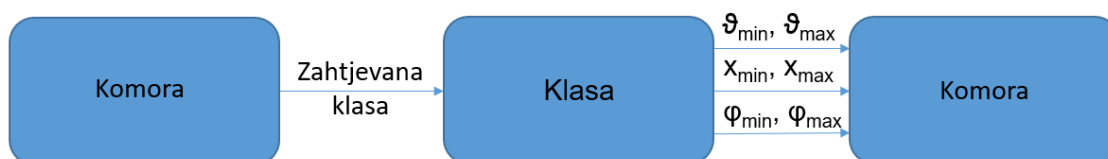
„Klasa“ je najjednostavniji potprogram algoritma koji sadrži sve vrijednosti opisane ASHRAE standardima [7]. „Klasa“ zahtijeva ulazne podatke od „Komore“ u tipu podataka string prema kojem se poziva određena klasa. Primjerice, ako se u „Komori“ definira klasa 'A1', „Klasa“ će pronaći tehničke zahtjeve za tu specifičnu klasu.

Izlazni podaci potprograma, a koji se dalje koriste u potprogramu „Komora“ su:

- gornja temperaturna granica klase [°C],
- donja temperaturna granica klase [°C],
- gornja granica sadržaja vlage [kg/kg],
- donja granica sadržaja vlage [kg/kg],

- minimalna relativna vlažnost [-],
- maksimalna relativna vlažnost [-].

Granice sadržaja vlage „Klasa“ proračunava iz ograničenja točke rose prema Tablici 1. pomoću jednadžbi (5) i (7). Blok shema s ulaznim i izlaznim podacima potprograma dana je na Slici 11. Na slici 11. su vidljive funkcijske veze s „Komorom“ koje su prethodno opisane te se također mogu zamijetiti na Slici 10.



Slika 11. Blok shema s ulaznim i izlaznim podacima potprograma „Klasa“

4.2. Potprogram „Adhladnjak“

„Adhladnjak“ sadrži sva fizikalna ograničenja i način rada direktnog adijabatskog hladnjaka zraka opisanih u poglavlju „Termodinamičke osnove algoritma“.

„Adhladnjak“ od „Komore“ dobiva trenutno stanje zraka koji treba hladiti, a u „Komore“ vraća podatke o izlaznom stanju zraka i potrošnji vode. Osim procesa hlađenja direktnim ovlaživanjem, on sadrži i određene regulacijske mehanizme provjere koji uvjetuju fizikalno točan rad simulacije, a koji će biti opisani kasnije.

Ulazne podatke „Adhladnjak“ dobiva od „Komore“, a sadrže:

- volumenski protok zraka [m^3/h],
- ulaznu relativnu vlažnost u analiziranom satu [%],
- ulaznu termodinamičku temperaturu zraka u analiziranom satu [K],
- učinkovitost ovlaživača [-],
- broj ciklusa koncentracija [-],
- maksimalnu dopuštenu relativnu vlažnost [%],
- maksimalni dopušteni sadržaj vlage [kg/kg],
- maksimalnu dopuštenu izlaznu temperaturu [$^{\circ}\text{C}$],
- željenu (srednju) vlažnost klase [%].

Od svih navedenih ulaznih podataka, posljednja četiri uvjetuje odabrana klasa.

Izlazni podaci ovog potprograma su:

- ukupna potrošnja vode u analiziranom satu [kg],
- izlazna temperatura iz ovlaživača u analiziranom satu [°C],
- izlazni sadržaj vlage u analiziranom satu [kg/kg].

Blok shema s ulaznim i izlaznim podacima dana je na Slici 12.



Slika 12. Blok shema s ulaznim i izlaznim podacima potprograma „Adhladnjak“

Dijagram toka algoritma potprograma „Adhladnjak“ je kako slijedi:

1. Određivanje fizikalnih veličina ulaznog zraka (prema jednadžbama (5), (7), (8) i (11)),
2. Izračun temperature vlažnog termometra na pravcu konstantne entalpije,
3. Izračun stanja pri zasićenju (prema (5) i (7)),
4. Određivanje izlaznog sadržaja vlage (prema (20)),
5. Određivanje ostalih veličina stanja izlaznog zraka (prema (7) i (8)),
6. Korekcija izlaznog stanja u odnosu na željenu relativnu vlažnost,
7. Korekcija izlaznog stanja u odnosu na maksimalnu relativnu vlažnost,
8. Korekcija izlaznog stanja u odnosu na maksimalni sadržaj vlage,
9. Korekcija greške ovlaživanja (ako $x_2 < x_1$),
10. Izračun potrošnje vode (prema (21), (22) i (23)),
11. Kraj programa, vraćanje vrijednosti u „Komoru“.

Kao što je prije napomenuto, „Adhladnjak“ sadrži veliki broj korekcijskih petlji, koje su potrebne za osiguravanje ispravnog rada ovlaživača, što s fizikalne strane (kako ne bi došlo do nelogičnosti u redosljed u ovlaživanja zbog ostalih korekcija), što zbog regulacijskih uvjeta postavljenih na sustav klasama.

Ovaj potprogram je također najsloženiji dio algoritma i ima najdulje vrijeme izvođenja. Naime, potprogram 5 puta traži rješenje sustava jednadžbi koji sadrži jednadžbu (7). Iterativno rješavanje sustava jednadžbi se u algoritmu postiže MATLAB-ovom ugrađenom *vpasolve* funkcijom. No, zbog kompleksnosti sustava jednadžbi (eksponencijalna funkcija u razlomku s potencijom) izračun rješenja zahtjeva vrijeme. Za buduće verzije algoritma, predviđa se sastavljanje specifičnog rješavačkog algoritma po nekoj od numeričkih metoda, u svrhu povećanja brzine izvođenja algoritma.

4.3. Potprogram „Stat“

„Stat“ je statistički opcionalni potprogram algoritma i pokreće se nezavisno o izvršenju glavnog algoritma. „Stat“ čita izlazne vrijednosti zapisane u Excel datotekama, te poziva „Klasu“ za pregled uvjeta postavljenih na zrak, prema kojim radi statističku analizu. Prolazi po svim satima u godini i svrstava dobivena stanja vlažnog zraka u stanja koja zadovoljavaju preporučene vrijednosti, u stanja koja zadovoljavaju klasu i u stanja koja ne zadovoljavaju klasu. Na samom kraju „Stat“ crta pojednostavljeni oblik h-x dijagrama na kojem se prikazuju sve satne vrijednosti dobivene algoritmom.

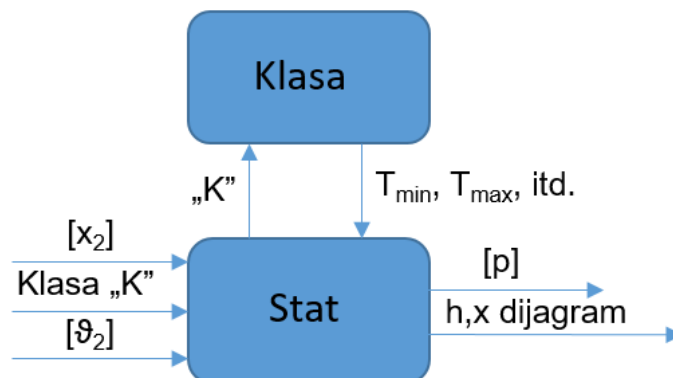
Ulazni podaci potprograma „Stat“ su:

- vektor dobavnih sadržaja vlage za sve sate u godini,
- vektor dobavnih temperatura za sve sate u godini,
- tražena klasa (posljedično granice klase).

Izlazne vrijednosti potprograma čine:

- vektor postotnih udjela zadovoljenja područja klase,
- h-x dijagram dobavnih stanja.

Ulazne i izlazne vrijednosti su ucrtane na blok shemi, kao i za prijašnje potprograme na Slici 13.



Slika 13. Blok shema s ulaznim i izlaznim podacima potprograma „Stat“

4.4. Potprogram „Komora“

„Komora“ je centralni dio algoritma u kojem su smješteni pozivi na druge potprograme te sadrži regulaciju klimatizacijske jedinice. Ona ujedno čini i sučelje za upis ulaznih podataka koje definira korisnik:

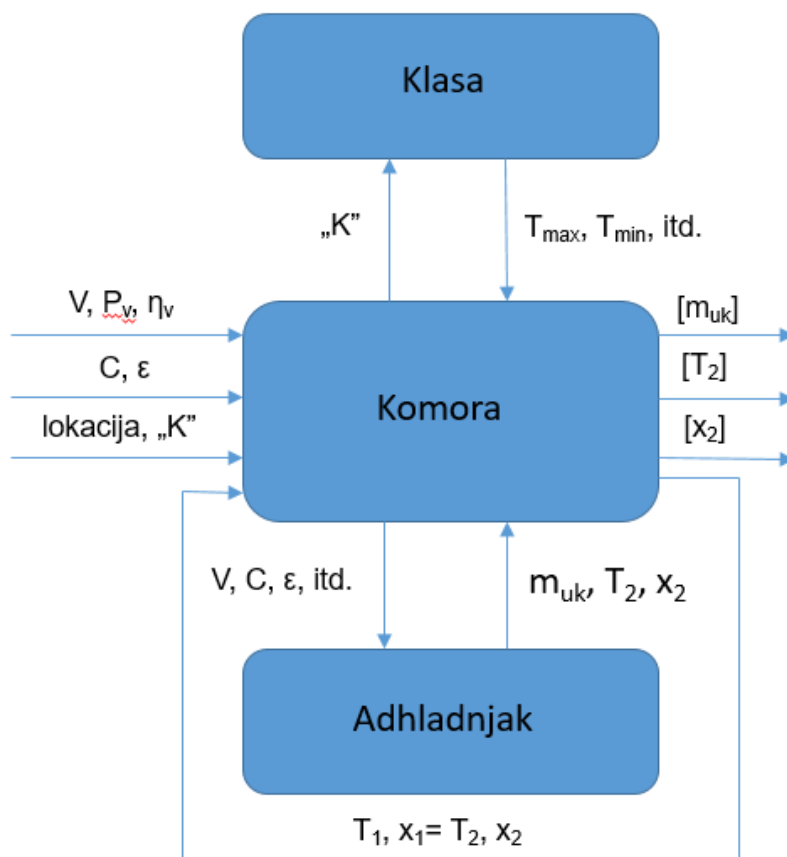
- volumenski protok zraka [m^3/h],
- učinkovitost ovlaživača [-],
- broj ciklusa koncentracije [-],
- učin ventilatora klimatizacijske jedinice P_v [kW],
- udio predaje topline zraku na ventilatoru η_v [-],
- geografska lokacija,
- klasa.

Izlazni podaci „Komore“ sadrže:

- vektor potrošnje po satima u godini [kg],
- vektor dobavnih temperatura po satima u godini [$^{\circ}\text{C}$],
- vektor sadržaja vlage po satima u godini [kg/kg].

Kao i za prijašnje potprograme, blok shema na Slici 14. prikazuje sve ulazne i izlazne podatke za „Komoru“ te komunikacijske veze s drugim potprogramima. Slika 14. je u ovom

slučaju specifična iz razloga što „Komora“ vrši dinamičku iteraciju po satima u godina, stoga sama sebi daje podatke za sljedeći korak.



Slika 14. Blok shema s ulaznim i izlaznim podacima za potprogram „Komora“

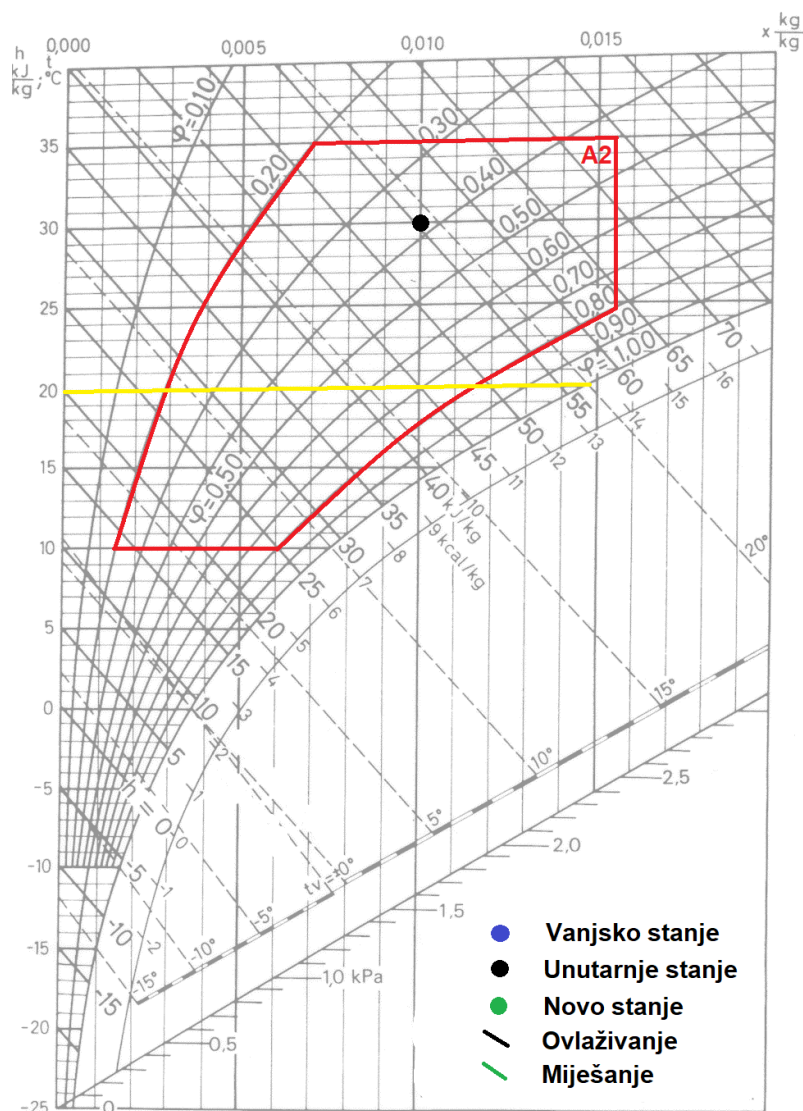
Skraćeni redoslijed operacija potprograma „Komora“ je sljedeći:

1. Pozivanje potprograma „Klasa“,
2. Određivanje srednje relativne vlažnosti klase (aritmetička sredina),
3. Učitavanje pretpostavljenih vrijednosti za prvu iteraciju,
4. Petlja po satima u godini
 - 4.1. Određivanje fizikalnih veličina vanjskog zraka u satu (prema (5), (7), (8) i (11)),
 - 4.2. Provjera u slučaju da vanjski zrak zadovoljava klasu,

- 4.2.1. Ako zadovoljava, program izračunava novo stanje na izlazu,
- 4.2.2. Ako ne zadovoljava, pokreće se odabir načina rada (ljetno, zima),
- 4.2.3. Odabir režima rada,
 - 4.2.3.1. Vanjska temperatura manja od 20°C,
 - 4.2.3.1.1. Zimski način rada,
 - 4.2.3.2. Vanjska temperatura viša od 20°C,
 - 4.2.3.2.1. Ljetni način rada,
- 4.3. Zapis izlaznih veličina,
- 4.4. Određivanje fizikalnih veličina novog unutarnjeg stanja za sljedeći sat,
- 5. Ispis izlaznih podataka u Excel file.

U navedenom dijagramu toka najbitnija je definicija zimskog i ljetnog režima rada. Zbog njihove važnosti za točnost simulacije, svaki od njih bit će posebno pojašnjen.

U slučaju da korak pod (b.) zadovoljava, stanje zraka manje entalpije zagrijava se za toplinu koju predaju ventilator te se smatra dobavnim stanjem. Takav slučaj na primjeru klase A2 i povratnog zraka prikazuje Slika 15. Žuta linija koja presijeca klasu je prekretna temperatura 20°C, prema kojoj se određuje režim regulacije.



Slika 15. Prikaz slučaja kada povratni zrak zadovoljava uvjete klase A2 u h-x dijagramu

4.4.1. Zimski režim rada

Zimska regulacija provodi se kad je okolišna temperatura niža od 20°C . U zimskom načinu rada mješalište je glavni element koji osigurava stanje vlažnog zraka, kada mješalište ne može postići uvjete klase (zbog pojave preniske vlažnosti), tada se uključuje ovlaživač, koji podiže sadržaj vlage, te u sljedećoj iteraciji mješalište ponovno može raditi kao projektirano.

Algoritam mješališta napravljen je na način da se računaju vrijednosti fizikalnih veličina vlažnog zraka iz prostora i okoliša te uz pomoć jednadžbi (14) i (15) izračunava stanje mješavine. Algoritam linearno mijenja omjer pojedine struje dok ne postigne stanja mješavine

koje zadovoljavaju nametnuti uvjeti klase. U slučaju da se takvo stanje ne može postići miješanjem, postoje dvije opcije:

- stanje zraka prekoračilo je maksimum vlažnosti te se zahtijevano stanje ne može postići danom klimatizacijskom jedinicom,
- stanje zraka ima prenisku vlažnost te je potrebno stanje više entalpijske razine propustiti preko adijabatskog hladnjaka.

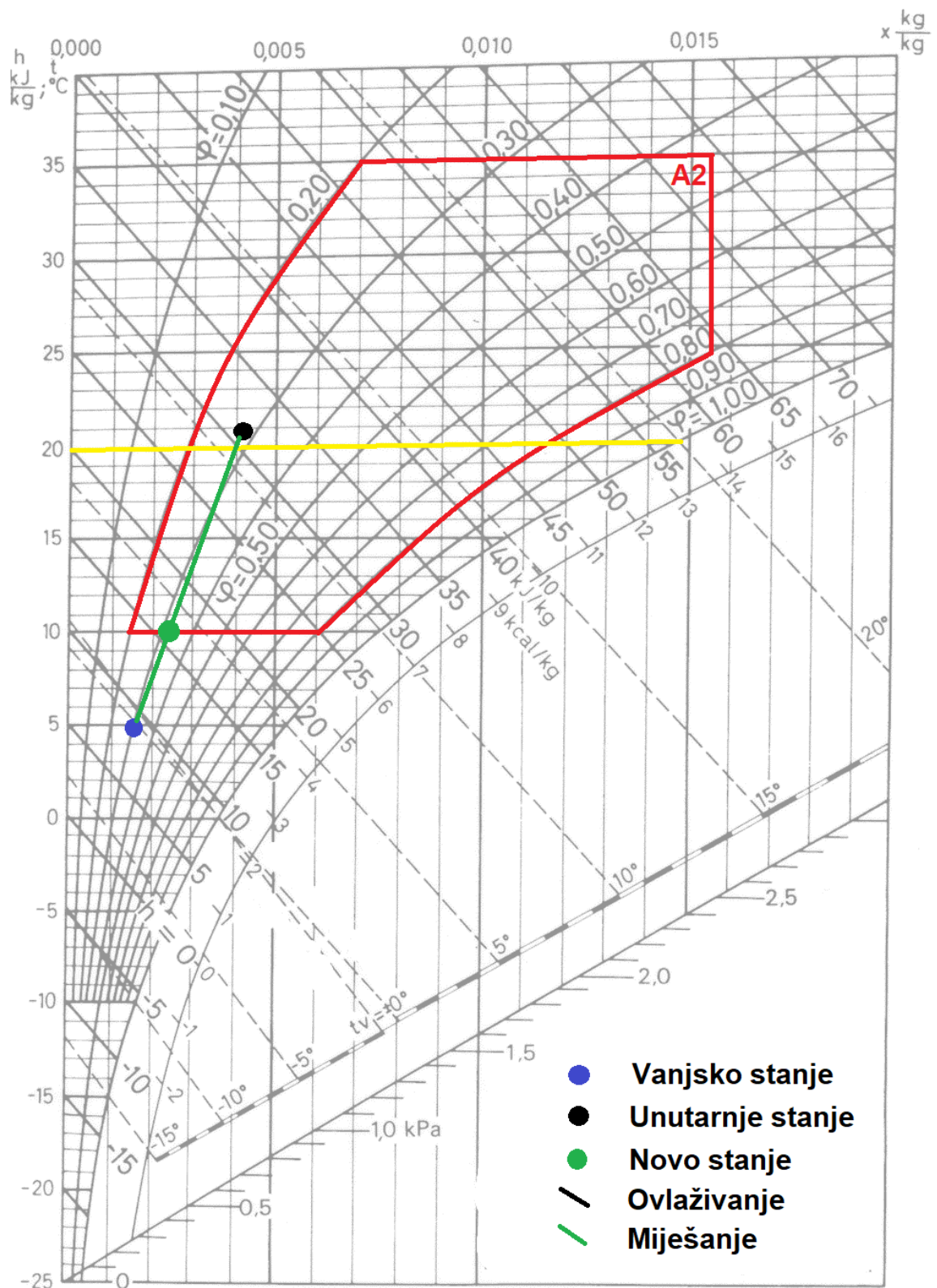
Problem koji se javlja sa stanjima zraka koja nijednom kombinacijom elemenata postojeće klimatizacijske jedinice ne mogu postići uvjete klase češći je ljeti nego zimi, a rješenje za određeni broj sati u godini bila bi instalacija hladnjaka s direktnom ekspanzijom, odnosno odvlaživača struje zraka.

Na kraju svake iteracije u zimskom algoritmu, temperatura dobavnog zraka se povećava za zagrijavanje uslijed rada ventilatora. Time se izračunava dobavno stanje prostoru. Pretpostavka je (od proizvođača) da se nakon prolaska zraka kroz prostor zrak zagrije za 12°C , čime je određeno povratno stanje zraka.

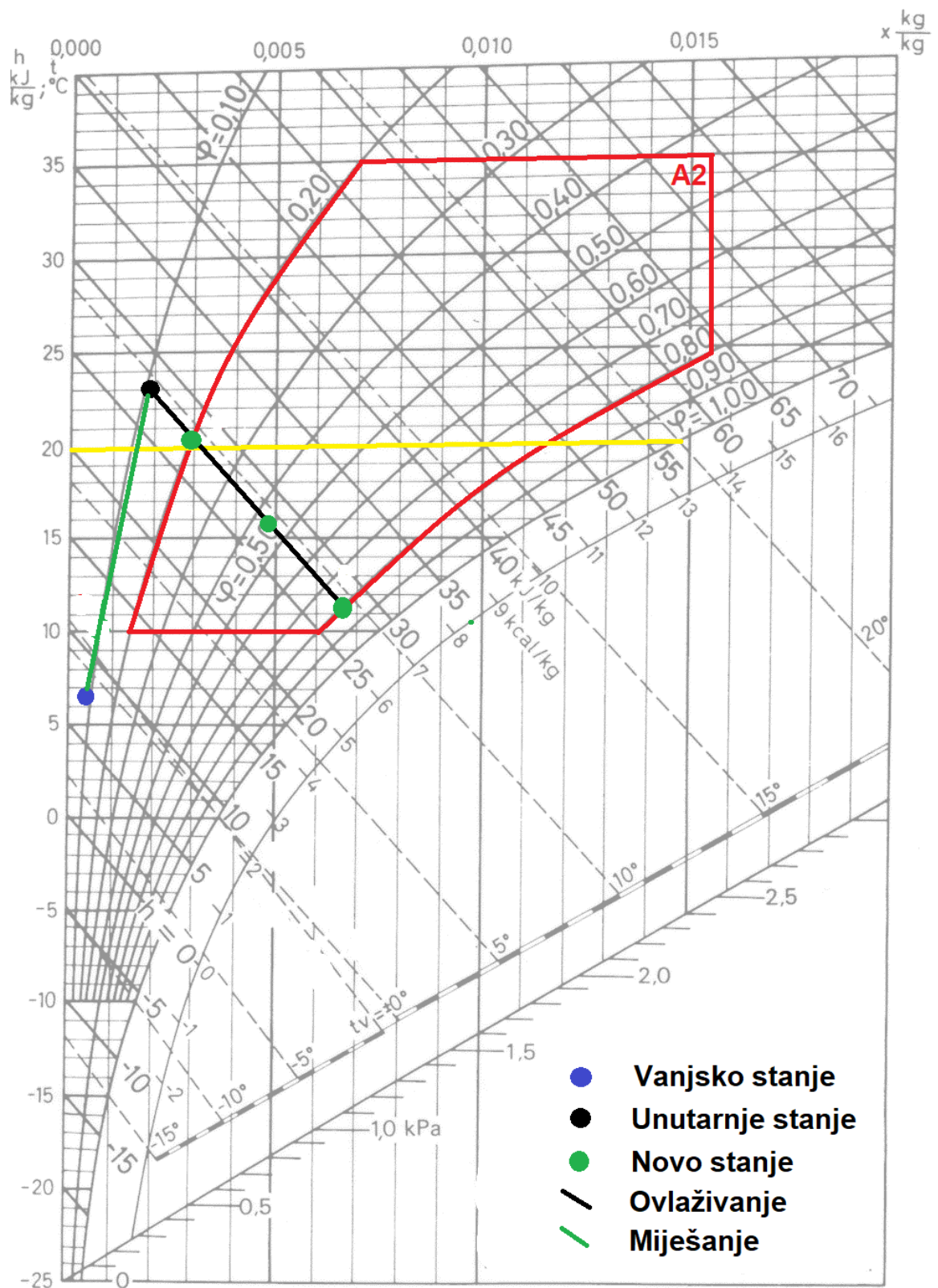
Moguća stanja koja provjerava zimski algoritam dana su Slikama 16., 17., 18. i 19. Slika 16. prikazuje stanja vanjskog i povratnog zraka koja imaju vrijednosti pri kojima mješalište može postići uvjete klase.

Slika 17. opisuje slučaj preniske vlažnosti zimi; na njoj je vidljivo da stanje više entalpijske vrijednosti u tom slučaju prolazi preko adijabatskog hladnjaka. U teoriji bi izlazno stanje moglo biti bilo gdje od minimalne do maksimalne granice relativne vlažnosti (zelene točke), no zbog preporučenog stanja klasa i regulacijskih mehanizama, izlazno stanje varirat će negdje oko sredine klase.

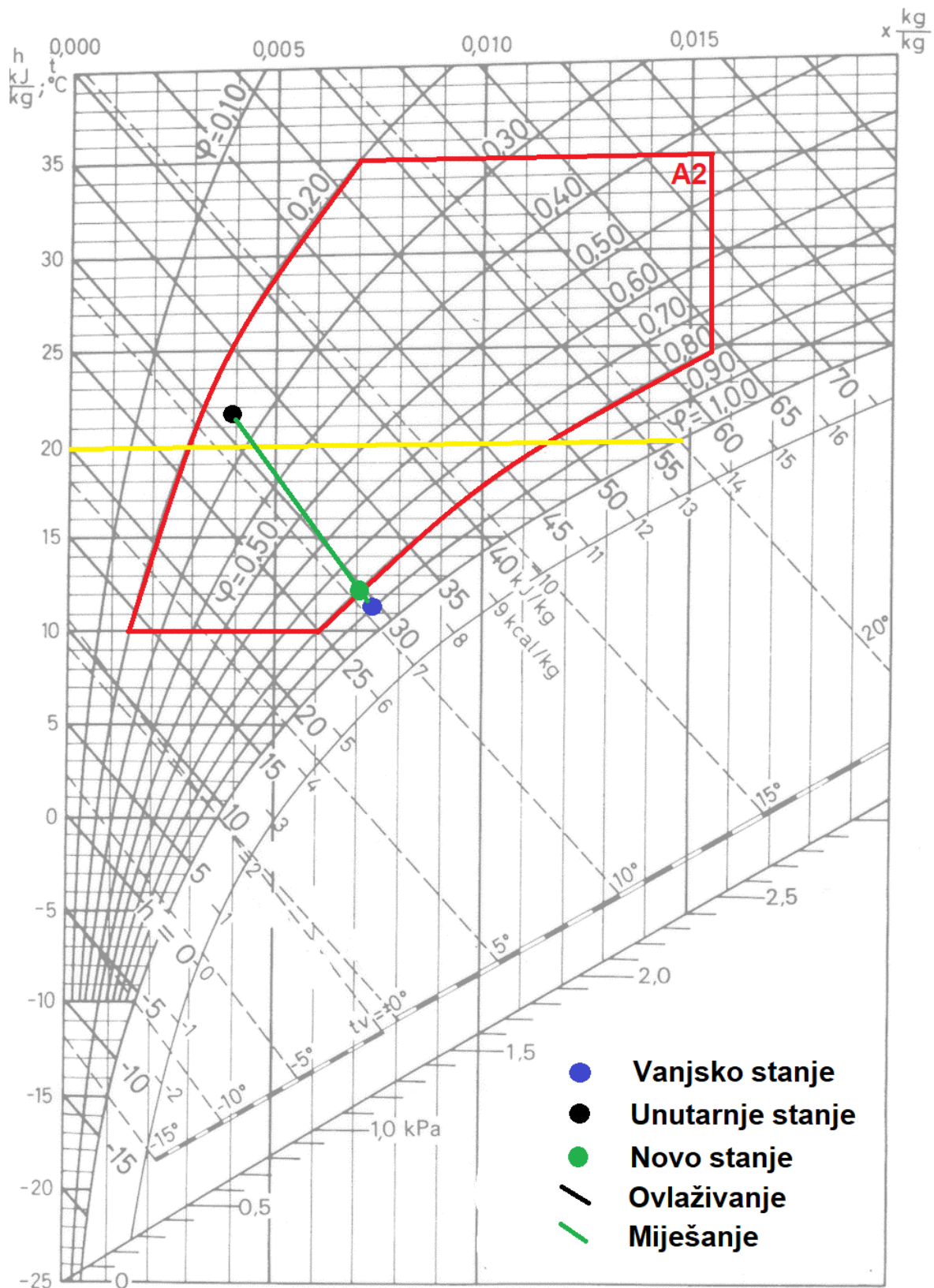
Slika 18. zapravo je slučaj ekvivalentan prikazu na Slici 16., no u algoritmu ima drugačiji zapis, stoga se navodi kao poseban slučaj.



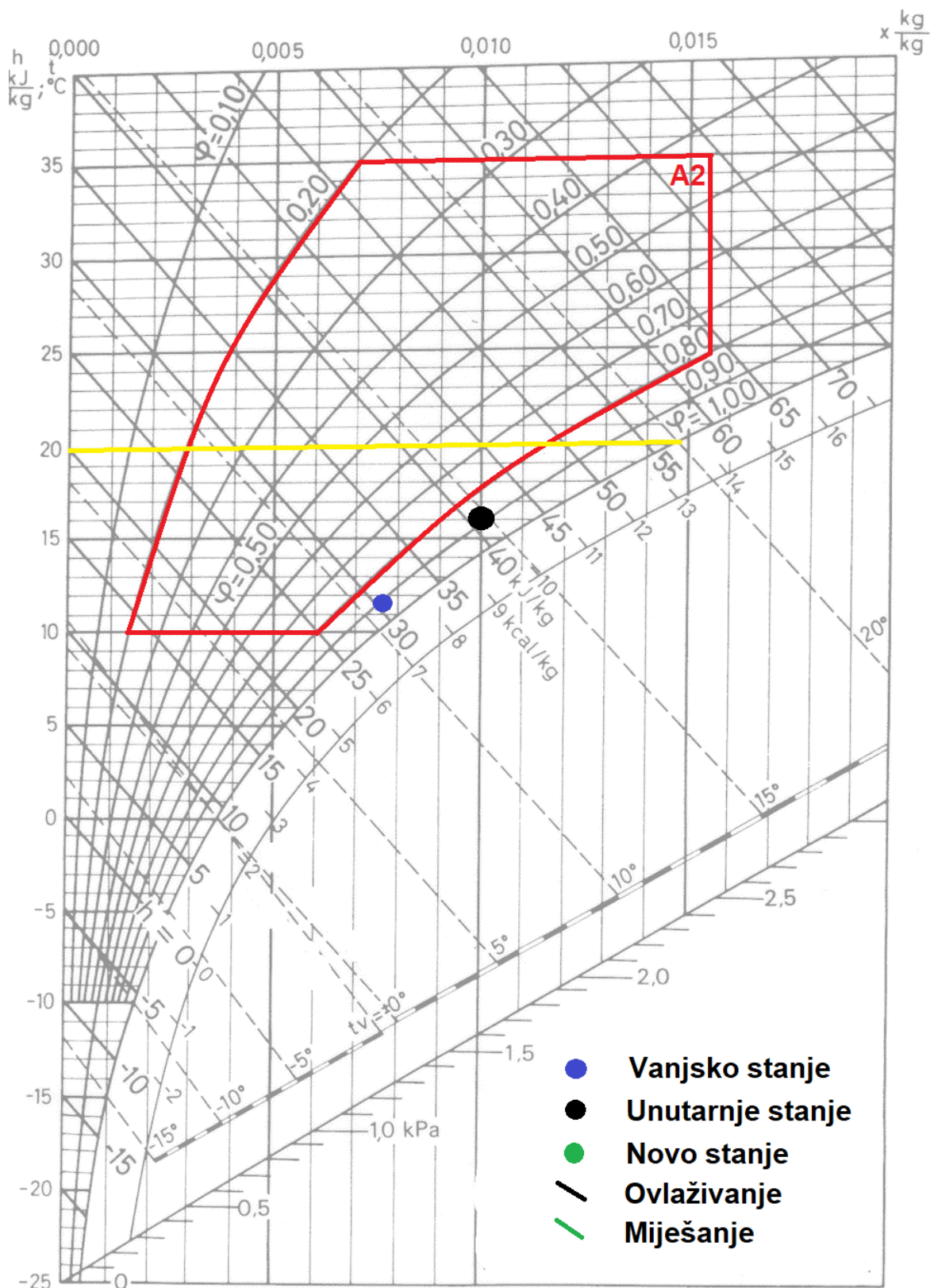
Slika 16. Prikaz slučaja kada mješalište može osigurati uvjete klase



Slika 17. Prikaz slučaja kada mješalište ne može osigurati uvjete klase te se uključuje ovlaživač



Slika 18. Prikaz posebnog slučaja u kojem mješalište osigurava uvjete klase s neregularnim stanjem vanjskog zraka



Slika 19. Prikaz slučaja u kojem niti jedno od stanja ne može osigurati uvjete klase

Slika 19. prikazuje stanja vanjskog i unutarnjeg zraka koja niti jednom kombinacijom postojećih elemenata klimatizacijske jedinice ne mogu ostvariti uvjete klase. Potencijalno rješenje problema je odvlaživanje na hladnjaku s kompresorom (npr. direktna ekspanzija). Ovaj slučaj je zimi praktično nemoguć, no iz predostrožnosti je implementiran u algoritam kako bi se izbjegle moguće pogreške.

Sa svih navedenih prikaza može se zaključiti da se algoritam za zimski režim rada može dodatno poboljšati na način da se mješalište izvede da postiže preporučeno stanje (Klasu R), kad je to moguće, kako je to implementirano u kodu ovlaživača.

4.4.2. Ljetni režim rada

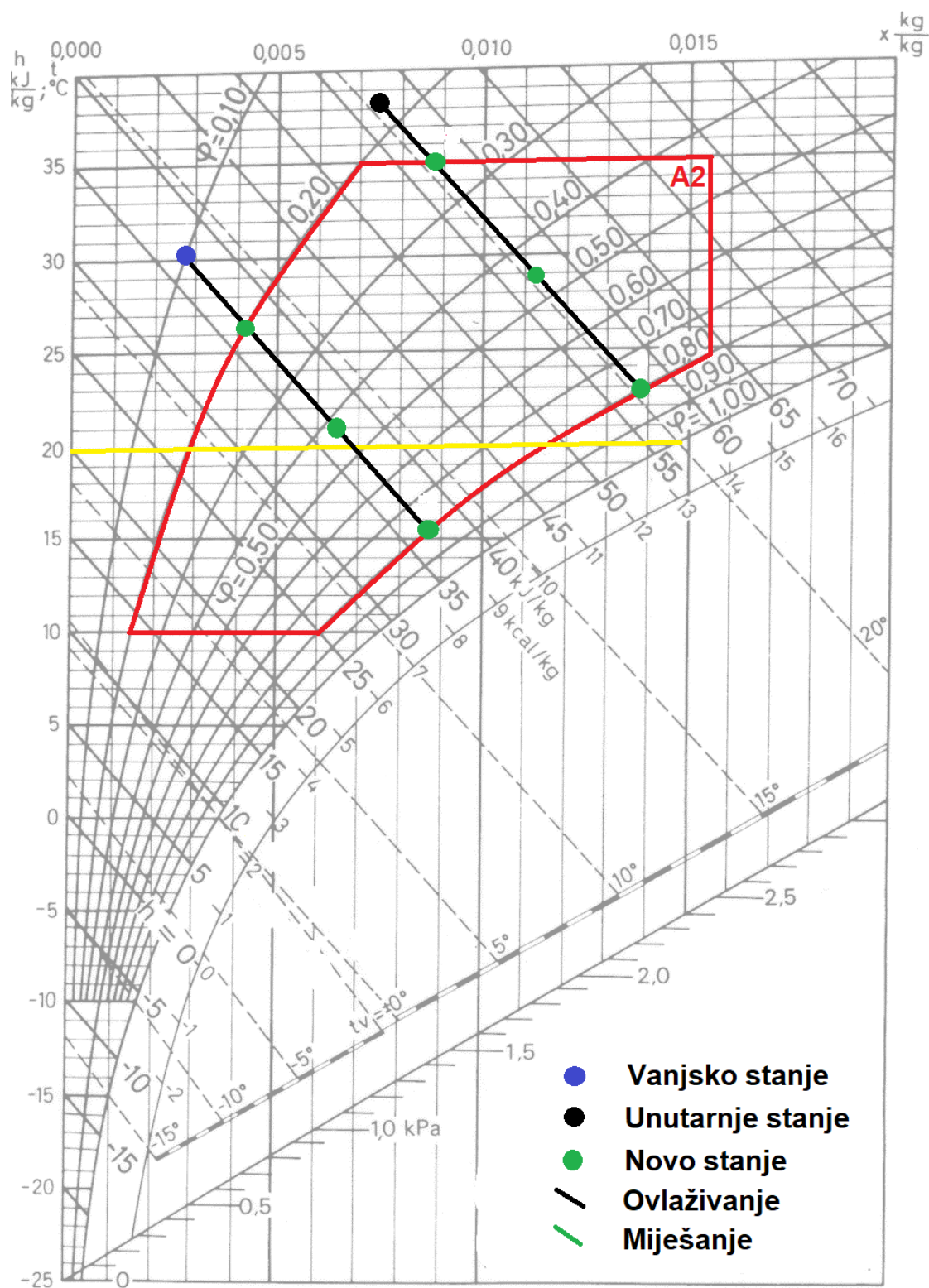
Za razliku od zimske regulacije, ljetni režim rada dolazi u obzir kad vanjska temperatura prijeđe 20°C. Ljeti nema potrebe za radom mješališta, već se sva stanja zraka postižu korištenjem adijabatskog hladnjaka. Isto kao i zimi, postoje slučajevi kada se uvjeti klase ne mogu zadovoljiti predviđenim elementima klimatizacijske jedinice te je potrebno implementirati hladnjak s odvlaživanjem. Također, u odnosu na zimu, takvi su slučajevi česti, pogotovo kod klasa sa strožim uvjetima.

U ljetnom režimu rada adijabatski hladnjak više ne služi samo kao ovlaživač zraka koji se pali u slučaju preniskog sadržaja vlage, već služi kao adijabatski hladnjak za snižavanje temperature zraka koja ulazi u podatkovni centar. Kako bi se postigla što niža temperatura, algoritam je izveden na način da istovremeno provjerava stanja koja se dobiju ovlaživanjem niže i više entalpijske razine (i vanjsko i unutarnje stanje). Kod odabira zadovoljavajućeg načina ovlaživanja, prednost ima stanje niže entalpije jer će ono postići nižu temperaturu na izlazu. No, postoji slučaj gdje stanje niže entalpije ne može zadovoljiti uvjete klase (primjerice, vanjski zrak iznimno visoke vlažnosti), te se u tom slučaju ovlažuje struja zraka više entalpije (povratna struja zraka).

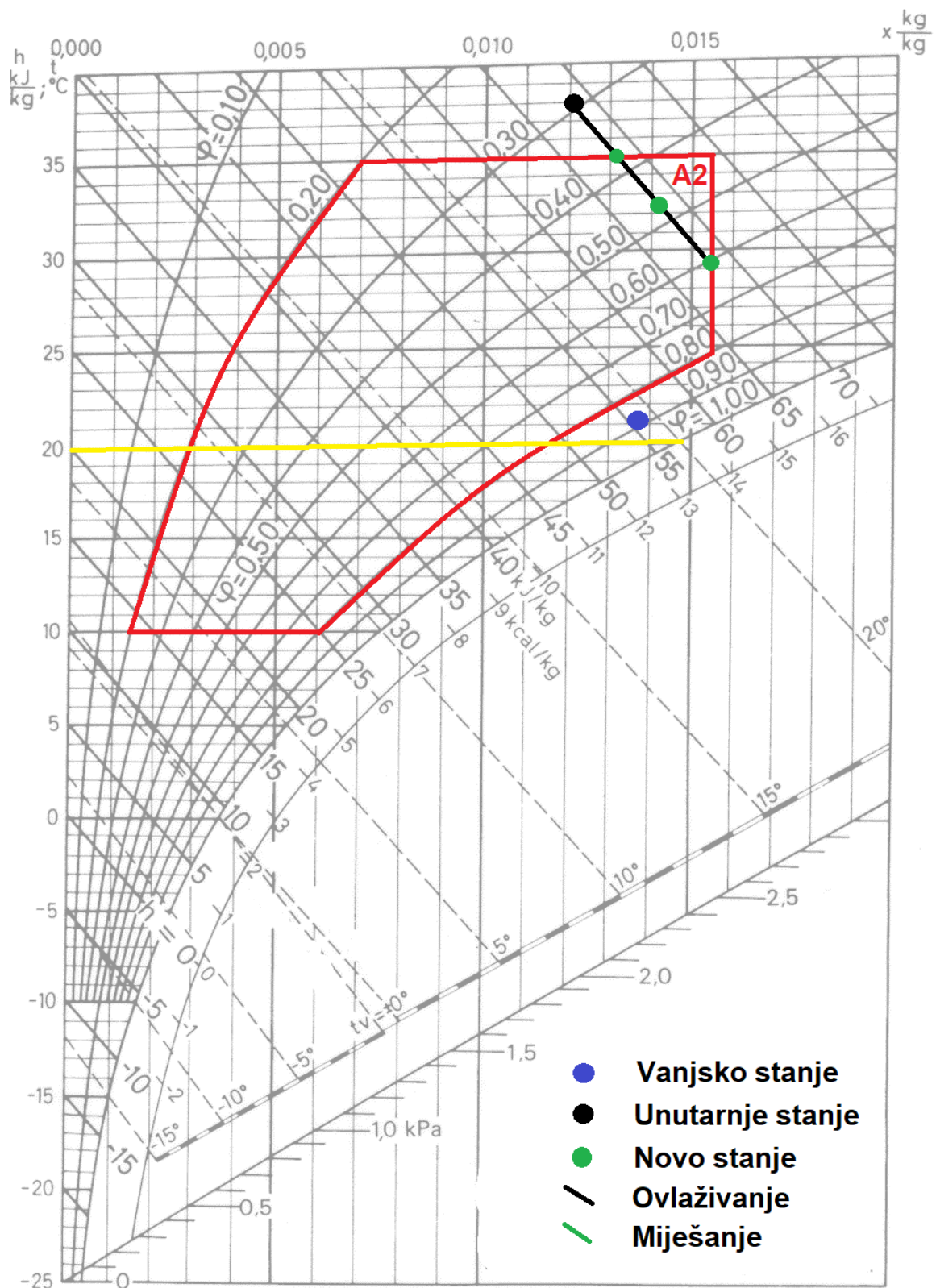
Nakon ovlaživanja, odnosno hlađenja struje zraka, ponovno se dodaje iznos zagrijavanja uslijed rada ventilatora nakon čega struja zraka ulazi u prostor. Nakon zagrijavanja u prostoru, povratna struja zraka je 12°C više temperature od dobavne struje zraka [8].

Mogući slučajevi koji se javljaju u klimatizacijskoj jedinici prikazani su Slikama 20., 21. i 22. Slika 20. prikazuje osnovni dio ljetnog algoritma gdje se pokušavaju ovlažiti oba stanja zraka, no na kraju će stanje manje entalpije (o ovom slučaju vanjsko stanje) proći kroz

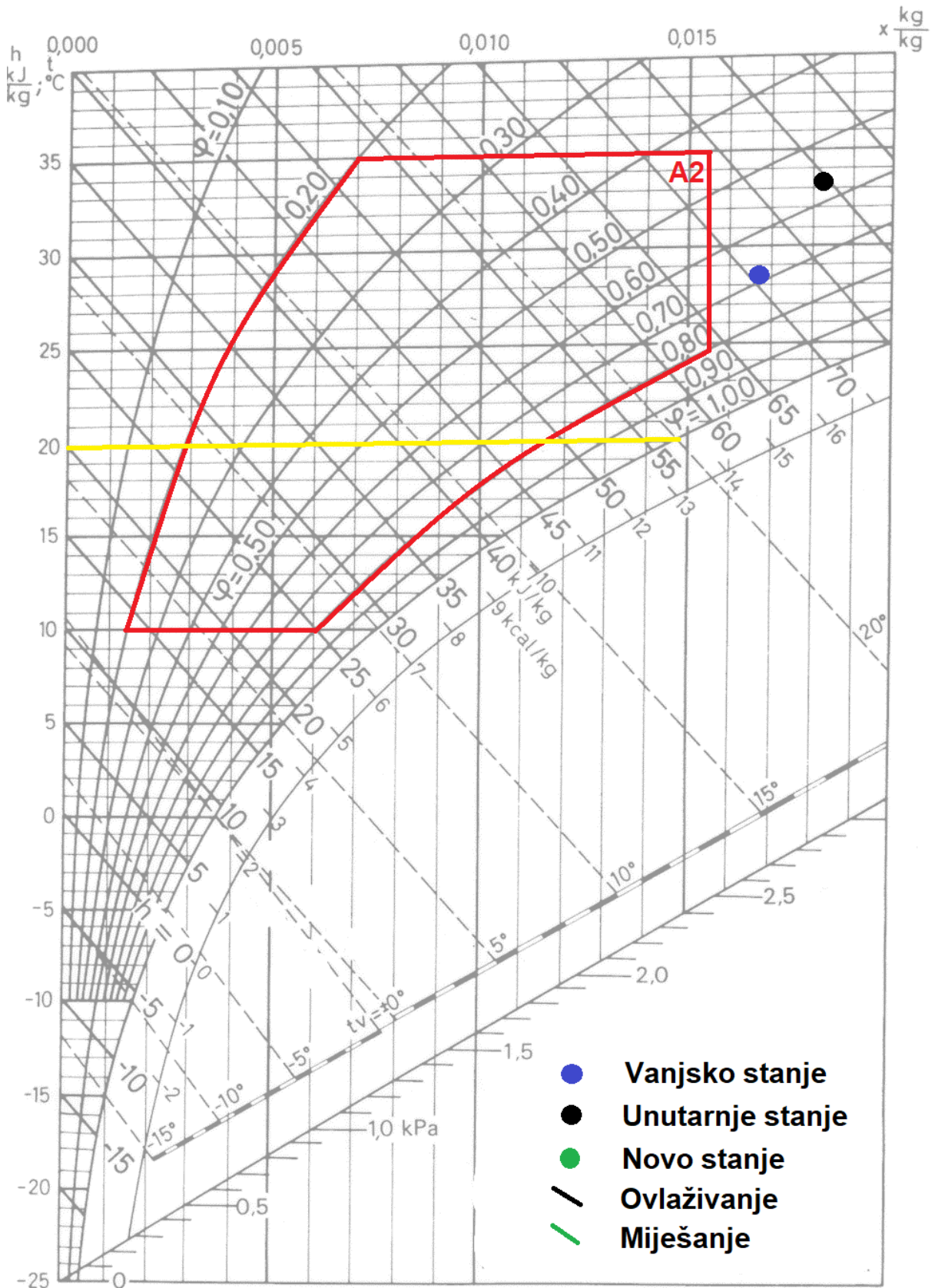
ovlaživač. Ovlaživanje se provodi do sredine klase, zbog istog mehanizma kao i zimi, odnosno regulacijske sklonosti preporučenom području klase.



Slika 20. Prikaz slučaja u kojem obje struje zraka ljeti mogu osigurati uvjete klase ovlaživanjem



Slika 21. Prikaz slučaja u kojem struja manje entalpijske vrijednosti nije u mogućnosti osigurati uvjete klase



Slika 22. Prikaz slučaja u kojem nijedna od struja zraka ljeti nije u mogućnosti osigurati uvjete klase

Slika 21. prikazuje slučaj u kojem stanje s nižom entalpijom (vanjski zrak) ne može osigurati uvjete zadane klasom, stoga se ovlažuje struja više entalpije (u ovom slučaju unutarnje stanje, odnosno povratni zrak). Kao i na Slici 20., ovlaživanje se provodi do srednje vrijednosti relativne vlažnosti.

Slika 22. je ekstremno stanje u kojem niti jedna od struja zraka nije u mogućnosti zadovoljiti klasu uz pomoć predviđenih komponenti klimatizacijske jedinice. Ljeti je ovo stanje relativno često te se učestalije pojavljuje na klasama strožih uvjeta (R, A1 i A2). S obzirom da za neometani rad podatkovnog centra jedno od ova dva stanja mora ući kao dobavni zrak, u ovom slučaju odabire se stanje niže temperature. Moguća izmjena ovog dijela algoritma je da se struja niže entalpije pokuša ovlažiti na temperaturu nižu od druge struje, no takvih slučajeva je malo, stoga takav algoritam nije implementiran.

Na temelju opisanog računalnog algoritma simuliran je rad sustava hlađenja podatkovnog centra za različite geografske lokacije i klase prostora. Rezultati simulacija prikazani su u sljedećem poglavlju.

5. REZULTATI

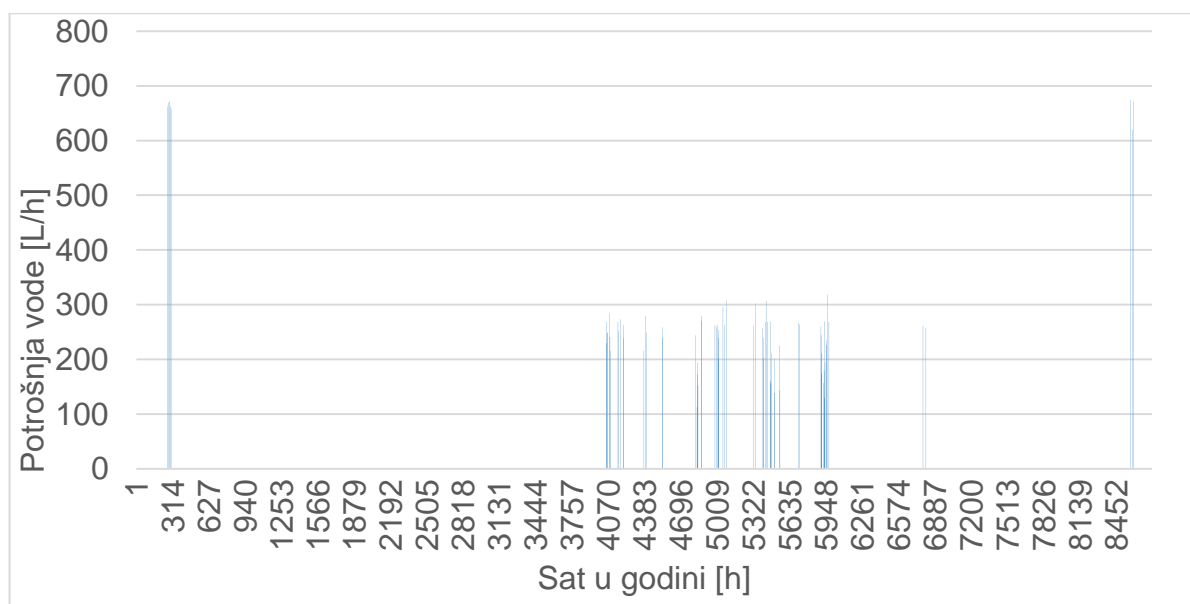
Algoritam je usavršen na meteorološkim podacima za Zagreb uz podatke o klimatizacijskoj jedinici i načinima rada u dogovoru s tvrtkom *Vertiv Croatia* d.o.o. Nakon što je tvrtkom s *Vertiv* potvrđeno da podaci za Zagreb pokazuju smislene rezultate, provedena je simulacija za Frankfurt, Istanbul, Madrid i Stockholm, zbog različitih klima na navedenim lokacijama, a što bitno može utjecati na potrošnju vode za hlađenje.

Detaljni rezultati prikazani su u nastavku za Zagreb, dok su za ostale gradove prikazani samo rezultati koji su najbitniji za primjenu algoritma u praksi.

5.1. Rezultati za Zagreb

Klasa A2 je najčešće tražena, odnosno osnovna klasa koja se odabire kao nivo kvalitete hlađenja podatkovnog centra. Iz tog razloga je klasa A2 odabrana i za primjere u prijašnjim poglavljima te za prikaz i objašnjenje rezultata u ovom poglavlju.

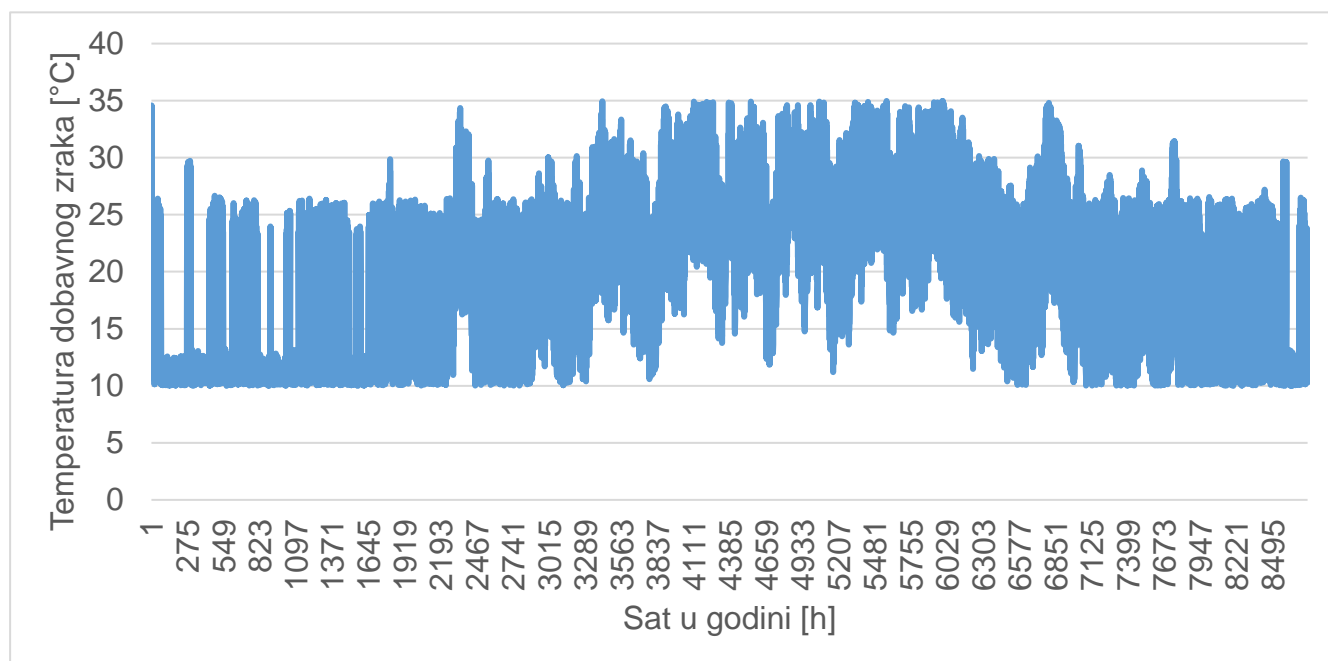
Prvi od mogućih prikaza rezultata jest potrošnja vode za svaki sat kroz godinu dana (Slika 23). Taj prikaz je nepraktičan zbog svoje nepreglednosti te može znatno varirati s promjenom klase. Također, ne daje uvid u ponašanje sustava vezano uz stanje zraka, ali može se koristiti za identifikaciju sati u kojima je se koristi adijabatski hladnjak.



Slika 23. Prikaz potrošnje vode po satima u godini na primjeru klase A2 za Zagreb

Primjerice, na dijagramu se vidi kako je za klasu A2 najčešći period korištenja adijabatskog hlađenja ljeti. Posljedica toga su više temperature i veća vjerojatnost da stanje zraka izađe izvan područja klase, dok je zimski period široko pokriven klasom te se ovlažuje samo u slučaju nužde. Također je vidljivo da je maksimalna potrošnja prisutna zimi, što je očekivani ishod s obzirom da u zimskom periodu razlika sadržaja vlaga koja se mora opskrbiti za ovlaživanje zapravo iznosi više zbog veće udaljenosti točke povratnog zraka od središta klase no što je to slučaj ljeti.

Slika 24. prikazuje dobavne temperature u podatkovnom centru, a na isti način je moguće prikazati i sadržaj vlage. Ovakvi prikazi zasebno nisu posebno korisni osim za brzo uočavanje situacije kada određeni sat odstupa od prosjeka i/ili praćenje maksimalne temperature dobavnog zraka.



Slika 24. Prikaz dobavnih temperatura po satima u godini na primjeru klase A2 za Zagreb

Na slici 24. se može uočiti kako su niske temperature ograničene na 10°C, što je zapravo uvjet najniže temperature za klasu, dok maksimalna temperatura ne prelazi 35°C, a koja je također granica klase. Iz rezultata se može zaključiti kako sustav kroz cijelu godinu održava uvjete koji zadovoljavaju prikazanu klasu. Statistički prikaz satnih rezultata dan je u Tablici 2.

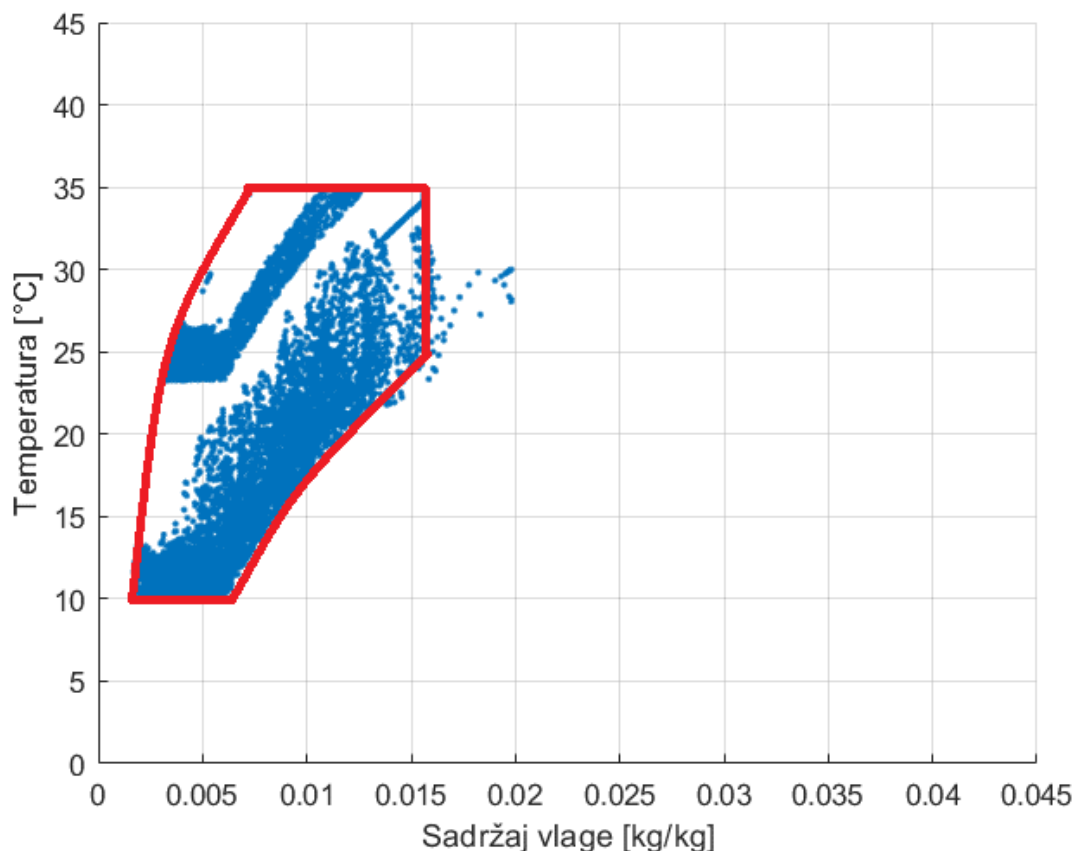
Tablica 2. Statistički prikaz zadovoljenja uvjeta klase na primjeru klase A2 za Zagreb

| Klasa – Grad | Optimalno | Zadovoljava | Ne zadovoljava |
|--------------|-----------|-------------|----------------|
| A2 - Zagreb | 0.75% | 96.61% | 3.39% |

Iz tablice je vidljivo kako samo 3.4% vremena u godini sustav nije u mogućnosti zadovoljiti uvjete klase, što je posljedica visokih vlažnosti u ljetnom periodu, a što će biti detaljnije prikazano kasnije u radu. Iz rezultata je također vidljivo kao je preporučeno područje klase vrlo rijetko zadovoljeno. Takav ishod je posljedica regulacije koja nije fokusirana na postizanje preporučenog područja po svim parametrima. Primjerice, regulacija je za prioritet imala postizanje vlažnosti, a ne temperature. Moguće poboljšanje bi uslijedilo uvođenjem dodatnih petlji za bolju regulaciju mješališta te petlje za provjeru u slučaju da je neka struja zraka povoljnija za ostvarivanje preporučenog područja (primjerice, uključivanje mješališta u ljetnom periodu).

Najbitniji rezultati prikazani su Slikom 26. na kojoj su prikazane sve točke u godini u h-x formatu. Iz praktičnih razloga, formalna mreža dijagrama nije ucrtana, ali se ponašanje može pratiti s poznatim granicama klase.

Prva stvar koja se može zamijetiti na Slici 26. je da se donji dio dijagrama preslikao na njegov vrh. To je posljedica činjenice da zrak vrlo niske temperature, nakon prolaska kroz prostor i zagrijavanja za 12°C još uvijek zadovoljava granice klase, pa se sve točke samo transliraju po istoj vlazi prema gore za danu promjenu temperature. Osim navedenog preslikavanja, iznimno čisto se vide granice klase u zimskom periodu kada je veliki broj točaka gusto grupiran. Takvo ponašanje zbog širenja klase nestaje u ljetnom periodu. Na Slici 26. vidljivo je kako skoro sve točke zadovoljavaju klasu, što potvrđuju i rezultati u Tablici 2. Također se na prikazu može zamijetiti da se točke koje ispadaju izvan granica klase nalaze u ljetnom periodu, na visokim sadržajima vlage. To su točke koje, kako je prije objašnjeno, zbog nedostatka hladnjaka s direktnom ekspanzijom u klimatizacijskoj jedinici nije moguće popraviti.



Slika 25. Prikaz satnih stanja zraka u T-x dijagramu na primjeru klase A2 s ucrtanim granicama klase za Zagreb

Naposljetku, najbitniji rezultat simulacija je ukupna potrošnja vode te maksimalna potrošnja vode za dimenzioniranje pumpe. U slučaju klase A2 za Zagreb ukupna potrošnja iznosi 23597 L godišnje, dok je maksimalna potrošnja 674,5 L/h (Slika 23). Ukupna potrošnja je manja od očekivane, ponovo, zbog nedostatka regulacije koja bi pospješila postizanje preporučenog područja klase. Ta razlika može se zamijetiti kod smanjivanja područja klase, gdje je algoritam zapravo prisiljen raditi u područjima bliže preporučenom rasponu klase, odnosno, u slučaju klase R direktno u preporučenom rasponu. U sljedećem poglavlju prikazani su rezultati za Zagreb na primjeru svih analiziranih klasa.

5.1.1. Usporedba rezultata za različite klase

Rezultati simulacija za Zagreb za sve klase prikazani su tablicom 3. koja prikazuje ukupnu i maksimalnu potrošnju vode te postotke zadovoljenja klase. Bitno je napomenuti kako

stupac „Optimalni“ i stupac „Zadovoljava“ zajedno čine sve točke koje se nalaze unutar klase, zbog načina na koji je algoritam za provjeru optimuma izveden.

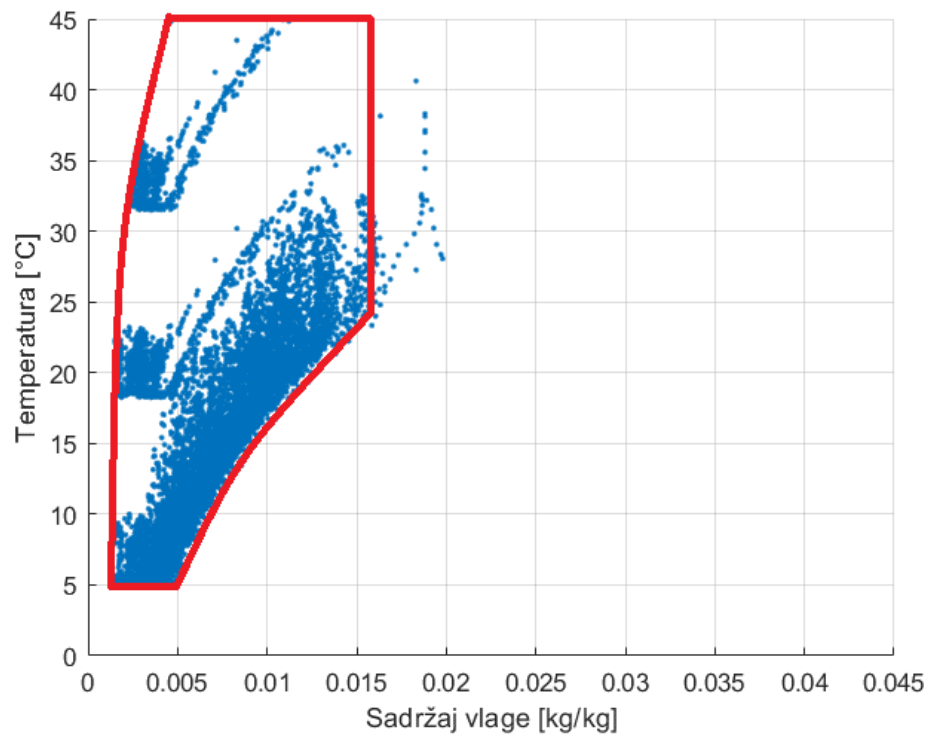
Tablica 3. Rezultati simulacija za Zagreb za sve klase

| Klasa | Godišnja potrošnja (L) | Maksimalna potrošnja (L/h) | Optimalno (%) | Zadovoljava (%) | Ne zadovoljava (%) |
|-------|------------------------|----------------------------|---------------|-----------------|--------------------|
| R | 1311586 | 1020 | 9.70 | 73.39 | 16.91 |
| A1 | 73250 | 790 | 0.84 | 88.45 | 10.71 |
| A2 | 23597 | 674 | 0.75 | 95.86 | 3.39 |
| A3 | 15346 | 1139 | 1.45 | 97.45 | 1.10 |
| A4 | 5043 | 1005 | 1.04 | 97.89 | 1.07 |

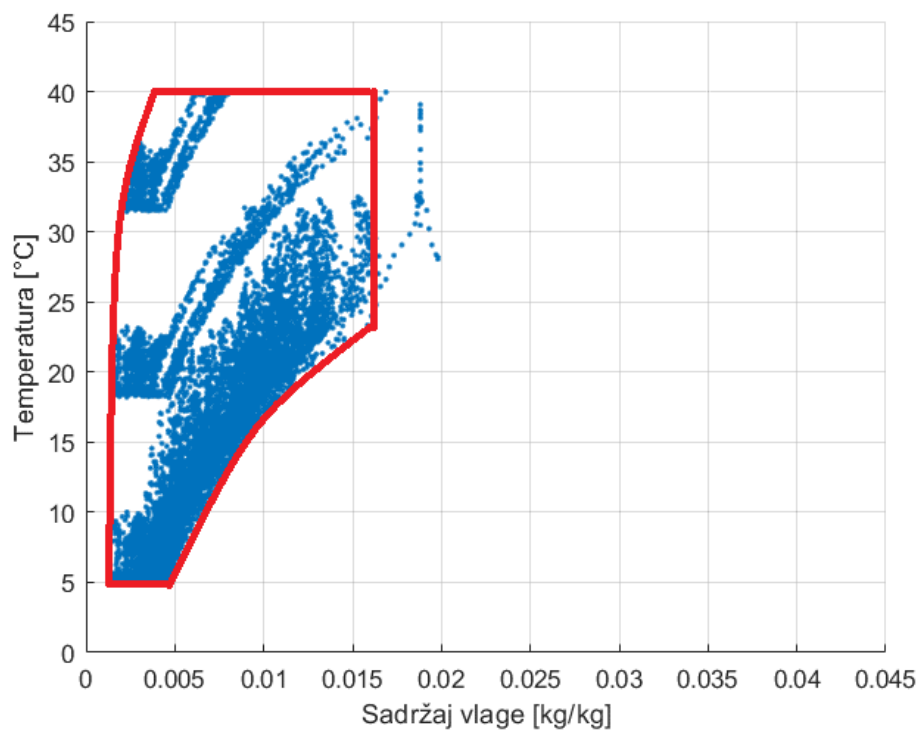
Važno je napomenuti da godišnja potrošnja vode raste sa suženjem klase. Primjerice, klasa R, kao najstroža klasa ima daleko najveću potrošnju vode u odnosu na ostale klase sa širim područjem uvjeta. Međutim, također je vidljivo da je optimum za klasu R postignut u većem postotku, što je posljedica prethodno spomenutog mehanizma regulacije.

Rezultati za maksimalnu potrošnju sugeriraju da ne postoji nikakav poseban trend koji bi omogućio predviđanje maksimalne potrošnje. Ova činjenica ukazuje na potrebu za simulacijama ovoga tipa, odnosno, da nije moguće ispravno dimenzionirati pumpu na ovlaživaču bez poznavanja dinamičkog ponašanja sustava.

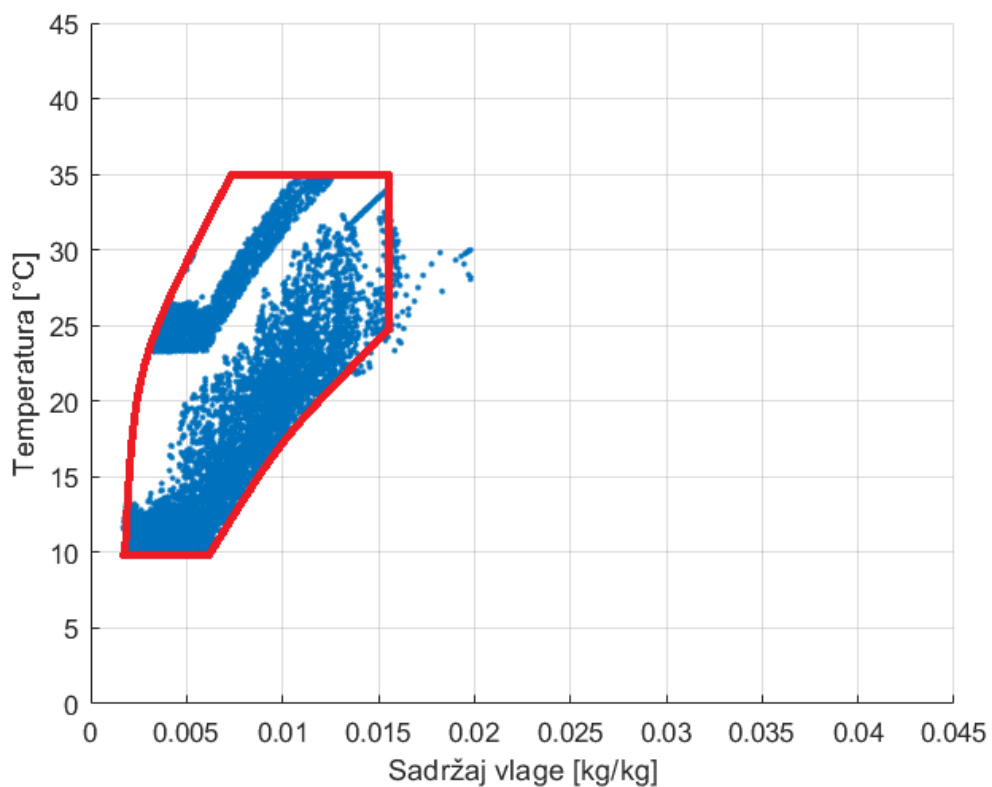
Također je bitno primijetiti da za klase R i A1 postotak točaka izvan klase prelazi 10%, stoga se u tom slučaju preporučuje ugradnja hladnjaka s direktnom ekspanzijom u klimatizacijsku jedinicu (10% je prekretni parametar za kupce sličnih klimatizacijskih jedinica) [8]. U nastavku su prikazani T-x dijagrami stanja zraka za sve klase. Za lakše praćenje promjena pri zamjeni klase, svi su dijagrami svedeni na isti koordinatni sustav, tako Slike 27., 28., 29., 30. i 31. daju prikaze za pojedinu klasu, poredane od najblaže do najstrože klase.



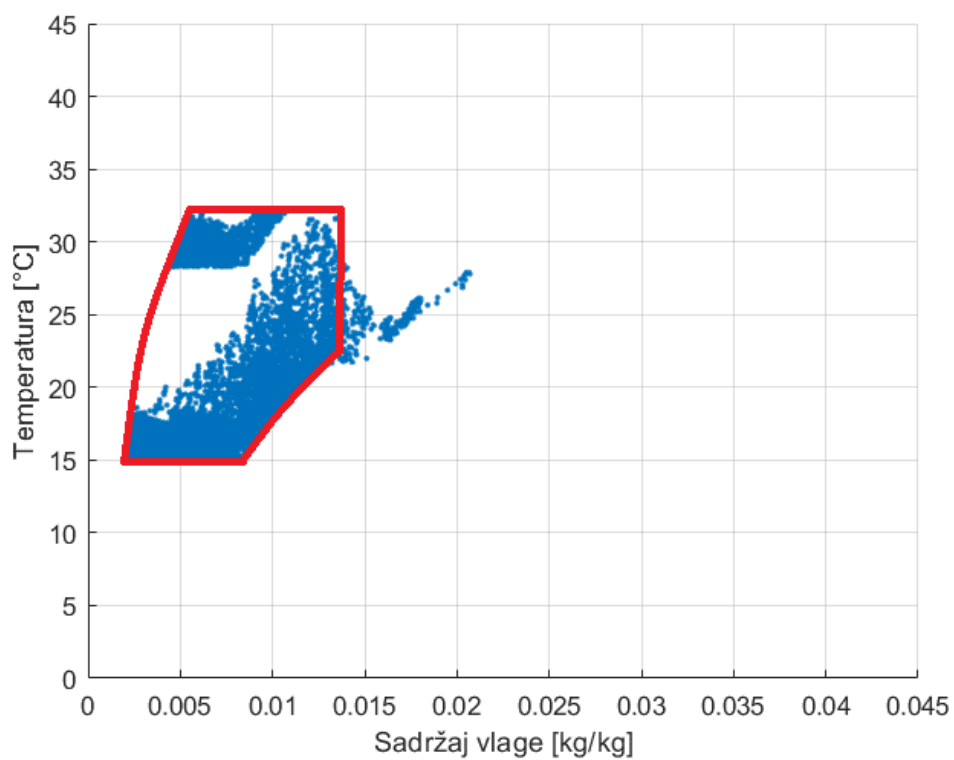
Slika 26. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A4 za Zagreb



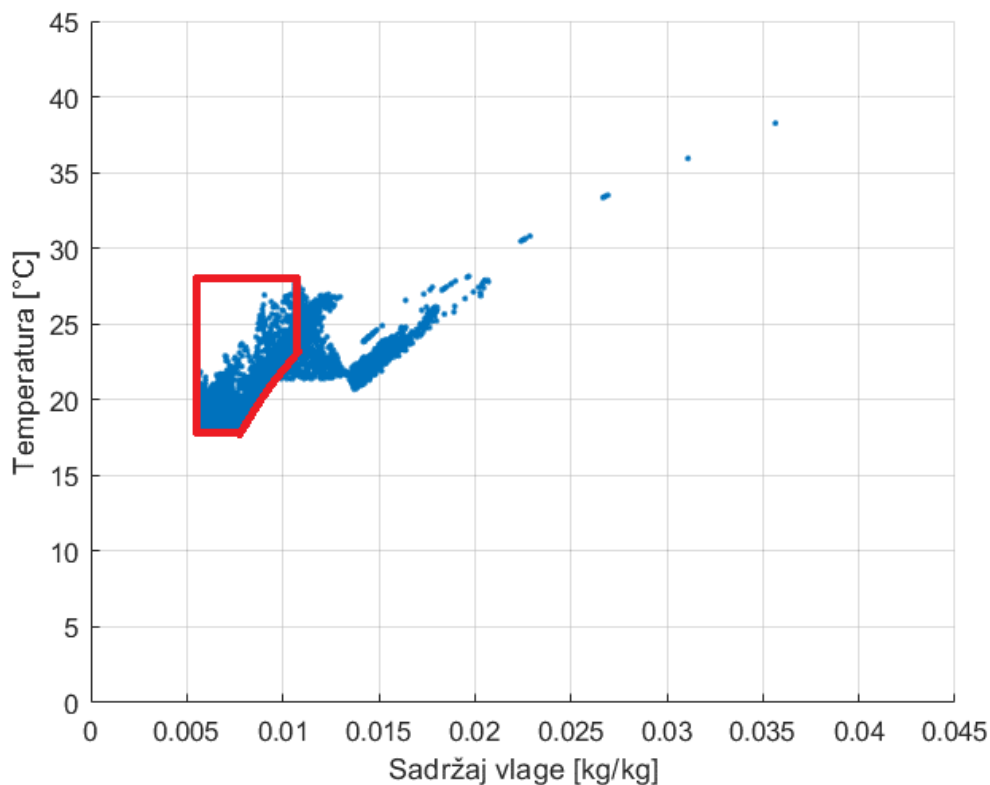
Slika 27. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A3 za Zagreb



Slika 28. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A2 za Zagreb



Slika 29. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A1 za Zagreb



Slika 30. Satna stanja dobavnog zraka za klasu R za Zagreb

Slike zorno prikazuju smanjenje područja zahtjeva klase. Također se može vidjeti drastično smanjenje za klasu R u odnosu na ostale klase. Moguće je primijetiti kako klase sa širim granicama temperatura, primjerice A4 u odnosu na užu klasu A1, može translirati točke 3 puta, u odnosu na 2 koliko može klasa A1, dok klasa R ne može niti u jednom satu u godini ponovno iskoristiti zrak iz prostorije za recirkulaciju.

Na slici 31. je vidljivo koliko usko područje dopušta klasa R, zbog čega dolazi do velikog povećanja potrošnje vode u odnosu na druge klase, ali i velikog broja točaka koje ne mogu zadovoljiti uvjete klase (16% prema Tablici 3.). Također, vidljiva je pojava iznimno visokih temperatura, do 38°C, što iznimno puno premašuje granicu klase. Stoga se potvrđuje nužnost ugradnje hladnjaka s direktnom ekspanzijom za sustav s ovako strogim zahtjevima.

5.2. Rezultati za ostale gradove

Kako bi se ispitalo ponašanje sustava u uvjetima drugačijih klima, simulacija je provedena za prije navedene gradove, koji su također odabrani u suradnji s *Vertiv Croatia* d.o.o.

Za svaki od gradova prikazati će se sumarni rezultati i dijagrami raspodjele stanja, bez opširnih opisa, s obzirom da se rezultati svode na isti princip kao što je pokazano za Zagreb. Kako bi se smanjio broj grafova za prikazivanje, prikazati će se dijagrami za klase A4, A2 i R.

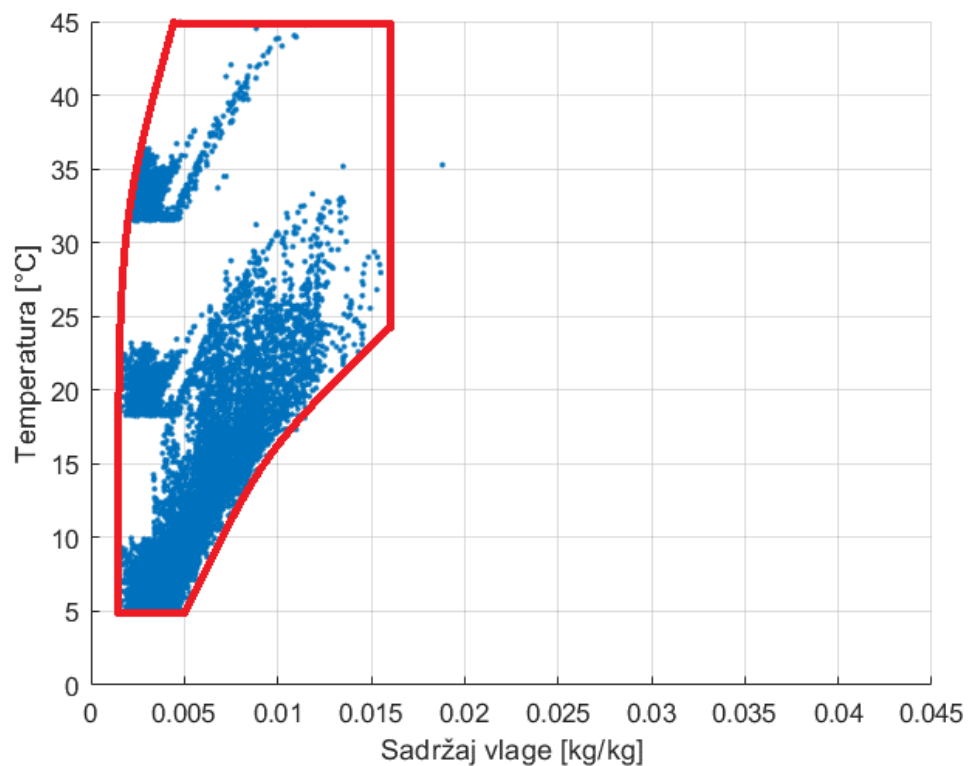
5.2.1. Frankfurt

U odnosu na Zagreb, prema Tablici 4., Frankfurt pokazuje veću potrošnju za klasu R, no manje potrošnje za ostale klase. Također, sve klase zadovoljavaju uvjet da maksimalno 10% radnog vremena provedu izvan uvjeta, što implicira da nema potrebe za ugradnjom hladnjaka s direktnom ekspanzijom u klimatizacijsku jedinicu te će dani sustav s mješalištem i adijabatskim hladnjakom sasvim sigurno osigurati potrebne uvjete rada.

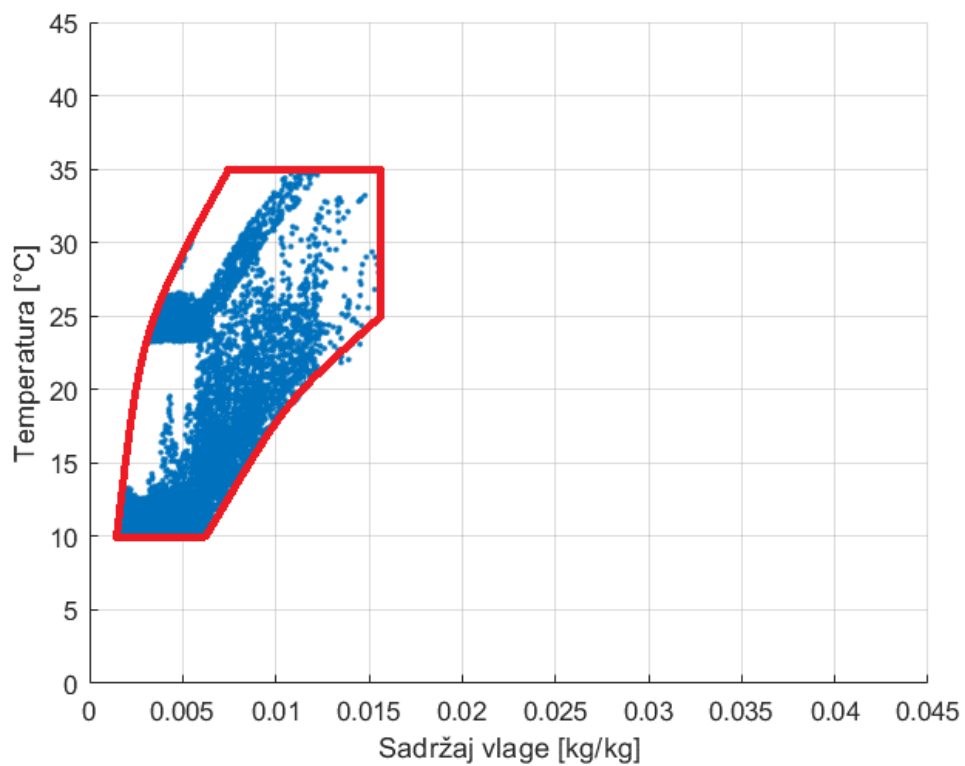
U nastavku su prikazani dijagrami za klase A4, A2 i R za zorni prikaz stanja dobavnog zraka na Slikama 33., 34. i 35.

Tablica 4. Sumarni prikaz rezultata za Frankfurt

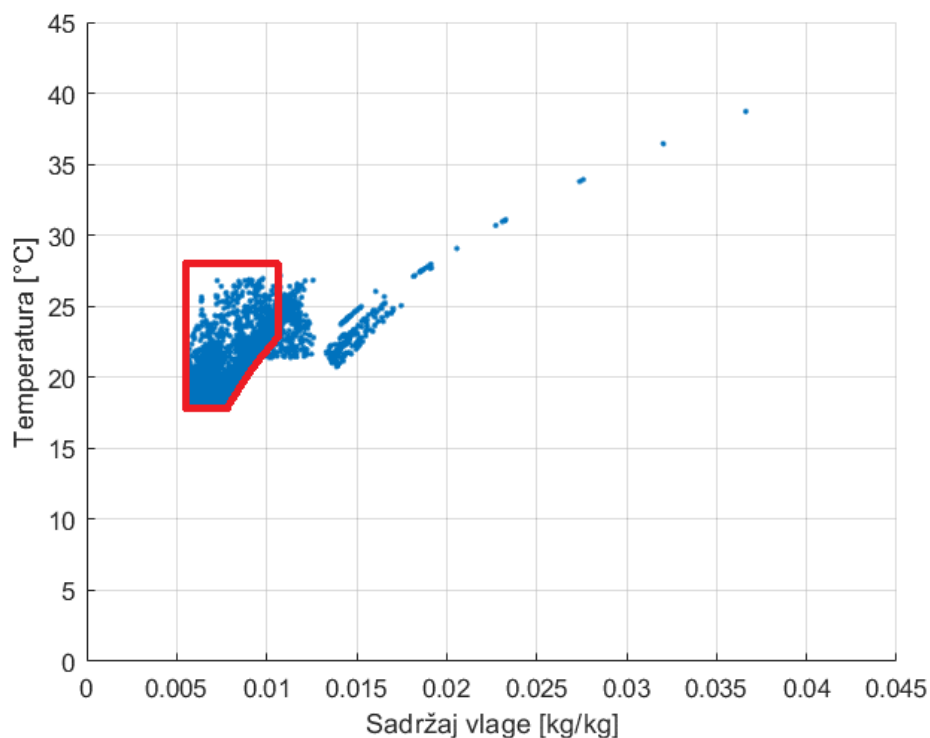
| Klasa | Godišnja potrošnja (L) | Maksimalna potrošnja (L/h) | Optimalno (%) | Zadovoljava klasu (%) | Ne zadovoljava (%) |
|-------|------------------------|----------------------------|---------------|-----------------------|--------------------|
| R | 1495045 | 964 | 12.09 | 81.51 | 6.40 |
| A1 | 47381 | 810 | 1.38 | 93.78 | 4.84 |
| A2 | 8684 | 679 | 1.26 | 95.38 | 3.37 |
| A3 | 5663 | 1166 | 2.13 | 96.68 | 1.19 |
| A4 | 2898 | 1015 | 1.78 | 97.00 | 1.22 |



Slika 31. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A4 za Frankfurt



Slika 32. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A2 za Frankfurt



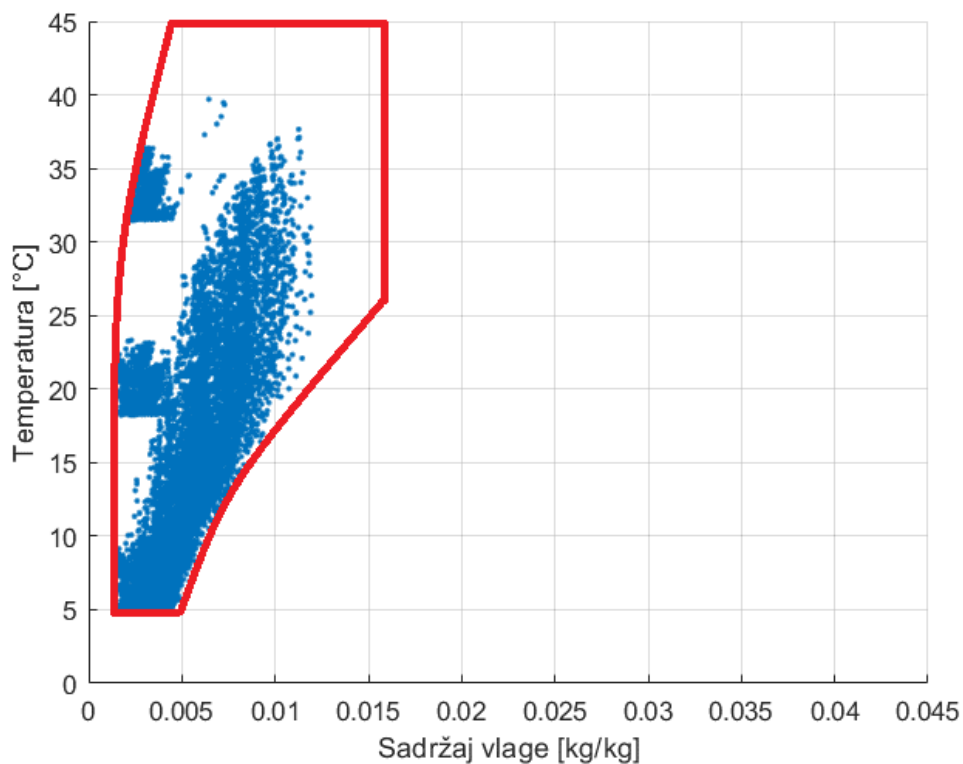
Slika 33. Satna stanja dobavnog zraka za klasu R za Frankfurt

5.2.2. Istanbul

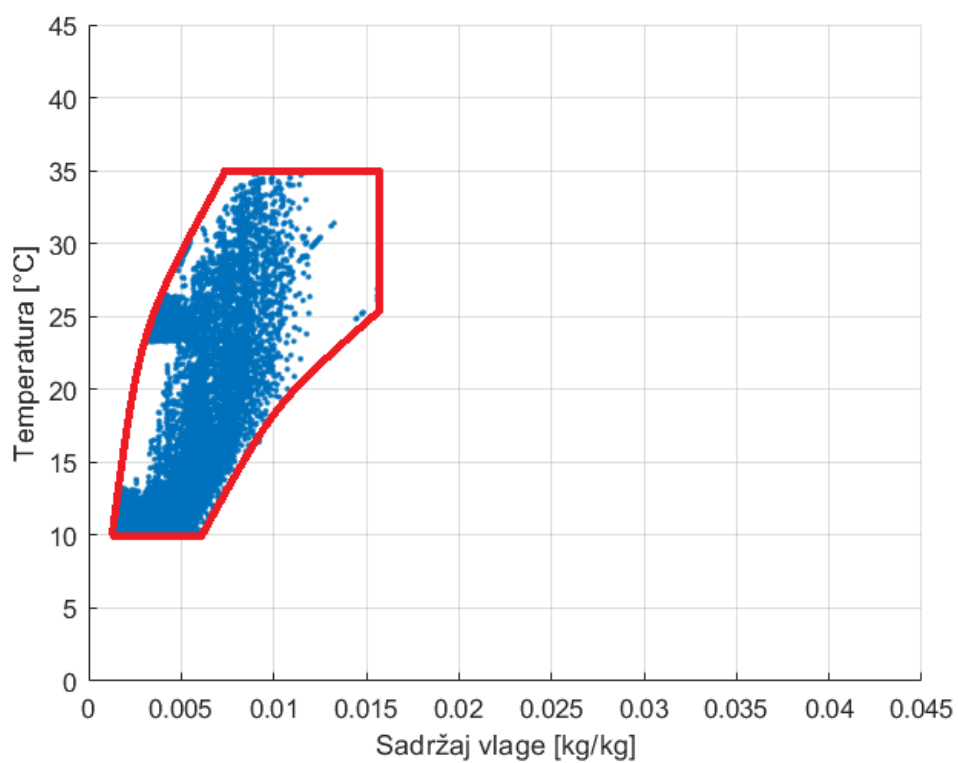
Prema Tablici 5., Istanbul pokazuje povećanje potrošnje u klasama užih granica, primarno R i A1, gdje potrošnja za klasu R postaje iznimno visoka. Dobra strana je da, kao i Frankfurt, Istanbul ne zahtijeva korištenje hladnjaka s direktnom ekspanzijom u klimatizacijskoj jedinici, iz razloga što klimatski uvjeti za ovu lokaciju omogućavaju lako postizanje uvjeta klasa. Prema prethodno prikazanim rezultatima, Istanbul također pokazuje maksimalne potrošnje jednakog reda veličine kroz sve klase. U nastavku su prikazani dijagrami za klase A4, A2 i R za zorni prikaz stanja dobavnog zraka na Slikama 36., 37. i 38.

Tablica 5. Sumarni prikaz rezultata za Istanbul

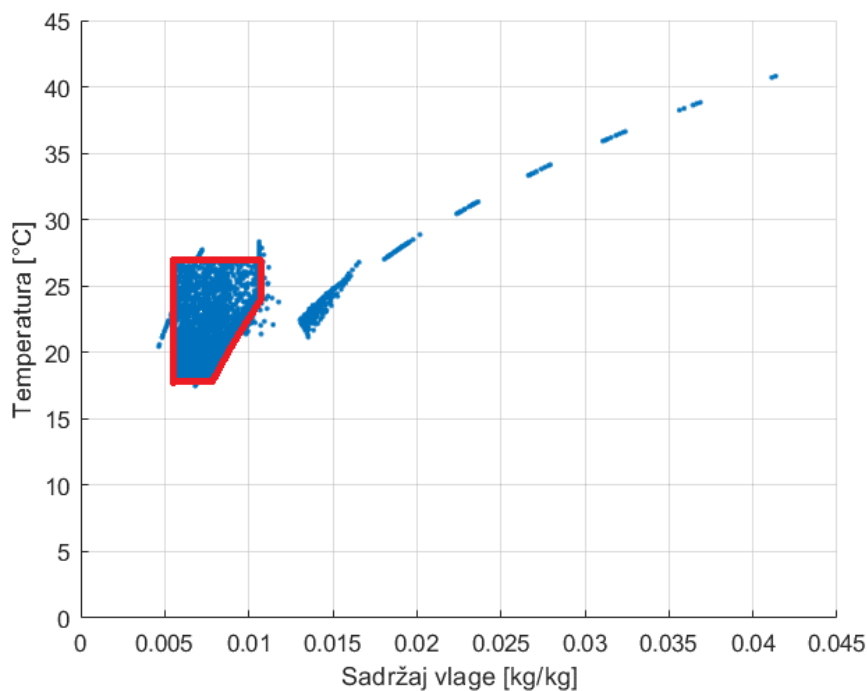
| Klasa | Godišnja potrošnja (L) | Maksimalna potrošnja (L/h) | Optimalno (%) | Zadovoljava klasu (%) | Ne zadovoljava (%) |
|-------|------------------------|----------------------------|---------------|-----------------------|--------------------|
| R | 1957414 | 1047 | 12.49 | 80.63 | 6.88 |
| A1 | 139149 | 855 | 3.42 | 93.39 | 3.18 |
| A2 | 27593 | 849 | 3.23 | 93.94 | 2.83 |
| A3 | 3767 | 978 | 3.52 | 95.78 | 0.71 |
| A4 | 3895 | 1011 | 3.33 | 95.92 | 0.74 |



Slika 34. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A4 za Istanbul



Slika 35. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A2 za Istanbul



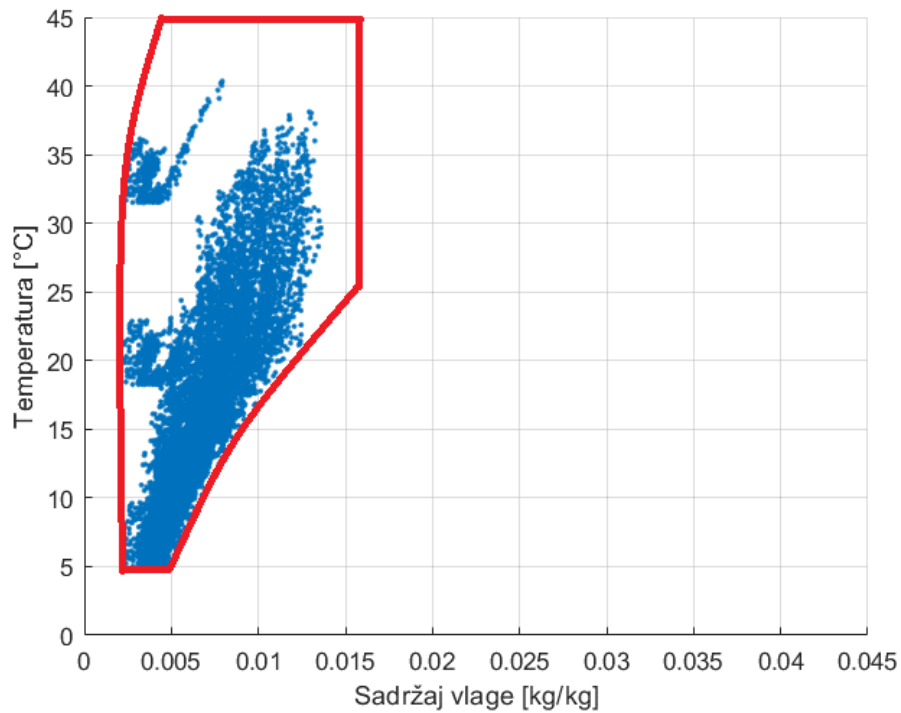
Slika 36. Satna stanja dobavnog zraka za klasu R za Istanbul

5.2.3. Madrid

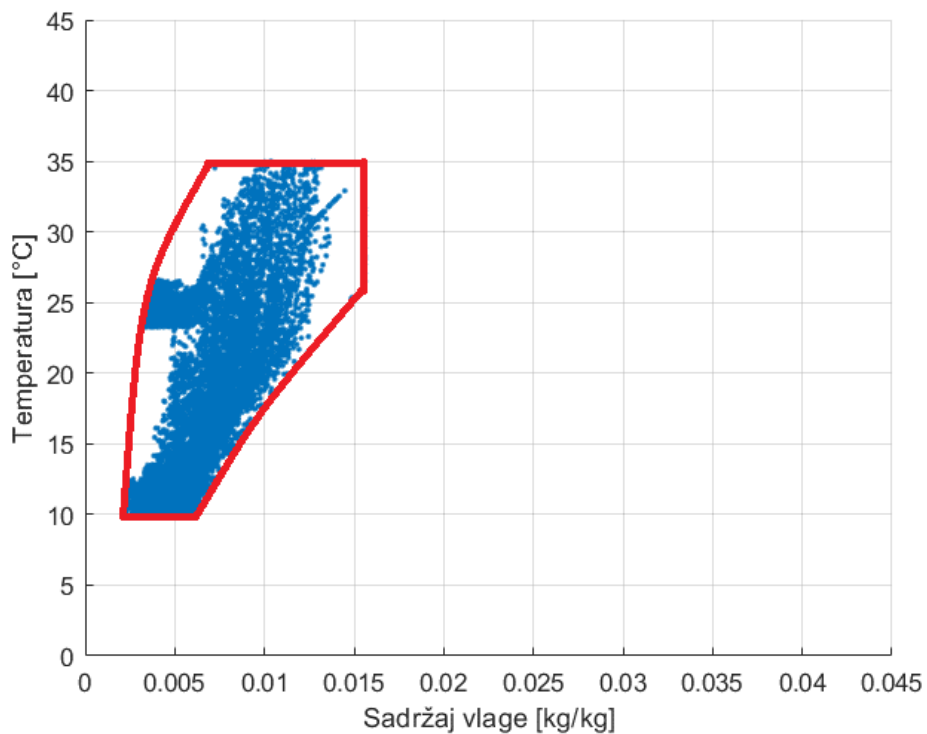
U Tablici 6. ističe se činjenica da klase A3 i A4 u Madridu uopće ne zahtijevaju ugradnju adijabatskog hladnjaka za postizanje uvjeta u klimatizacijskoj jedinici, već se sva stanja mogu postići isključivo korištenjem mješalištem. Potrošnje u ostalim klasama kreću se oko srednjih vrijednosti ostalih gradova. Maksimalna potrošnja, kada postoji potreba za ugradnjom adijabatskog hladnjaka, vrlo malo oscilira, što pogoduje odabiru pumpe. Za stroge uvjete klase R bit će potrebna ugradnja hladnjaka s direktnom ekspanzijom u klimatizacijsku jedinicu. U nastavku su prikazani dijagrami za klase A4, A2 i R za prikaz stanja dobavnog zraka na Slikama 39., 40. i 41.

Tablica 6. Sumarni prikaz rezultata za Madrid

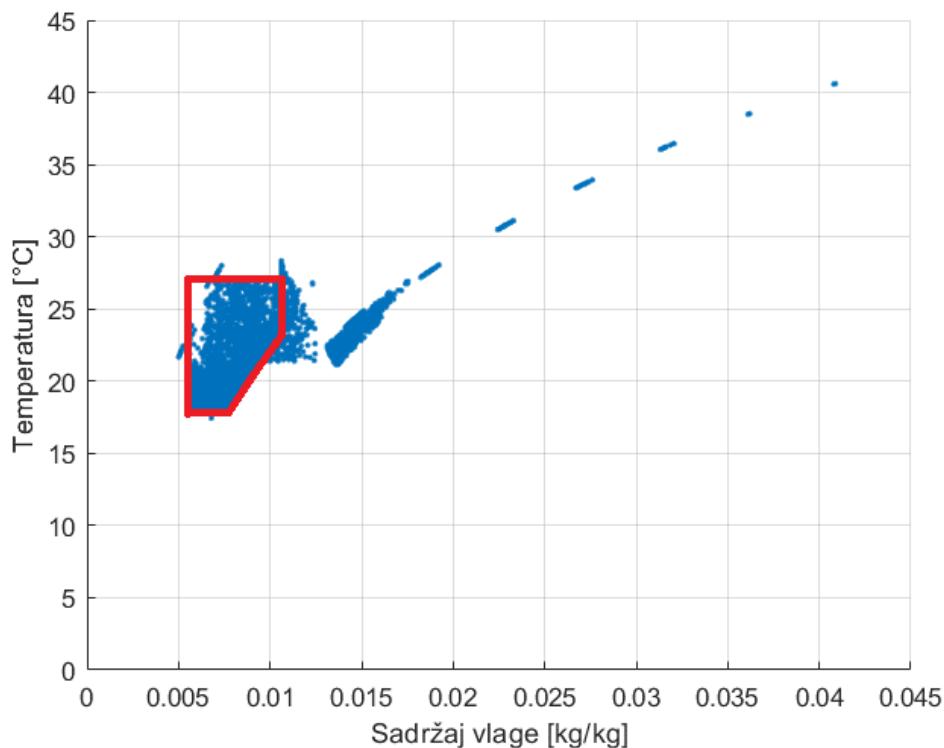
| Klasa | Godišnja potrošnja (L) | Maksimalna potrošnja (L/h) | Optimalno (%) | Zadovoljava klasu (%) | Ne zadovoljava (%) |
|-------|------------------------|----------------------------|---------------|-----------------------|--------------------|
| R | 1559306 | 884 | 9.57 | 78.37 | 12.07 |
| A1 | 102769 | 842 | 2.27 | 91.03 | 6.70 |
| A2 | 25839 | 821 | 2.26 | 95.58 | 2.16 |
| A3 | 0 | 0 | 2.98 | 96.97 | 0.05 |
| A4 | 0 | 0 | 2.64 | 97.31 | 0.06 |



Slika 37. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A4 za Madrid



Slika 38. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A2 za Madrid



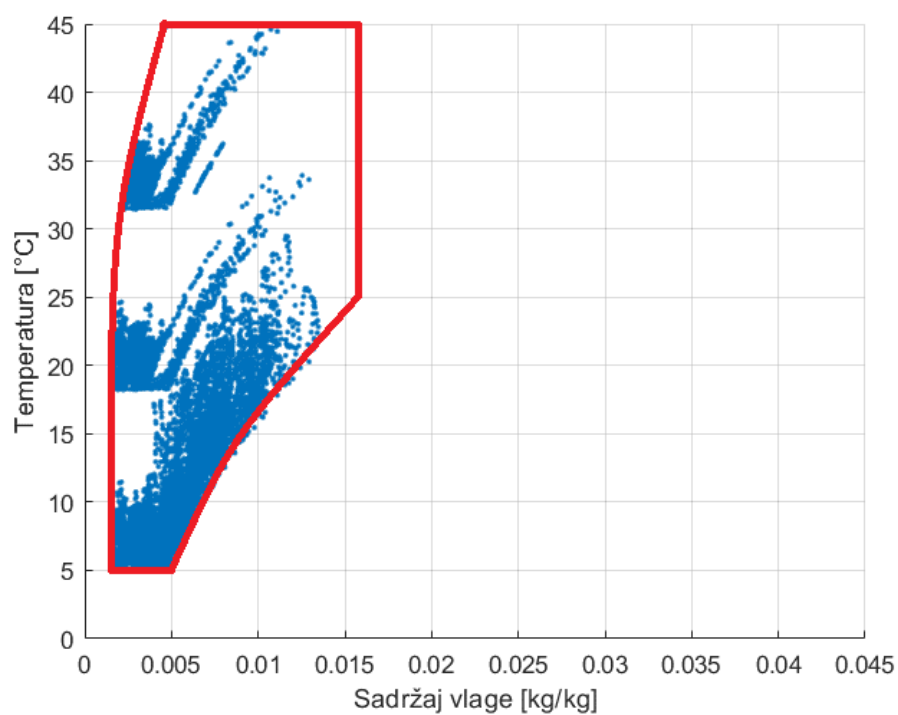
Slika 39. Satna stanja dobavnog zraka za klasu R za Madrid

5.2.4. Stockholm

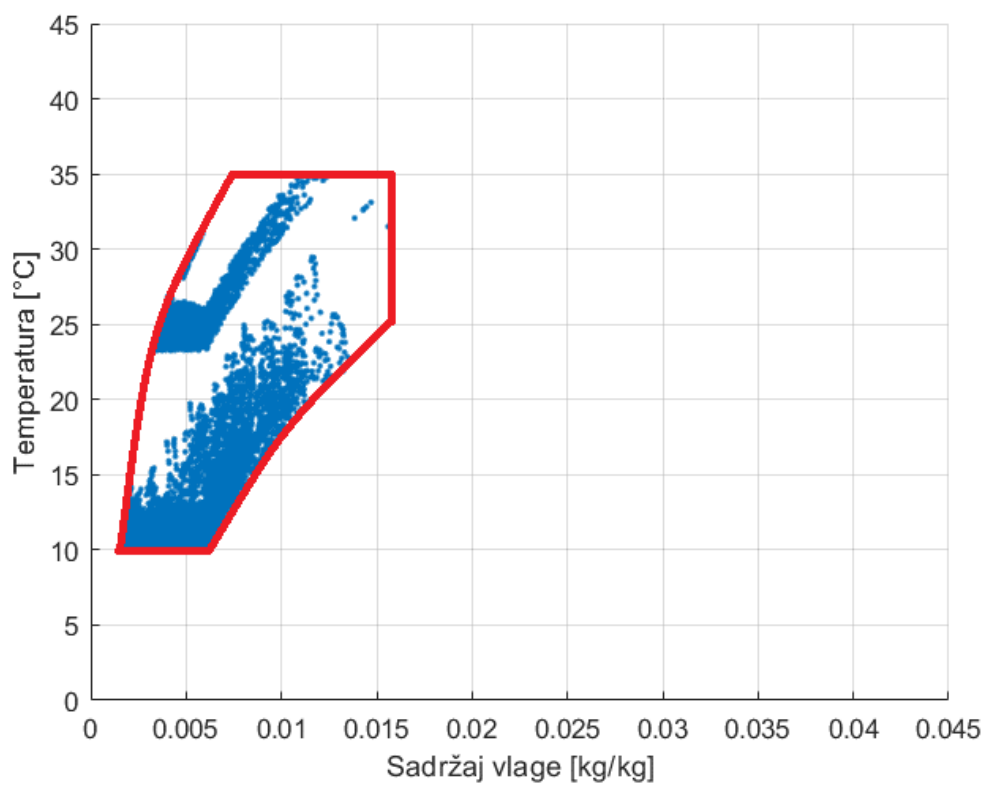
Iz Tablice 7. vidljivo je da za klimatske uvijete u Stockholmu čak i klase širokih granica zahtijevaju daleko veće količine vode za hlađenje no ostali gradovi. Međutim, u strožim klasama Stockholm pokazuje fantastične uvjete za ovakav tip sustava. Primjerice, u strožim uvjetima klase R postiže se bolje pogađanje klase no što to omogućuju klase A1 i A2, a što je neočekivano ponašanje. Sumarno, Stockholm je pokazuje najbolje klimatske preduvjete za eksploataciju navedenog sustava bez dodatnih modifikacija. U nastavku su prikazani dijagrami za klase A4, A2 i R za zorni prikaz stanja dobavnog zraka na Slikama 39., 40. i 41.

Tablica 7. Sumarni prikaz rezultata za Stockholm

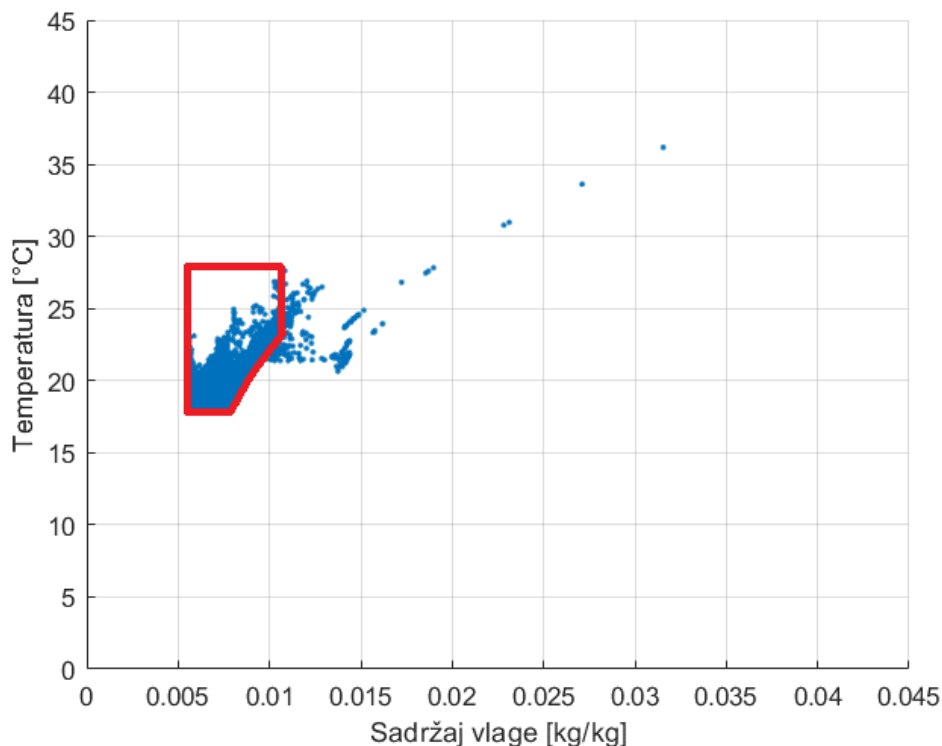
| Klasa | Godišnja potrošnja (L) | Maksimalna potrošnja (L/h) | Optimalno (%) | Zadovoljava klasu (%) | Ne zadovoljava (%) |
|-------|------------------------|----------------------------|---------------|-----------------------|--------------------|
| R | 1652835 | 884 | 15.00 | 82.00 | 3.00 |
| A1 | 133106 | 1101 | 0.92 | 95.03 | 4.04 |
| A2 | 40792 | 709 | 0.49 | 95.92 | 3.58 |
| A3 | 38152 | 1184 | 1.60 | 97.03 | 1.37 |
| A4 | 37378 | 1065 | 1.58 | 97.03 | 1.39 |



Slika 40. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A4 za Stockholm



Slika 41. Satna stanja dobavnog zraka za klasu A2 za Stockholm



Slika 42. Satna stanja dobavnog zraka za klasu R za Stockholm

5.2.5. Usporedba rezultata

Svi gradovi dijagramski pokazuju slične odlike. Najbitnije je primijetiti kako u svakom gradu postoji određeni broj sati u kojima se za klasu R postižu iznimno visoke dobavne temperature u odnosu na granice klase. Međutim, s obzirom na činjenicu da je broj sati na tim temperaturama relativno nizak, ne očekuje se značajni utjecaj na rad podatkovnog centra.

Neki gradovi, poput Madrida, u klasama sa širim granicama (manje strogim klasama) mogu osigurati veći broj sati unutar područja, a zahvaljujući poklapanju područja klase i meteoroloških uvjeta. S druge strane, klime s manjim udjelom vlage klime poput primjerice Stockholma, mogu uz pomoć ovlaživanja iznimno lako postići uvjete klase.

U zaključku, najveća potrošnja izračunata je u Istanbulu, dok je najmanja zabilježena u Zagrebu. No, Zagreb također u klasi R najviše odstupa u klase, iz čega se može zaključiti kako je sustav za tu klimu potrebno najviše modificirati (nadograditi dodatnim elementima) u svrhu postizanja optimalnih uvjeta rada.

5.3. Unaprijeđenja i ograničenja modela

U prethodnim poglavljima spomenuta su određena ograničenja ili postupci koje bi trebalo poduzeti u svrhu poboljšanja rada algoritma. Primarno je potrebno uvođenje dodatnih regulacijskih petlji koje će omogućiti optimizaciju uvjeta pri radu mješališta i ovlaživača. Pretpostavka je da bi takav dodatak u regulaciji dodatno povisio potrošnju vode u širim klasama.

Spomenuta je i potreba za ugradnjom hladnjaka s direktnom ekspanzijom za određene klimatološke zone, a u svrhu postizanja optimalnih uvjeta pojedine klase. Međutim, dodatak ove komponente neizbježno će povećati složenost regulacijske petlje, odnosno, cijelog algoritma.

Tehnički problem koji pokazuje algoritam jest iznimno dugo vrijeme izvršavanja. Ovaj problem moguće je riješiti izradom novog potprograma za brže rješavanje sustava eksponencijalnih jednadžbi. Dodatno se potprogram „Stat“ može implementirati u sprezi s ostalim potprogramima te postići bržu i lakšu manipulaciju izlaznim podacima.

Naposljetku, definiranje toplinskog opterećenja prostorije kao ulaznog podatka proširilo bi spektar radnih uvjeta za koje se simulacija može provoditi, ali bi posljedično dovelo i do povećanja broja ulaznih podataka koji trebaju biti unaprijed definirani za izvođenje simulacije.

6. ZAKLJUČAK

U diplomskom radu bilo je potrebno osmisлити i izraditi algoritam za simulaciju potrošnje vode pri hlađenju podatkovnog centra. Pri tome je analizirana klimatizacijska jedinica koja se sastoji od mješališta i adijabatskog hladnjaka. Algoritam računa potrošnu vode u ovisnosti o sljedećim ulaznim podacima: učinkovitost ovlaživača, broj ciklusa koncentracije vode, volumenski protok zraka, geografska lokacija te učin i učinkovitost ventilatora klimatizacijske jedinice.

Algoritam je razvijen u općem programskom jeziku MATLAB, a temelji se na termodinamičkim modelima vlažnog zraka za opis miješanja struja zraka te primjenu direktnog adijabatskog hladnjaka. Zahtjevi koji se nameću pri hlađenju podatkovnog centra te tehničke karakteristike klimatizacijske jedinice dobivene su od tvrtke *Vertiv Croatia* d.o.o. Algoritam je također razvijan u suradnji s tvrtkom *Vertiv*, uz uzajamne prijedloge i ispravke. Korištenjem razvijenog algoritama provedene su satne dinamičke simulacije za gradove Frankfurt, Istanbul, Madrid, Stockholm i Zagreb, a kako bi se dokazale mogućnosti algoritma te analizirao rad klimatizacijske jedinice na primjerima različitih klima.

Rezultati analize pokazuju kako postoje značajne razlike u potrošnji vode pri hlađenju podatkovnih centara u ovisnosti o klimatološkim uvjetima i klasama kvalitete zraka. Nakon provedenih simulacija, primijećeno je kako gradovi s klimama sličnim Madridu, nemaju potrebe za korištenjem adijabatskog hlađenja za klase širokog spektra uvjeta. Također je zaključeno da suhe klime zahtijevaju nešto više količine vode za održavanje uvjeta takvih klasa, no isto tako mogu najbolje postići uvjete strogih klasa s visokom točnošću, što je dokazano na primjeru Stockholma. Gradovi s klimom poput Istanbula, traže iznimno veliku količinu vode za održavanje uvjeta strogih klasa, što za klasu R dostiže i 2000000 litara godišnje. Gradovi s klimom poput Zagreba, pokazuju najmanju prosječnu potrošnju vode za stroge klase, no isto tako je iznimno teško osigurati uvjete klasa u takvim klimama, pri čemu do 16% radnih sati godišnje uvjete klase nije moguće postići.

Za gradove čiji postotak radnih sati izvan područja klase prelazi 10%, poput primjerice gradova Zagreb i Madrid, preporučuje se ugradnja hladnjaka s direktnom ekspanzijom u klimatizacijsku jedinicu, a što nije obuhvaćeno prikazanom analizom niti razvijenim algoritmom.

Algoritam je moguće dodatno unaprijediti uvođenjem regulacije za dodatnu optimizaciju optimuma klase te uvođenjem opterećenja prostora kao ulaznog parametara. Međutim, od velike je važnosti također napraviti dodatni potprogram koji će omogućiti brže rješavanje sustava eksponencijalnih jednadžbi.

LITERATURA

- [1] Cmglee, »Wikipedia Commons,« Wikipedia, 18. Veljača 2021.. [Mrežno]. Available: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Phase_diagram_of_water.svg. [Pokušaj pristupa 06. Lipanj 2021..].
- [2] A. Galović, Termodinamika 2, Zagreb: Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2014.
- [3] E. ToolBox, »Water Vapour and Saturation Pressure in Humid Air,« 03 Siječanj 2021.. [Mrežno]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/water-vapor-saturation-pressure-air-d_689.html.
- [4] I. Balen, *Skripta: Klimatizacija, Sustavi za odbacivanje viška topline*, Zagreb, 2017..
- [5] Munters, Evaporative Humidifier/Cooler for AHU's - Technical manual, Vienna: Munters Europe AB, 2010.
- [6] I. Balen, *Skripta: Klimatizacija, Dimenzioniranje komponenti GVK sustava i automatska regulacija*, Zagreb, 2017.
- [7] ASHRAE, Thermal guidelines for data processing environments, ASHRAE, 2011.
- [8] Vertiv Croatia d.o.o., *Sastanci i komunikacija o problemu i potrebnim podacima*, Zagreb: Vertiv Croatia d.o.o., 2021..
- [9] B. Halasz, A. Galović i I. Boras, *Toplinske tablice*, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu, Fakultet Strojarstva i Brodogradnje, 2015..
- [10] H. Geng, *Data Center Handbook*, New Jersey: Wiley, 2015.
- [11] R. a. A.-c. E. American Society of Heating, "ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment," in *ASHRAE Handbook - HVAC Systems and Equipment*, Atlanta, ASHRAE, 2016., p. Chapter 40.
- [12] J. R. Watt, *Evaporative Air Conditioning Handbook*, London: Chapman & Hall, 1986.

PRILOZI

I. Kod Algoritma u MATLAB sintaksi

Prilog I. Kod algoritma u MATLAB sintaksi**Adhladnjak**

```
function [muk,T2,x2]=adhladnjak(V,fi,T,eta,C,fimax,xh,Th,fimid)

%određivanje stanja zraka
%tlak zasićenja ulaznog zraka [Pa]
ps1=exp(77.3450+0.0057*T-7235/T)/(T^8.2);
%parcijalni tlak pare [Pa]
pd1=fi*ps1;
%sadržaj vlage ulaznog zraka [kg/kg]
x1=0.622*pd1/(101325-pd1);
%entalpija ulaznog zraka [kJ/kgsz]
h1=1.005*(T-273.15)+x1*(2500+1.93*(T-273.15));
%temperatura vlažnog termometra
syms Ts
Ts1=vpasolve(h1==1.005*(Ts-273.15)+(0.622*exp(77.3450+0.0057*Ts-7235/Ts)/(Ts^8.2))/(101325-exp(77.3450+0.0057*Ts-7235/Ts)/(Ts^8.2)))*(2500+1.93*(Ts-273.15)),T-10);
%sadržaj vlage pri zasićenju
ps2=exp(77.3450+0.0057*Ts1-7235/Ts1)/(Ts1^8.2);
xs=0.622*ps2/(101325-ps2);
%izlazni sadržaj vlage iz hladnjaka
x2=x1+eta*(xs-x1);
%temperatura na izlazu iz hladnjaka
T2=vpasolve(h1==1.005*(Ts-273.15)+x2*(2500+1.93*(Ts-273.15)),T-10)-273.15;
%provjera relativne vlažnosti izlaznog zraka
pd2=101325*x2/(x2+0.622);
ps=exp(77.3450+0.0057*(T2+273.15)-7235/(T2+273.15))/((T2+273.15)^8.2);
fi2=pd2/ps;
hmax=1.005*(Th)+xh*(2500+1.93*(Th));
```

%regulacijski uvjet srednjeg ovlaživanja

```
if (fi2>=fimid && fi<fimid && (T-273.15)<Th)
```

```
    fi2=fimid;
```

```
    T2=vpasolve(h1==1.005*(Ts-273.15)+(0.622*fi2*exp(77.3450+0.0057*Ts-7235/Ts)/(Ts^8.2))/(101325-fi2*exp(77.3450+0.0057*Ts-7235/Ts)/(Ts^8.2)))*(2500+1.93*(Ts-273.15)),T-10);
```

```
    x2=0.622*fi2*exp(77.3450+0.0057*T2-7235/T2)/(T2^8.2)/(101325-fi2*exp(77.3450+0.0057*T2-7235/T2)/(T2^8.2));
```

```
    T2=T2-273.15;
```

```
end
```

%uvjet maksimuma fi

```
if (fi2>fimax && h1<hmax)
```

```
    fi2=fimax;
```

```
    T2=vpasolve(h1==1.005*(Ts-273.15)+(0.622*fi2*exp(77.3450+0.0057*Ts-7235/Ts)/(Ts^8.2))/(101325-fi2*exp(77.3450+0.0057*Ts-7235/Ts)/(Ts^8.2)))*(2500+1.93*(Ts-273.15)),T-10);
```

```
    x2=0.622*fi2*exp(77.3450+0.0057*T2-7235/T2)/(T2^8.2)/(101325-fi2*exp(77.3450+0.0057*T2-7235/T2)/(T2^8.2));
```

```
    T2=T2-273.15;
```

```
end
```

%uvjet maksimuma x, bitan samo kod velikog prelaska maksimalne temperature

```
if x2>xh && h1<hmax
```

```
    x2=xh;
```

```
    T2=vpasolve(h1==1.005*(Ts-273.15)+x2*(2500+1.93*(Ts-273.15)),T-10)-273.15;
```

```
end
```

%uvjet greške ovlaživanja

```
if x2<=x1
```

```
    T2=T-273.15;
```

```

    x2=x1;
end
%potrošnja vode zbog promjene vlažnosti
rho=1/(461.5*T*(0.622+x1)/101325); %kg/m3
mw=(x2-x1)*V*rho; %kg/h
%potrošnja vode zbog odmuljivanja
if(C<=2)
    mod=0;
else
    mod=mw/(C-1);
end
%ukupna potrošnja vode
muk=mw+mod;
%adhladnjak vraća temperaturu Tsup, što je temperatura povratnog zraka iz
%data centra nakon pokupljanja viška topline
end

```

Klasa

```

function [Tl,xl,Th,xh,fimax,fimin]=klasa(A)
if A=="R"
    Tl=18;
    Th=27;
    Tdpl=5.5+273.15;
    psl=exp(77.3450+0.0057*Tdpl-7235/Tdpl)/(Tdpl^8.2);
    Tdph=15+273.15;
    psh=exp(77.3450+0.0057*Tdph-7235/Tdph)/(Tdph^8.2);
    xl=0.622*psl/(101325-psl);
    xh=0.622*psh/(101325-psh);
    fimax=0.6;

```

```
fimin=0.08;
elseif A=="A1"
    Tl=15;
    Th=32;
    Tdpl=-12+273.15;
    psl=exp(77.3450+0.0057*Tdpl-7235/Tdpl)/(Tdpl^8.2);
    Tdph=17+273.15;
    psh=exp(77.3450+0.0057*Tdph-7235/Tdph)/(Tdph^8.2);
    xl=0.622*psl/(101325-psl);
    xh=0.622*psh/(101325-psh);
    fimax=0.8;
    fimin=0.2;
elseif A=="A2"
    Tl=10;
    Th=35;
    Tdpl=-12+273.15;
    psl=exp(77.3450+0.0057*Tdpl-7235/Tdpl)/(Tdpl^8.2);
    Tdph=21+273.15;
    psh=exp(77.3450+0.0057*Tdph-7235/Tdph)/(Tdph^8.2);
    xl=0.622*psl/(101325-psl);
    xh=0.622*psh/(101325-psh);
    fimax=0.8;
    fimin=0.2;
elseif A=="A3"
    Tl=5;
    Th=40;
    Tdpl=-12+273.15;
    psl=exp(77.3450+0.0057*Tdpl-7235/Tdpl)/(Tdpl^8.2);
    Tdph=24+273.15;
```

```
psh=exp(77.3450+0.0057*Tdph-7235/Tdph)/(Tdph^8.2);
xl=0.622*psl/(101325-psl);
xh=0.622*psh/(101325-psh);
fimax=0.85;
fimin=0.08;
elseif A=="A4"
    Tl=5;
    Th=45;
    Tdpl=-12+273.15;
    psl=exp(77.3450+0.0057*Tdpl-7235/Tdpl)/(Tdpl^8.2);
    Tdph=24+273.15;
    psh=exp(77.3450+0.0057*Tdph-7235/Tdph)/(Tdph^8.2);
    xl=0.622*psl/(101325-psl);
    xh=0.622*psh/(101325-psh);
    fimax=0.9;
    finin=0.08;
else
    disp("Nepostojeća klasa, upisati R ili A1:4.")
    return
end
end
```

Komora

```
V=80000; %MOGUĆE MIJENJATI
C=2.01; %MOGUĆE MIJENJATI
eta=0.85; %MOGUĆE MIJENJATI
Pv=90; %kW ventilatora moguće mijenjati
etav=0.6; %učinkovitost ventilatora moguće mijenjati
%pozivanje uvjeta klase
```

```

[Tl,xl,Th,xh,fimax,fimin]=klasa("R");      %MOGUĆE MIJENJATI KLASU U
      NAVODNICIMA
%regulacijska srednja vlažnost (tromost sustava ovlaživanja)
fimid=(fimin+fimax)/2;
%MOGUĆE PASTEATI NOVU ADRESU EXCEL FILE-A I USKLADITI PODATKE
%vanjske temperature
[Text]=xlsread('C:\Users\Korisnik\Desktop\PE + dip\Matlab\Stockholm.xlsx','A1:A8760');
%vanjske relativne vlažnosti zraka
[Fiext]=xlsread('C:\Users\Korisnik\Desktop\PE + dip\Matlab\Stockholm.xlsx','B1:B8760');
%inicijalizacija vektora potrošnje
[mw]=zeros(8760,1);
%inicijalizacija vektora izlaznih temperatura
[Tiz]=zeros(8760,1);
%inicijalizacija vektora izlaznih vlažnosti
[xiz]=zeros(8760,1);
%pretpostavljeni uvjeti odsisnog zraka za prvu iteraciju (sredina
%Mollierovog područja klasa)
Tint=20;
Fiint=0.5;
psint=exp(77.3450+0.0057*(Tint+273.15)-7235/(Tint+273.15))/((Tint+273.15)^8.2);
pdint=Fiint*psint;
xint=0.622*pdint/(101325-pdint);
hint=1.005*(Tint)+xint*(2500+1.93*(Tint));
%petlja po svim satima godine
for i=1:8760
    %stanje vanjskog zraka u satu
    psext=exp(77.3450+0.0057*(Text(i)+273.15)-
        7235/(Text(i)+273.15))/((Text(i)+273.15)^8.2);
    pdext=Fiext(i)/100*psext;
    xext=0.622*pdext/(101325-pdext);
    hext=1.005*Text(i)+xext*(2500+1.93*Text(i));
    rho=1/(461.5*(Text(i)+273.15)*(0.622+xext)/101325);
    dh=Pv*(1-etav)/(V*rho/3600);

```

```

DT=dh/(1.005+xext*1.93);
%modeovi
%provjera, zadovoljava li bilo koji zrak u sustavu granice klase (uz
%predviđeno zagrijavanje na ventilatoru)
if((Fiext(i)/100)>=fimin && (Fiext(i)/100)<=fimax && xext>=xl && xext<=xh &&
(Text(i)+DT)>=Tl && (Text(i)+DT)<=Th)
%vanjski zrak zadovoljava uvjete klase, automatski ulazi u komoru
%bez procesa
Tsup=Text(i)+DT;
xsup=xext;
mw(i)=0;
elseif (Fiint>=fimin && Fiint<=fimax && xint>=xl && xint<=xh && (Tint+DT)>=Tl &&
(Tint+DT)<=Th)
%unutarnji zrak zadovoljava uvjete klase, automatski ulazi u
%komoru
Tsup=Tint+DT;
xsup=xint;
mw(i)=0;
else
%komora provjerava radni mode (zima/ljeto) i prema tome određuje
%hoće li se koristiti mješalište ili ne
%"zimski" mode, određuje z miješanja, ovlažuje samo ako mora
if(Text(i)<=20)
%funkcija miješanja
for z=0:0.1:1
%određivanje ulaznog stanja zraka u ovlaživač
if (Text(i)<Tint)
hsup=(1-z)*hext+z*hint;
xsup=(1-z)*xext+z*xint;
else
hsup=(1-z)*hint+z*hext;
xsup=(1-z)*xint+z*xext;
end

```



```

Tsup=(hsup-2500*xsup)/(1.005+1.93*xsup)+273.15+DT;
pssup=exp(77.3450+0.0057*(Tsup)-7235/(Tsup))/((Tsup)^8.2);
pdsup=101325*xsup/(xsup+0.622);
Fisup=pdsup/pssup;
%mod kada je potrebno samo miješanje, zadovoljava granice temp
%i vlažnosti zadane Klase K
if ((Tsup-273.15)>Tl && xsup>xl && Fisup>fimin && Fisup<fimax && (Tsup-
273.15)<Th)
    Tsup=Tsup-273.15;
    mw(i)=0;
    break;
%mod kada je potrebno ovlaživanje zbog pada ispod neke od
%granica vlažnosti uz uvjet da refleksija na maksimumu nije
%prekoračena/dodatan ili za kritičnu točku (osigurač za druge
%klime)
elseif (((Tsup-273.15)>Tl && Fisup<fimax) || z==1)
    g=0;
    if Text(i)<Tint
        hsup=g*hext+(1-g)*hint;
        xsup=g*xext+(1-g)*xint;
    else
        hsup=g*hint+(1-g)*hext;
        xsup=g*xint+(1-g)*xext;
    end
    Tsup=(hsup-2500*xsup)/(1.005+1.93*xsup)+273.15;
    pssup=exp(77.3450+0.0057*(Tsup)-7235/(Tsup))/((Tsup)^8.2);
    pdsup=101325*xsup/(xsup+0.622);
    Fisup=pdsup/pssup;
    [mw(i),Tsup,xsup]=adhladnjak(V,Fisup,Tsup,eta,C,fimax,xh,Th,fimid);
    Tsup=Tsup+DT;
    break;
%failsafe petlja u slučaju neočekivanog slijeda stanja zraka,
%za spriječavanje rasta temperature u nedogled

```

```

elseif (Tsup-273.15)>Th
    Tsup=(hsup-2500*xsup)/(1.005+1.93*xsup)+273.15;
    pssup=exp(77.3450+0.0057*(Tsup)-7235/(Tsup))/((Tsup)^8.2);
    pdsup=101325*xsup/(xsup+0.622);
    Fisup=pdsup/pssup;
    [mw(i),Tsup,xsup]=adhladnjak(V,Fisup,Tsup,eta,C,fimax,xh,Th,fimid);
    Tsup=Tsup+DT;
    break;
end
end
else
    %kada vanjska temperatura prijeđe 20°C dolazi do promjene modova
    %rada, miješanje postaje rijeđe, a ovlaživanje služi za snižavanje temperature
    %zraka u data centru
    %ljetni algoritam teoretski ovlažuje oba stanja zraka i traži
    %optimum u odnosu na postizive točke u komori
    [mw1,Tint1,xint1]=adhladnjak(V,(Fiext(i)/100),(Text(i)+273.15),eta,C,fimax,xh,Th,fimid);
    [mw2,Tint2,xint2]=adhladnjak(V,Fiint,(Tint+273.15),eta,C,fimax,xh,Th,fimid);
    psint1=exp(77.3450+0.0057*(Tint1+273.15)-
        7235/(Tint1+273.15))/((Tint1+273.15)^8.2);
    pdint1=101325*xint1/(0.622+xint1);
    fiint1=pdint1/psint1;
    psint2=exp(77.3450+0.0057*(Tint2+273.15)-
        7235/(Tint2+273.15))/((Tint2+273.15)^8.2);
    pdint2=101325*xint2/(0.622+xint2);
    fiint2=pdint2/psint2;
    if hext<=hint
        if (fiint1>fimax && fiint2<=fimax && xint2<=xh && (Tint2+DT)<Th)
            mw(i)=mw2;
            Tsup=Tint2+DT;
            xsup=xint2;
        else

```

```

        mw(i)=mw1;
        Tsup=Tint1+DT;
        xsup=xint1;
    end
else
    if (fiint2>fimax && fiint1<=fimax && xint1<=xh && (Tint1+DT)<Th)
        mw(i)=mw1;
        Tsup=Tint1+DT;
        xsup=xint1;
    else
        mw(i)=mw2;
        Tsup=Tint2+DT;
        xsup=xint2;
    end
end
end
end
end
%zapis u izlazne varijable
xiz(i)=xsup;
Tiz(i)=Tsup;
%definicija dinamičkog koraka
hint=1.005*(Tsup+12)+xsup*(2500+1.93*(Tsup+12));
xint=xsup;
Tint=Tsup+12;
psint=exp(77.3450+0.0057*(Tint+273.15)-7235/(Tint+273.15))/((Tint+273.15)^8.2);
pdint=101325*xint/(0.622+xint);
Fiint=pdint/psint;
end
xlswrite('C:\Users\Korisnik\Desktop\PE + dip\Matlab\RezultatiSR.xlsx',mw,1);
xlswrite('C:\Users\Korisnik\Desktop\PE + dip\Matlab\RezultatiSR.xlsx',xiz,2);
xlswrite('C:\Users\Korisnik\Desktop\PE + dip\Matlab\RezultatiSR.xlsx',Tiz,3);

```

Stat

```
[x]=xlsread('C:\Users\Korisnik\Desktop\PE + dip\Matlab\Rezultati1.xlsx',2,'A1:A8760');
[T]=xlsread('C:\Users\Korisnik\Desktop\PE + dip\Matlab\Rezultati1.xlsx',3,'A1:A8760');
[Tl,xl,Th,xh,fimax,fimin]=klasa("A1");
[p]=zeros(3,1);
for i=1:8760
    ps=exp(77.3450+0.0057*(T(i)+273.15)-7235/(T(i)+273.15))/((T(i)+273.15)^8.2);
    pd=101325*x(i)/(0.622+x(i));
    fi=pd/ps;
    if T(i)>Th || T(i)<Tl || x(i)>xh || x(i)<xl || fi>fimax || fi<fimin
        p(3)=p(3)+1;
    elseif (T(i)<22 && T(i)>20 && fi<0.5 && fi>0.3)
        p(1)=p(1)+1;
    else
        p(2)=p(2)+1;
    end
end
[v]=[p]/8760;
hold on
axis([0 0.045 0 45])
grid on
plot(x,T,')
xlswrite('C:\Users\Korisnik\Desktop\PE + dip\Matlab\Rezultati1.xlsx',v,4);
```