

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Tomislav Zelenika**

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Energetska analiza punjenja i pražnjenja podzemnog skladišta  
prirodnog plina

Mentor:

Dr. sc. Mislav Čehil, dipl. ing.

Student:

Tomislav Zelenika

Zagreb, 2021.

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

Tomislav Zelenika

Zahvaljujem se profesoru Mislavu Čehilu na pruženoj potpori i savjetima koji su mi omogućili izradu završnog i diplomskog rada.

Nadalje, zahvaljujem se svim ostalim profesorima i kolegama koje sam upoznao i s njima surađivao tijekom studija. Na fakultetu sam upoznao i neke ljude koji zaslužuju posebnu zahvalu. To su moji najbliži prijatelji Joško Ištuk i Antun Jakob Marić. Upoznavanje i druženje s njima za mene je zasigurno ono najvažnije, što mi se događalo tijekom studija. Zahvaljujem se i svojim prijateljima Mislavu Markoču i Matiji Smiljanu, s kojima sam proveo brojne studentske dane. Vjerujem da će povezanost i prijateljstvo sa svima njima trajati i dalje, dugo nakon završetka studija.

Posebnu zahvalu upućujem svojoj obitelji: majci Ljilji, ocu Berislavu, sestri Sari i bratu Oliveru. Bez njihove ljubavi, savjeta, podrške i motivacije ne bih mogao ostvariti ovaj uspjeh, pa im isti pripada jednako kao i meni.

Na kraju, želim se zahvaliti svojoj budućoj supruzi Matei Skoblar. Njezina dobrota, pažnja i ljubav koju mi pokazuje, svakodnevan su izvor moje radosti i sreće.

Tomislav Zelenika



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, inženjersko modeliranje i računalne simulacije i brodstrojarski

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

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Tomislav Zelenika**

JMBAG: 0035195971

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Energetska analiza punjenja i pražnjenja podzemnog skladišta prirodnog plina**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Energy analysis of filling and emptying of underground natural gas storage**

Opis zadatka:

U Republici Hrvatskoj postoji samo jedno podzemno skladište prirodnoga plina Okoli koje ima veliki kapacitet, ali mu je brzina punjenja i pražnjenja nedovoljna za praćenje dnevnih oscilacija potrošnje prirodnog plina. Stoga je u tijeku izgradnja podzemnog skladišta prirodnog plina "Grubišno Polje" koje će imati manji kapacitet, ali veću brzinu punjenja i pražnjenja. Punjenje će se vršiti kompresorom pogonjenim plinskim motorom.

U radu je potrebno:

1. Napraviti matematički model kojim će se opisati procese punjenja i pražnjenja spremnika plina.
2. Odrediti potrebnu snagu plinskog motora u ovisnosti o razini napunjenosti spremnika.
3. Pokušati naći optimalnu razinu napunjenosti spremnika kako bi potrošnja energije za plinski motor bila minimalna poštujući sva nametnuta ograničenja.

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

Zadatak zadan:

30. rujna 2021.

Datum predaje rada:

2. prosinca 2021.

Predvideni datumi obrane:

13. – 17. prosinca 2021.

Zadatak zadao:

Doc.dr.sc. Mislav Čehić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Tanja Jurčević Lulić

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS DIJAGRAMA .....	III
POPIS SLIKA .....	V
POPIS TABLICA.....	V
POPIS KRATICA .....	V
POPIS OZNAKA .....	VI
SAŽETAK.....	VIII
ABSTRACT .....	IX
1. UVOD .....	1
2. PODZEMNO SKLADIŠTE PLINA GRUBIŠNO POLJE .....	5
2.1. Motiv za izgradnju skladišta plina u Grubišnom Polju .....	5
2.2. Opis projekta .....	7
2.3. Lokacija.....	8
2.4. Faza I – djelomično crpljenje postojećih rezervi u ležištu .....	11
2.5. Faza II – Vršno podzemno skladište plina Grubišno Polje .....	15
2.5.1. Utiskivanje plina u skladište .....	16
2.5.2. Povlačenje plina iz skladišta .....	16
3. MATEMATIČKI MODEL .....	18
3.1. Crpljenje rezervi ležišnog plina.....	18
3.2. Utiskivanje plina do potpune napunjenosti spremnika.....	31
3.3. Scenarijska usporedba rada podzemnog skladišta plina .....	42
3.3.1 Scenarij I .....	42
3.3.1.1. Povlačenje plina .....	42
3.3.1.2. Utiskivanje plina .....	46

3.3.2. Scenarij II .....	51
3.3.2.1. Povlačenje plina .....	51
3.3.2.2 Utiskivanje plina .....	53
3.4. Analiza matematičkog modela .....	56
4. ZAKLJUČAK .....	57
5. IZVORI .....	58

**POPIS DIJAGRAMA**

<i>Dijagram 1. Dnevna potražnja za plinom po mjesecima[2] .....</i>	<i>1</i>
<i>Dijagram 2. Profil povlačenja plina u fazi crpljenja .....</i>	<i>20</i>
<i>Dijagram 3. Smanjenje množine plina u ležištu tijekom faze crpljenja .....</i>	<i>21</i>
<i>Dijagram 4. Krivulja tlaka ležišnog plina tijekom faze crpljenja .....</i>	<i>24</i>
<i>Dijagram 5. Krivulja temperature ležišnog plina tijekom faze crpljenja .....</i>	<i>25</i>
<i>Dijagram 6. Krivulja množine ležišnog plina tijekom faze crpljenja.....</i>	<i>25</i>
<i>Dijagram 7. Nominalna snaga kompresora i potrebna snaga motora tijekom faze crpljenja.</i>	<i>29</i>
<i>Dijagram 8. Masa plina koji se troši na pogon kompresora tijekom faze crpljenja .....</i>	<i>30</i>
<i>Dijagram 9. Profil dobave plina u ležište tijekom faze utiskivanja .....</i>	<i>32</i>
<i>Dijagram 10. Akumulacija plina u ležištu tijekom faze utiskivanja .....</i>	<i>32</i>
<i>Dijagram 11. Promjena molnog udjela metana tijekom faze utiskivanja .....</i>	<i>33</i>
<i>Dijagram 12. Promjena udjela dušika i ugljikovog dioksida tijekom faze utiskivanja .....</i>	<i>34</i>
<i>Dijagram 13. Profil temperature nakon miješanja u ležištu tijekom faze utiskivanja .....</i>	<i>35</i>
<i>Dijagram 14. Profil tlaka u ležištu tijekom faze utiskivanja .....</i>	<i>38</i>
<i>Dijagram 15. Profil temperature u ležištu tijekom faze utiskivanja .....</i>	<i>38</i>
<i>Dijagram 16. Profil množine u ležištu tijekom faze utiskivanja.....</i>	<i>39</i>
<i>Dijagram 17. Nominalna snaga kompresora i potrebna snaga motora tijekom faze utiskivanja .....</i>	<i>40</i>
<i>Dijagram 18. Potrebna snaga motora u ovisnosti o napunjenosti spremnika.....</i>	<i>41</i>
<i>Dijagram 19. Masa plina koji se troši na pogon motora tijekom faze utiskivanja .....</i>	<i>41</i>
<i>Dijagram 20. Profil dnevne potražnje za plinom .....</i>	<i>43</i>
<i>Dijagram 21. Vektor sklairanja potražnje za plinom.....</i>	<i>43</i>
<i>Dijagram 22. Vektor satne dobave iz skladišta tijekom "hladnog tjedna".....</i>	<i>44</i>
<i>Dijagram 23. Vektor satne množinske dobave iz skladišta tijekom "hladnog tjedna".....</i>	<i>44</i>
<i>Dijagram 24. Profil tlaka u ležištu tijekom povlačenja - Scenarij I .....</i>	<i>45</i>
<i>Dijagram 25. Profil temperature u ležištu tijekom povlačenja - Scenarij I.....</i>	<i>45</i>
<i>Dijagram 26. Profil množine u ležištu tijekom povlačenja - Scenarij I.....</i>	<i>46</i>
<i>Dijagram 27. Dnevni profil utiskivanja u skladište tijekom "toplog tjedna".....</i>	<i>47</i>
<i>Dijagram 28. Profil utiskivanja plina u skladište tijekom "toplog tjedna".....</i>	<i>47</i>
<i>Dijagram 29. Profil množine utiskivanja plina u skladište tijekom "toplog tjedna" .....</i>	<i>48</i>
<i>Dijagram 30. Profil tlaka u ležištu pri utiskivanju - Scenarij I.....</i>	<i>48</i>
<i>Dijagram 31. Profil temperature u ležištu pri utiskivanju - Scenarij I.....</i>	<i>49</i>



<i>Dijagram 32. Profil množine u ležištu pri utiskivanju - Scenarij I .....</i>	<i>49</i>
<i>Dijagram 33. Snaga motora potrebna za pogon kompresora pri utiskivanju - Scenarij I .....</i>	<i>50</i>
<i>Dijagram 34. Masa plina potrebna za pogon motora pri utiskivanju - Scenarij I .....</i>	<i>50</i>
<i>Dijagram 35. Profil tlaka u ležištu povlačenja - Scenarij II .....</i>	<i>51</i>
<i>Dijagram 36. Profil temperature u ležištu tijekom povlačenja - Scenarij II.....</i>	<i>52</i>
<i>Dijagram 37. Profil množine u ležištu tijekom povlačenja - Scenarij II.....</i>	<i>52</i>
<i>Dijagram 38. Profil tlaka u ležištu tijekom utiskivanja - Scenarij II .....</i>	<i>53</i>
<i>Dijagram 39. Profil temperature u ležištu tijekom utiskivanja - Scenarij II.....</i>	<i>54</i>
<i>Dijagram 40. Profil množine u ležištu tijekom utiskivanja - Scenarij I .....</i>	<i>54</i>
<i>Dijagram 41. Snaga motora potrebna za pogon kompresora pri utiskivanju - Scenarij II .....</i>	<i>55</i>
<i>Dijagram 42. Masa plina potrebna za pogon motora pri utiskivanju - Scenarij II .....</i>	<i>55</i>

**POPIS SLIKA**

<i>Slika 1. Tipovi podzemnog skladišta plina[2]</i> .....	2
<i>Slika 2. Jednostavna shema procesa u podzemnom skladištu plina[3]</i> .....	3
<i>Slika 3. Eksploatacijsko ležište "Grubišno Polje"[5]</i> .....	8
<i>Slika 4. Karakteristike plina iz bušotine "Gr-1z"[5]</i> .....	9
<i>Slika 5. Plinski transportni sustav RH-e, stanje iz 2019. Godine[4]</i> .....	10
<i>Slika 6. Magistralni plinovod "Virovitica - Kutina"[5]</i> .....	10
<i>Slika 7. Shema postrojenja u fazi crpljenja ležišnog plina[5]</i> .....	12
<i>Slika 8. Trodimenzionalni model kompresorskog postrojenja[10]</i> .....	14
<i>Slika 9. Shema postrojenja u drugoj fazi projekta[3]</i> .....	15

**POPIS TABLICA**

<i>Tablica 1. Podzemna skladišta plina u svijetu[3]</i> .....	4
<i>Tablica 2. Planirani projekti za razvoj plinskog transportnog sustava RH-e[4]</i> .....	7
<i>Tablica 3. Molni sastav plina iz plinskog transportnog sustava RH-e[8]</i> .....	11
<i>Tablica 4. Molni sastav plina dobivenog miješanjem[8]</i> .....	12

**POPIS KRATICA**

HD	hladni dan
HT	hladni tjedan
IEA	<i>International Energy Agency</i> (Međunarodna energetska agencija)
MATLAB	Matrix Laboratory
NN	Narodne novine
RTK	rezervoar tehnološke kanalizacije
TD	topli dan
TT	topli tjedan
UMS	ulazna mjerna stanica
UPP	ukapljeni prirodni plin
ZH	zračni hladnjak
ZK	Zemljina kora

**POPIS OZNAKA**Latinične oznake

$A$	$m^2$	površina
$C_{mp}$	J/kmolK	molarni toplinski kapacitet pri p=konst.
$C_{mv}$	J/kmolK	molarni toplinski kapacitet pri v=konst
$c_p$	J/kgK	specifični toplinski kapacitet
$D_{max}$	kWh/d	dnevna potražnja za plinom u danu visoke potrošnje
$E_{pm}$	kWh/d	tehnički kapacitet ulaznih mjesta
$H_d$	J/kmol	donja ogrjevna vrijednost
$I$	m	geometrijska izmjera površine
$I_m$	kW/h n	tehnički kapacitet najvećeg pojedinačnog plinskog objekta
$M$	kg/kmol	molarna masa
$n$	kmol	množina
$N-I$	%	kriterij osiguranja opskrbe plinom
$N_s$	%	napunjenost spremnika
$p$	Pa/bar	tlak
$P$	W	snaga
$P_m$	kWh/dan	najveći tehnički proizvodni kapacitet
$q_m$	kg/s	maseni protok
$q_v$	$m^3$	volumni protok
$R_m$	J/kmolK	opća plinska konstanta (8314 J/kmolK)
$S_m$	kWh/dab+n	najveći tehnički kapacitet dobave iz terminala za UPP
$T$	K	temperatura
$T_c$	°C	temperatura
$t$	h	vrijeme
$UPP_m$	kWh/d	najveći tehnički kapacitet dobave iz UPP terminala
$V$	$m^3$	volumen
$V$	$Sm^3$	volumen
$W$	J	rad
$X$	%	vektor skaliranja opterećenja
$y$	%	molni udio

Grčke oznake

$\alpha$	W/m <sup>2</sup> K	koeficijent prijelaza topline
$\beta$	1/K	koeficijent toplinskog širenja
$\eta$	Pas	dinamička viskoznost
$\eta$	/	učinkovitost
$\kappa$	/	izentropski koeficijent
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	kinematička viskoznost

Bezdimenzijske oznake

<i>Gr</i>	/	<i>Grashof-ov broj</i>
<i>Pr</i>	/	<i>Prandtl-ov broj</i>
<i>Ra</i>	/	<i>Rayleigh-ov broj</i>
<i>Nu</i>	/	<i>Nusselt-ov broj</i>

**SAŽETAK**

Zbog svojeg manje štetnog utjecaja na okoliš u odnosu na ugljen i naftu, te određenih političkih i društvenih čimbenika, očekuje se rast potražnje za plinom u nadolazećim godinama. U toj potražnji za plinom javljaju se oscilacije zbog različitih klimatskih uvjeta zimi i ljeti te načina života ljudi. Stoga je razumno koristiti objekte poput skladišta plina, pomoću kojih se mogu pokrivati dnevne i sezonske fluktuacije u potražnji. Skladišta mogu biti nadzemna i podzemna. U ovome radu promatra se projekt vršnog podzemnog skladišta "Grubišno Polje", čija je izgradnja u tijeku. Na istoimenom eksploatacijom polju, dvije istražne bušotine su dale pozitivan rezultat o postojanju prirodnoga plin. Taj će se plin, u prvoj fazi projekta, djelomično iscrpiti i komprimirati u plinski transportni sustav Republike Hrvatske. Nakon iscrpljivanja, djelomično iscrpljeno ležište će se koristiti za privremeno spremanje plina iz sustava. Za procese početnog crpljenja plina te njegovog utiskivanja, koristi se kompresor pogonjen plinskim motorom. Radni volumen ležišta biti će oko 100 milijuna m<sup>3</sup>, a odlikovati će ga relativno veliki kapaciteti utiskivanja i povlačenja plina, što će omogućiti pokrivanje vršnih opterećenja u sustavu i sigurnost opskrbe plinom na području Republike Hrvatske. U sklopu matematičkog modela opisati će se najprije faza crpljenja ležišnog plina, a nakon toga i proces utiskivanja plina iz magistralnog plinovoda u ležište, s čime započinje faza skladištenja plina. U modelu se opisuju i pojave u kompresoru, što omogućuje određivanje ovisnosti potrebne snage plinskog motora o napunjenosti spremnika. Također, u sklopu matematičkog modela dana je usporedba rada skladišta kroz dva scenarija sa različitim razinama napunjenosti spremnika. Kada je razina napunjenosti spremnika visoka, tlak plina također doseže visoke vrijednosti pa povlačenje takvog plina znači energetski gubitak. Razlog za gubitak je u tome što se plin visokoga tlaka ne smije pustiti u plinovod čiji je tlak znatno niži, te je potrebno napraviti njegovu redukciju. Također, potrebna je veća snaga plinskog motora da bi se plin utiskivao u spremnik čija je razina napunjenosti visoka.

Ključne riječi: plin, ležište, podzemno skladište plina, kapacitet utiskivanja, kapacitet povlačenja, tlak, temperatura, kompresor, plinski motor, Grubišno Polje

**ABSTRACT**

Due to its less harmful impact on the environment compared to coal and oil, and certain political and social factors, the demand for gas is expected to grow in the coming years. In gas demand, oscillations occur due to different climatic conditions in winter and summer and also people's way of life. Therefore, it is reasonable to use facilities such as gas storage facilities, which can cover daily and seasonal fluctuations in demand. Storages can be aboveground and underground. In this paper, the project of the peak underground gas storage "Grubišno Polje" is observed, the construction of which is in progress. In the Grubišno Polje field, two exploration wells gave a positive result on the existence of natural gas. In the first phase of the project, this gas will be partially depleted and compressed into the gas transport system of the Republic of Croatia. After depletion phase, the partially depleted reservoir will be used to temporarily store gas from the system. For the processes of initial gas extraction and its injection, a compressor driven by a gas engine is used. The working volume of the reservoir will be about 100 million m<sup>3</sup>, and it will be characterized by relatively large capacities of gas injection and withdrawal, which will cover the peak loads in the system and security of gas supply in the Republic of Croatia. The mathematical model will first describe the phase of extraction of gas, and then the process of injecting gas from the main gas pipeline into the reservoir, which begins the phase of gas storage. The model also describes the phenomena in the compressor, which allows to determine the dependence of the required power of the gas engine on the filling of the tank. Also, as part of the mathematical model, a comparison of storage operation is given through two scenarios with different levels of tank filling. When the tank filling level is high, the gas pressure also reaches high values, so withdrawing such gas means energy loss. The reason for the loss is that high-pressure gas must not be allowed into a gas pipeline whose pressure is significantly lower, and it is necessary to reduce it. Also, more gas engine power is required to inject gas into a tank whose charge level is high.

Key words: gas, well, underground gas storage, injection capacity, deliverability, pressure, temperature, compressor, gas engine, Grubišno Polje

## 1. UVOD

Prema podacima "Međunarodne energetske agencije" (IEA), u posljednjih 40-tak godina potražnja za plinom je porasla je s 1900 milijardi m<sup>3</sup> (1973. godine) na 4925 milijardi m<sup>3</sup> (2020. godine), što je porast od 260%. Unatoč tome što političari, aktivisti i neki znanstvenici pozivaju na hitan prestanak korištenja svih oblika konvencionalnih goriva, to nije nimalo jednostavan zahvat jer iz njih potječe više od 80 % energije koja se koristi diljem svijeta. Jedan od razloga za to je politički, a odnosi se na interese zemalja koje obiluju zalihama ugljena, nafte i prirodnog plina, poput SAD-a, Rusije i bogatih država Bliskog istoka. Također, nerazumno je razmišljati o trenutnom prestanku korištenja plina koji u odnosu na ugljen i naftu ima značajno manji utjecaj na okoliš, te on može biti važan čimbenik u tranziciji na ekološki prihvatljivije izvore energije. Važno je spomenuti i situacije u siromašnim zemljama koje započinju svoj razvoj. Njima je potrebna energija koja je konstantna i lako dobavljiva. Rješenje za taj problem, ne treba tražiti u obnovljivim izvorima, zbog njihovih opće poznatih problema s niskom gustoćom energije i povremenom nedostupnošću, kada Sunce ne sija ili vjetar ne puše zadovoljavajućom brzinom. Zbog ovih razloga sasvim je logično očekivati daljnji rast potražnje za plinom u budućnosti, što potvrđuje i "Međunarodna energetska agencija". [1]

Diljem svijeta ljudi koriste plin za svoje svakodnevne potrebe poput grijanja prostorija i potrošne tople vode te kuhanja. Iz toga se lako može zaključiti kako će potreba za plinom biti najveća tijekom zimskih mjeseci, dok će ljeti biti značajno niža, što prikazuje sljedeći dijagram.



Dijagram 1. Dnevna potražnja za plinom po mjesecima[2]

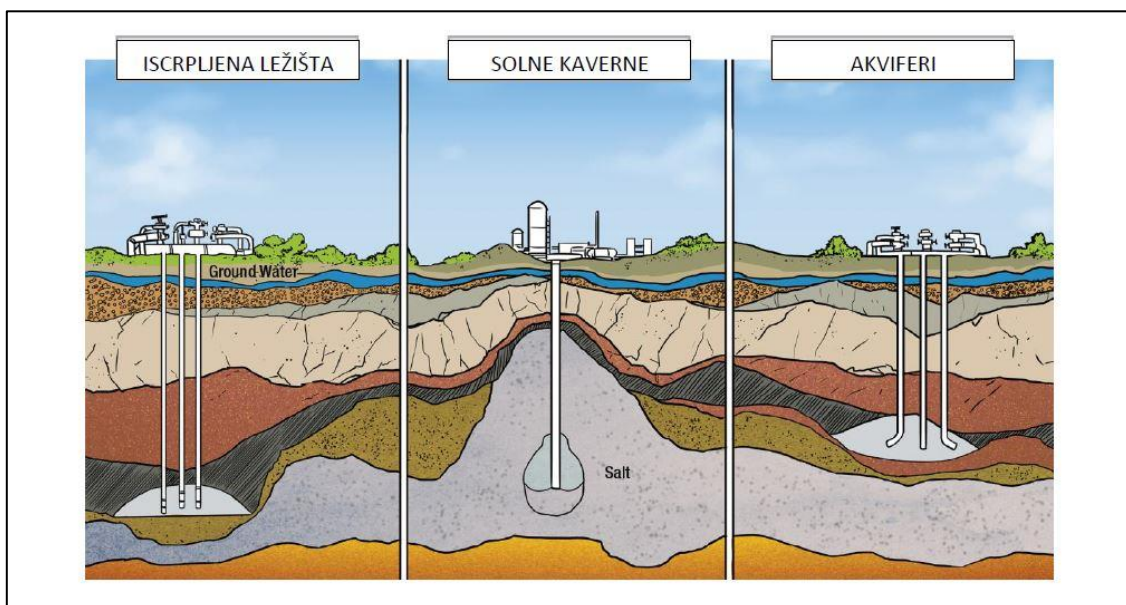
Iz prethodno navedene tvrdnje, koja je vidljiva i na slici, jasna je potreba za skladištenjem plina. U ljetnim mjesecima, pri manjoj potražnji i nižoj cijeni plina, skladišta se mogu puniti (ciklus utiskivanja), a njihovo pražnjenje (ciklus povlačenja) se provodi tijekom sezone grijanja. Osim što su važna za pokrivanje sezonske potražnje, skladišta plina imaju i druge odlike:

- Mogućnost pokrivanja dnevne (vršne) potražnje
- Ujednačenija proizvodnja plina
- Povoljnija cijena plina jer je satna dinamika dobave jednaka tijekom cijele godine
- Strateška rezerva plina
- Politički utjecaj države

Plin se može skladištiti u tekućem ili plinovitom stanju. Kada je u tekućem stanju naziva se ukapljenim prirodnim plinom, UPP, te se skladišti na terminalima poput onoga na Krku, koji je pušten u rad početkom godine.

U plinovitom stanju plin se skladišti podzemno, a u tu svrhu mogu se koristiti:

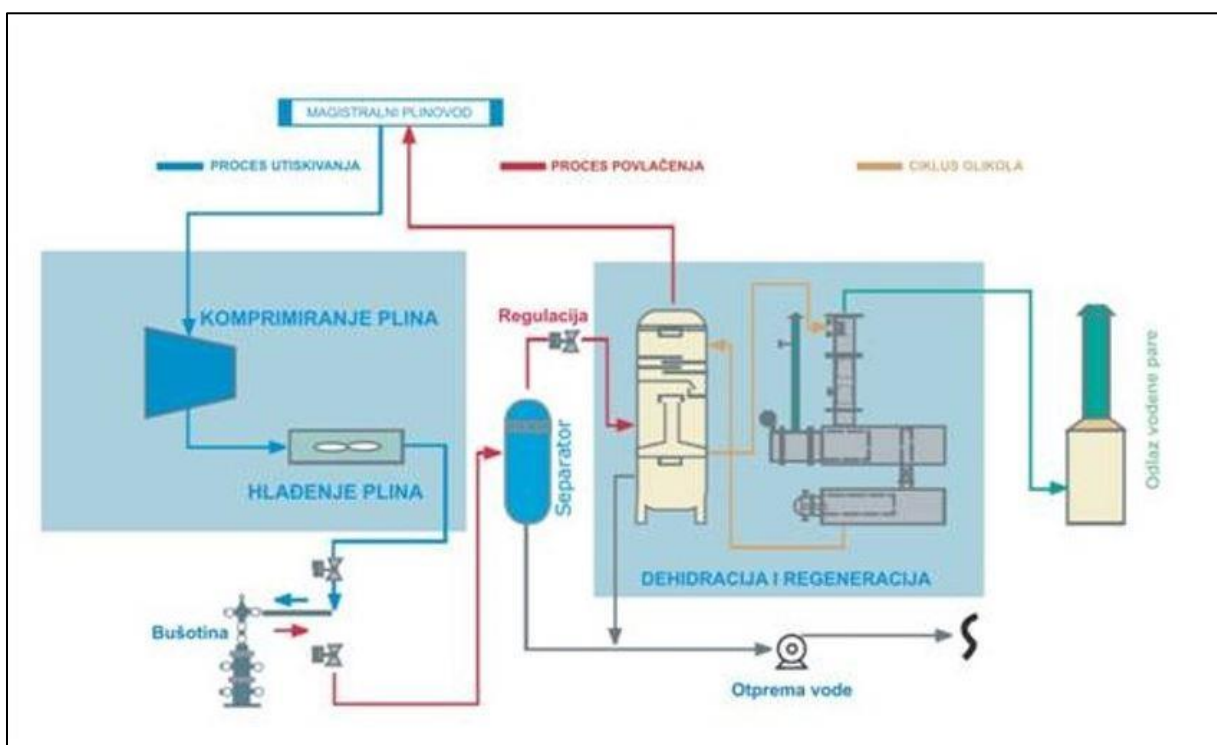
- Iscrpljena ležišta plina ili nafte
- Solne kaverne
- Napušteni rudnici
- Akviferi[2]



Slika 1. Tipovi podzemnog skladišta plina[2]



Najčešći oblik podzemnog skladišta plina su prethodno eksploatirana plinska ležišta. Razlog za to je što imaju već poznate karakteristike, zbog toga što je iz njih plin ranije crpljen. Kada se koriste naftna ležišta, za spremanje plina se koristi plinska kapa koja se nalazi iznad sloja nafte. Solne kaverne su umjetno izrađene pukotine nastale utiskivanjem vode u podzemne naslage soli. Povoljna svojstva soli omogućuju zatvaranje pukotina u tlu, što pogoduje skladištenju plina. Akviferi su podzemni kameni slojevi, u čijim se pukotinama nalazi voda. Nakon iscrpljivanja vode, moguće je u iste pukotine spremati plin, no taj je postupak značajno skuplji od ostalih.[2] Na sljedećoj slici prikazana je shema postrojenja koje je potrebno za rad podzemnog skladišta plina.



Slika 2. Jednostavna shema procesa u podzemnom skladištu plina[3]

Diljem svijeta, spremanje plina u podzemna skladišta odvija se više od stotinu godina, a započelo je u Kanadi početkom 20. stoljeća. Svjetski lider u korištenju ove tehnologije su SAD-e, dok se u Republici Hrvatskoj nalazi tek jedno ovakvo skladište, u mjestu Okoli, kraj Ivanić Grada. U sljedećoj tablici prikazan je broj i iznos radnog volumena podzemnih skladišta plina za odabrane države. [3]

Tablica 1. Podzemna skladišta plina u svijetu[3]

<b>Država</b>	<b>Broj podzemnih skladišta plina</b>	<b>Ukupni instalirani radni volumen (<math>10^6 \text{ m}^3</math>)</b>
SAD	442	127 186
Rusija	28	94 553
Ukrajina	13	32 130
Njemačka	51	20 404
Kanada	49	14 820
Kina	10	1 140
Hrvatska	1	553

Podzemno skladište plina "Okoli" ima radni volumen od 553 milijuna  $\text{m}^3$  te je sezonskog tipa, što znači da u njegovom slučaju ciklus utiskivanja traje od 1. travnja do 30. rujna, dok se plin povlači od 1. listopada do 31. ožujka. S obzirom da se u plinskom sustavu Republike Hrvatske javljaju velike fluktuacije u potražnji, pogotovo tijekom proljeća i jeseni, koje skladište "Okoli" ne može zadovoljiti, potrebno je izgraditi nova skladišta. [3] Tvrtka "Plinacro d.o.o.", koja je operator plinskog transportnog sustava u Republici Hrvatskoj, a ujedno i vlasnik tvrtke "Podzemno skladište plina d.o.o.", koja upravlja skladištem u Okolima, odlučuje o budućim projektima plinskog sektora u Republici Hrvatskoj. Tako je prije nekoliko godina donesena odluka o gradnji vršnog podzemnog skladišta plina u Grubišnom Polju, koje će biti središnja tema ovog diplomskog zadatka. [4] Projekt podzemnog skladišta plina „Grubišno Polje“ najprije će biti opisan teorijski, a kasnije će se prikazati matematički model koji će opisivati rad skladišta.

## 2. PODZEMNO SKLADIŠTE PLINA GRUBIŠNO POLJE

### 2.1. Motiv za izgradnju skladišta plina u Grubišnom Polju

Uredba Europske Unije 2017/1938, pod nazivom "Sigurnost opskrbe plinom u EU-i", propisuje obavezu, operatoru plinskog transportnog sustava ("Plinacro d.o.o."), omogućavanja stalnog dvosmjernog kapaciteta na svim prekograničnim povezivanjima između država članica te prilagođavanja transportnog sustava kako bi se omogućio protok plina u oba smjera. Plinski transportni sustav Republike Hrvatske povezan je sa sustavom Republike Slovenije dvosmjernim plinovodom, preko ulazne mjerne stanice (UMS) "Rogatec" i sa sustavom Republike Mađarske preko UMS "Dravaszerdahely/Donji Miholjac", također s dvosmjernim interkonekcijskim plinovodom. Unatoč dužem postojanju dvosmjernih plinovoda, tek je ove godine ostvaren protok iz Republike Hrvatske prema Sloveniji i Mađarskoj. Razlog za to se leži u niskim kapacitetima s hrvatske strane. Tako niski kapaciteti su ograničeni infrastrukturom, koju se planira mijenjati u nadolazećim godinama. Prema istoj uredbi, jednadžbom za izračun postotne vrijednosti N-1, propisuje se tehnički kapacitet infrastrukture za zadovoljavanje potražnje plina u slučaju infrastrukturnih problema, na dan najviše potražnje za plinom. Statistički, takva pojava se javlja jednom u 20 godina. Kriterij N-1 je zadovoljen kada je njegova izračunata vrijednost jednaka ili veća od 100%. U tom slučaju, plinski transportni sustav promatranog područja, ima kapacitet koji je dovoljan za pokrivanje potreba u danu najveće moguće potražnje za plinom.[1] U sljedećoj jednadžbi prikazan je način računanja vrijednosti N-1.

$$N-1 [\%] = \frac{E_{pm} + P_m + S_m + UPP_m - I_m}{D_{max}} * 100$$

Za jednadžbu vrijedi:

$D_{max}$  – ukupna dnevna potražnja za plinom u danu iznimno visoke potrošnje, koja se može javiti jednom u 20 godina

$E_{pm}$  – tehnički kapacitet ulaznih mjesta, osim proizvodnih postrojenja, terminala UPP-a i skladišta

$I_m$  – tehnički kapacitet najvećeg pojedinačnog plinskog objekta

$P_m$  – najveći tehnički proizvodni kapacitet (domaća proizvodnja)

$S_m$  – najveći tehnički kapacitet dobave iz terminala za UPP

$UPP_m$  – najveći tehnički kapacitet dobave iz terminala za UPP

U dokumentu, tvrtke "Plinacro d.o.o.", koji opisuje desetogodišnji plan razvoja plinskog transportnog sustava Republike Hrvatske (2021. – 2030.), za izračun vrijednosti N-1 koristili su se dostupni podaci za 2019. godinu, pa će isti biti upotrijebljeni i ovdje.

#### Ulazni podaci: 2019. godina

$$D_{\max} = 187 \text{ kWh/d}$$

$$E_{pm1} = 48,4 * 10^6 \text{ kWh/d} - \text{UMS "Rogatec"}$$

$$E_{pm2} = 69,8 * 10^6 \text{ kWh/d} - \text{UMS "Dravaszedahely"}$$

$$E_{pm} = E_{pm1} + E_{pm2} = 118,2 * 10^6 \text{ kWh/d}$$

$$I_m = 69,8 * 10^6 \text{ kWh/d} - \text{UMS "Dravaszedahely"}$$

$$P_m = 31,9 * 10^6 \text{ kWh/d}$$

$$S_m = 54,6 * 10^6 \text{ (zimski maksimum u skladištu plina "Okoli")}$$

Iz prikazanih podataka dobiva se vrijednost N-1, kako slijedi:

$$N-1 [\%] = \frac{118,2 + 31,9 + 54,6 - 69,8}{187} * 100 = 72,1\%$$

Dobivena vrijednost N-1, za 2019. godinu, manja je od 100%, što znači da nije ispunjen uvjet postavljen od strane Europske Unije. Zbog toga je, u svome desetogodišnjem planu razvoja, tvrtka "Plinacro d.o.o.", odlučila pokrenuti niz projekata čija bi realizacija omogućila zadovoljenje uvjeta N-1, postavljenom uredbom o sigurnosti opskrbe. Sljedeća tablica prikazuje ključne projekte za razvoj plinskog transportnog sustava Republike Hrvatske, za razdoblje od 2021. do 2030. godine.[4]

Tablica 2. Planirani projekti za razvoj plinskog transportnog sustava RH-e[4]

Planirana godina završetka projekta	Planirani projekti	Razina izvršenosti projekta	N-1
2021.	1. UPP terminal Krk 2. Plinovod "Zlobin-Omišalj"	Izgrađeno i pušteno u pogon.	100 %
2025.	1. Plinovod "Rakitje-Sotla"	Projekt u planu.	132 %
2026.	1. "Jadransko-Jonski" plinovod 2. Podzemno skladište plina "Grubišno Polje" 3. Interkonekcijski plinovod sa Republikom Srbijom	Započeta izgradnja podzemnog skladišta plina u Grubišnom Polju.  Ostali projekti u planu.	220 %
2029.	1. Plinovod "Zlobin-Slobodnica" 2. Kopneni UPP terminal	Projekti u planu.	314 %

Iz tablice je vidljivo, kako je izgradnjom terminala za UPP na Krku i pristupnog mu plinovoda, između Omišlja i Zlobina, ostvarena granična vrijednost N-1 od 100 %. Tim projektima je "Plinacro" ostvario sigurnost dobave plina na području Republike Hrvatske. Ostali projekti iz desetogodišnjega plana također su vrlo važni za dodatno osiguranje sigurnosti opskrbe. Jedan od njih je i ovdje promatrani projekt izgradnje vršnog podzemnog skladišta plina u eksploatacijskom polju "Grubišno Polje". [4]

## 2.2. Opis projekta

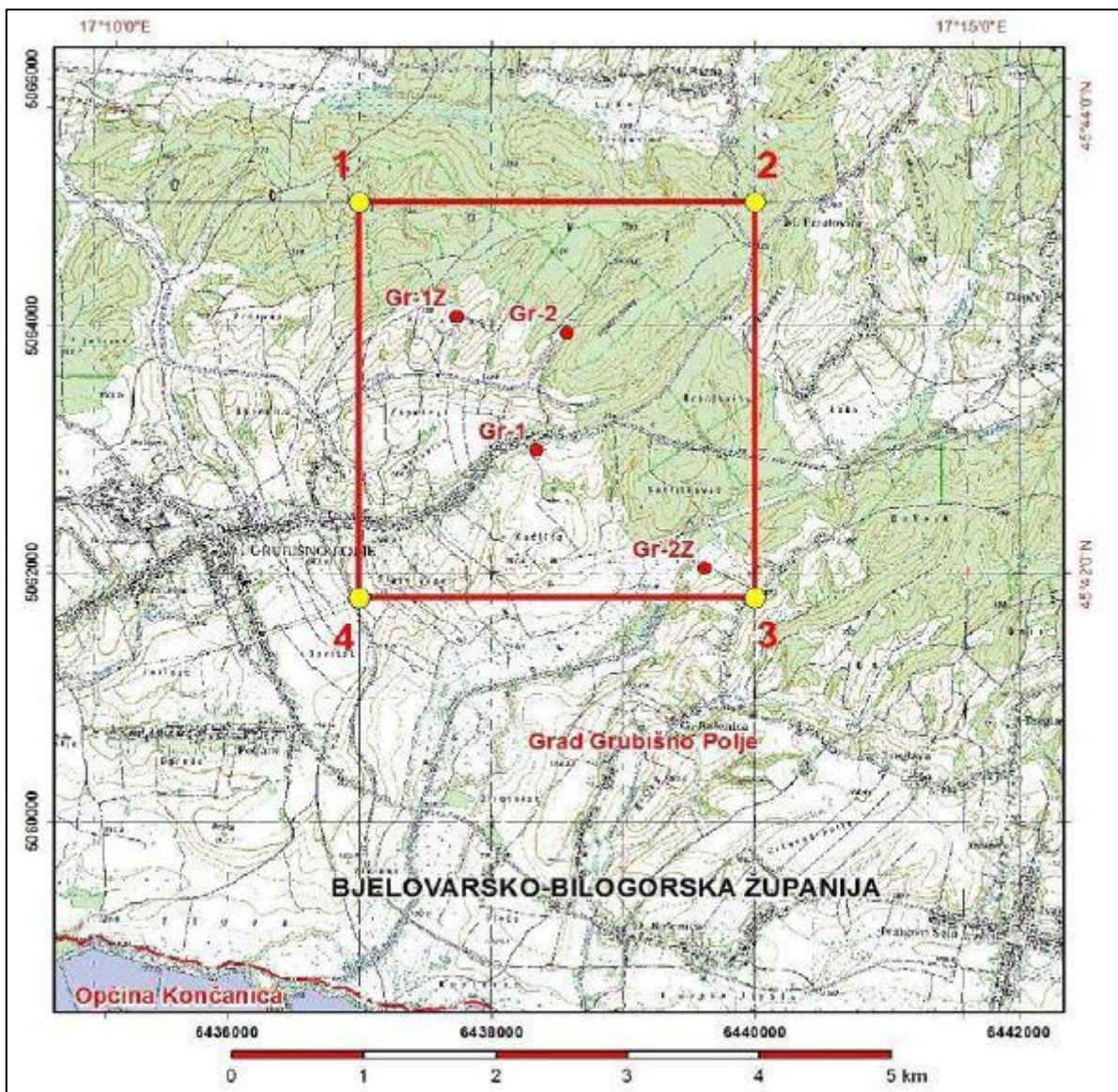
Projekt vršnog podzemnog skladišta u eksploatacijskom ležištu "Grubišno Polje" odvijati će se u dvije faze. S obzirom da ležište nikada nije bilo iscrpljivano, potrebno ga je djelomično iscrpiti, što čini prvu fazu projekta koja bi trebala započeti 2022. godine. Nakon iscrpljivanja do zadovoljavajuće razine, započinje druga faza koja je trajna, a odnosi se na korištenje ležišta u svrhu kratkotrajnog spremanja plina iz transportnog plinovoda. Očekuje se da će radni volumen spremnika iznositi oko 100 milijuna m<sup>3</sup>.

Kao što je i ranije navedeno, podzemno skladište plina u Grubišnom Polju će imati primarnu ulogu u pokrivanju vršne potražnje za plinom u Republici Hrvatskoj. Također, povećati će

fleksibilnost cijelog transportnog plinskog sustava, omogućiti optimalno korištenje već postojećeg podzemnog skladišta plina u eksploatacijskom ležištu "Okoli" te povećati sigurnosti opskrbe plinom u Republici Hrvatskoj. [3]

### 2.3. Lokacija

Eksploatacijsko polje "Grubišno Polje" nalazi se sjeveroistočno od istoimenog grada, i jedno je od desetak ležišta u Bjelovarsko-bilogorskoj županiji, a prikazano je na sljedećoj slici.



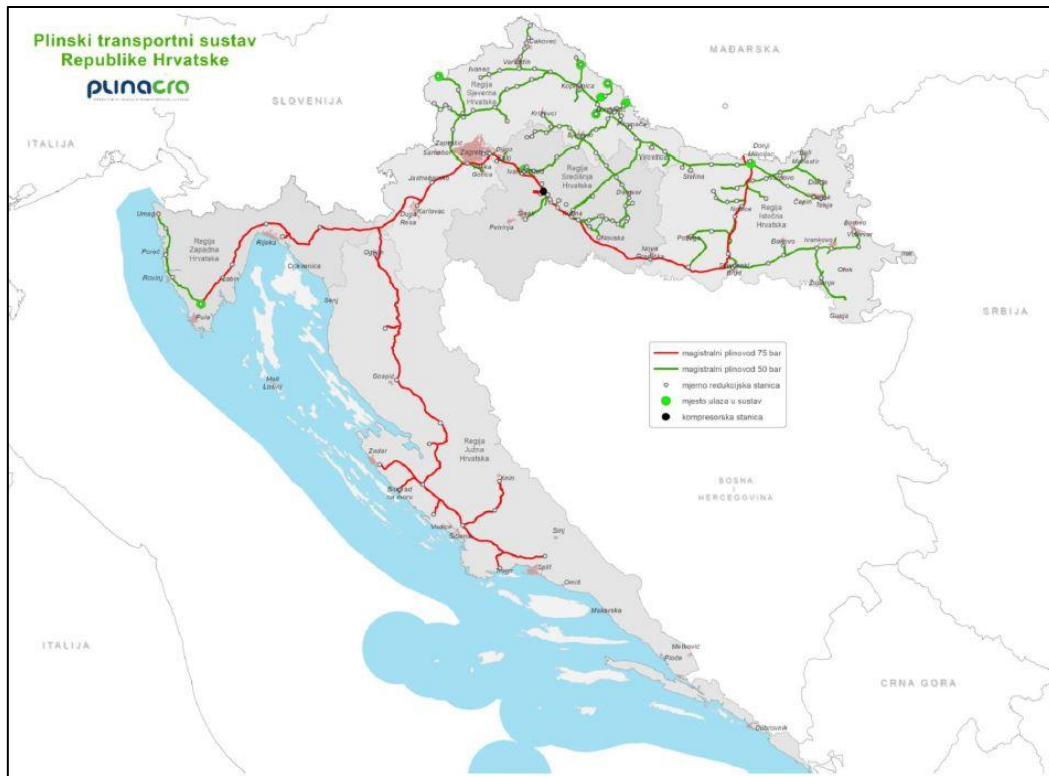
Slika 3. Eksploatacijsko ležište "Grubišno Polje"[5]

Na polju je izrađeno pet istražnih bušotina ("Gr-1", "Gr-2", "Gr-3", "Gr-1z" i "Gr-2z") od kojih su dvije ("Gr-1z" i "Gr-2z") potvrdile postojanje ležišta prirodnog plina. Sljedeća slika pokazuje karakteristike plina u ležištu "Gr-1z".

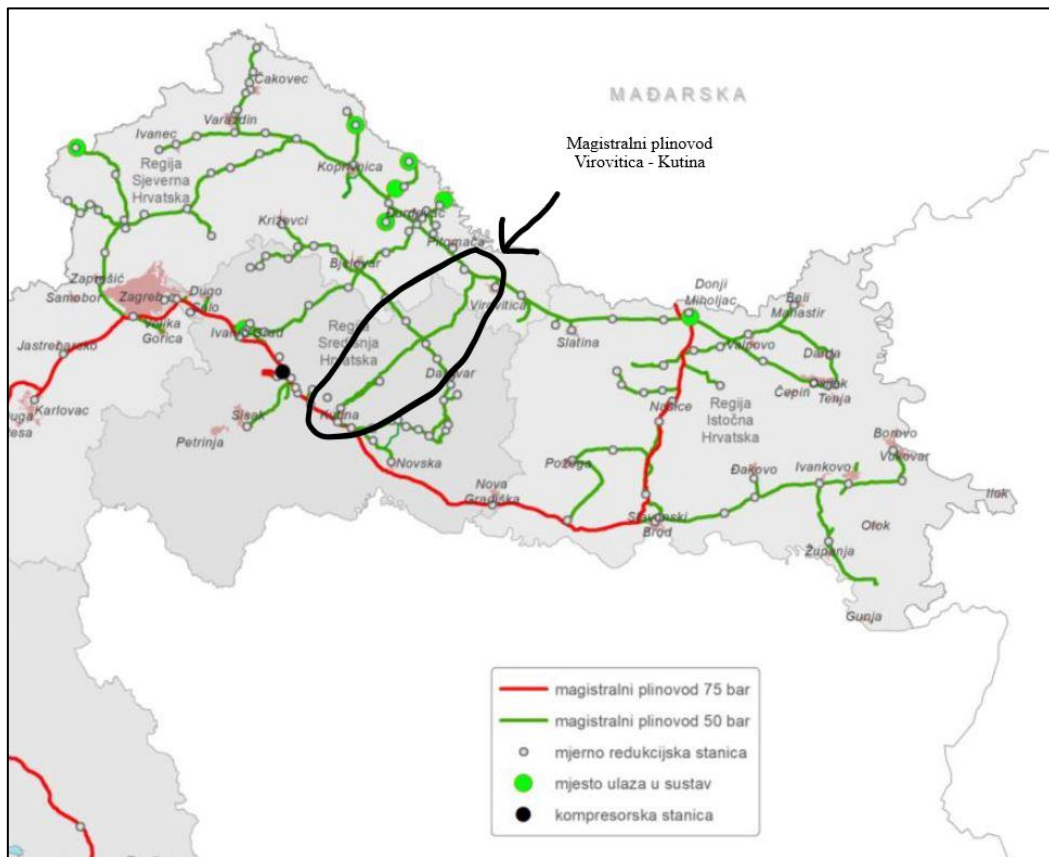
HRN EN ISO 6975:2008			Naziv uzorka: <b>GR-1Z - uzorak 1</b>	
<b>Sastav</b>	<b>Mas % (bez zraka)</b>	<b>Mol % (bez zraka)</b>	Mjesto uzorkovanja:	separator
N <sub>2</sub>	25,991	17,485	Datum uzorkovanja:	17.3.2015.
CO <sub>2</sub>	1,775	0,760	Datum dostave uzorka:	23.3.2015.
C <sub>1</sub>	68,277	80,203	Datum ispitivanja:	25.3.2015.
C <sub>2</sub>	1,200	0,752	Uvjeti uzorkovanja:	T=25 °C; p=12 bar; t=10:10h
C <sub>3</sub>	0,508	0,217	Ev. broj uzorka:	381
i-C <sub>4</sub>	0,756	0,245	<b>Primjedba:</b> Usporedan uzorak plina uzorkovan je u sulfinertnu bocu. Na tom uzorku napravljena je analiza metodom određivanja sumpornih spojeva uporabom plinske kromatografije (HRN EN ISO 19739:2008), pri čemu je dobiveno da uzorak ne zadrži sumporne spojeve.	
n-C <sub>4</sub>	0,241	0,078		
i-C <sub>5</sub>	0,348	0,091		
n-C <sub>5</sub>	0,096	0,025		
C <sub>6</sub>	0,192	0,042		
C <sub>7</sub>	0,207	0,039		
C <sub>8</sub>	0,182	0,030		
C <sub>9</sub>	0,177	0,026		
C <sub>10</sub>	0,050	0,007		
HRN EN ISO 6976:2008				
			Donja ogrjevna vrijednost:	28,732 MJ/m <sup>3</sup> (15°C)
			Wobbe-ova značajka:	39,491 MJ/m <sup>3</sup> (15°C)
			Molarna masa:	18,845 kg/kmol
			Gustoća:	0,7984 kg/m <sup>3</sup> (15°C)
			Relativna gustoća:	0,6515 (zrak=1)
			Specifična plinska konstanta:	441,20 J/(kg K)

Slika 4. Karakteristike plina iz bušotine "Gr-1z"[5]

Ukupne rezerve plina u ležištu "Grubišno polje" iznose 198,6 milijuna m<sup>3</sup>. Ostale bušotine su napuštene, uz provođenje potrebnih radova kako bi se priroda vratila u prvobitno stanje. Cijelo polje ima povoljan položaj jer se nalazi u neposrednoj blizini magistralnog plinovoda "Virovitica – Kutina". Sljedeće slike prikazuju mrežu plinovoda u Republici Hrvatskoj i mrežu plinovoda u kontinentalnom dijelu Republike Hrvatske s naglaskom na dionicu između Virovitice i Kutine. [5]



Slika 5. Plinski transportni sustav RH-e, stanje iz 2019. Godine[4]



Slika 6. Magistralni plinovod "Virovitica - Kutina"[5]



## 2.4. Faza I – djelomično crpljenje postojećih rezervi u ležištu

U prvoj fazi, planira se iscrpljivanje oko 150 milijuna  $\text{Sm}^3$  plina iz postojećih rezervi. Ostatak, odnosno neiscrpljeni dio plina ima ulogu tzv. "plinskoga jastuka". To je volumen plina u ležištu potreban za upravljanje budućim skladištem i održavanje minimalnog potrebnog tlaka unutar skladišta. [7] U prethodnom poglavlju prikazane su karakteristike ležišnog plina u eksploatacijskom polju "Grubišno Polje". Važno je promotriti molni sastav plina, za koji je značajan udio inertnih plinova: dušik ( $\text{N}_2$ ) s udjelom od 17,485% i ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ) s udjelom od 0,76%. Prema dokumentu "Izmjene i dopune općih uvjeta opskrbe plinom" (NN 74/17) navodi se kako udio inertnih plinova u plinu koji se koristi u transportnom sustavu ne smije prelaziti 7%. Zbog toga, ležišni plin nije pogodan za direktno utiskivanje u plinski transportni sustav, već ga je potrebno prilagoditi. To se radi na način da se on miješa sa plinom iz transportnog sustava koji se dovodi na lokaciju postrojenja u Grubišnom Polju. On se dovodi putem plinovoda koji će biti za tu prigodu izgrađen te povezuje eksploatacijsko polje s magistralnim plinovodom "Virovitica – Kutina". [8][9] U sljedećoj tablici prikazan je molni sastav tog plina.

Tablica 3. Molni sastav plina iz plinskog transportnog sustava RH-e[8]

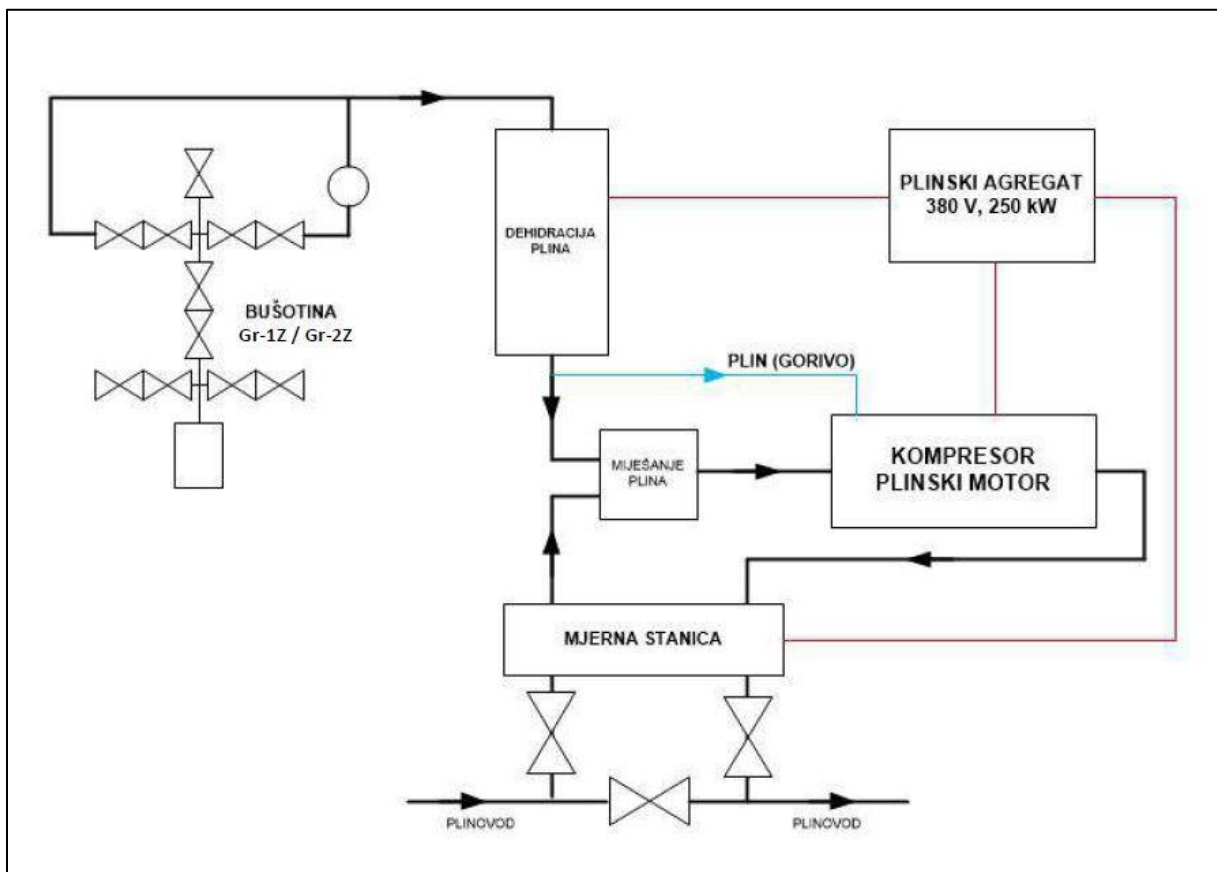
Komponenta	Oznaka	Molni udio, $y_i$ [%]
$\text{C}_1$	$\text{CH}_4$	95,82 %
$\text{C}_2$	$\text{C}_2\text{H}_6$	2,46 %
$\text{C}_3$	$\text{C}_3\text{H}_8$	0,08 %
n- $\text{C}_4$	n- $\text{C}_4\text{H}_{10}$	0,01 %
i- $\text{C}_5$	i- $\text{C}_5\text{H}_{12}$	0 %
n- $\text{C}_6$	n- $\text{C}_6\text{H}_{14}$	0 %
i- $\text{C}_7$	i- $\text{C}_7\text{H}_{16}$	0 %
$\text{C}_{6+}$	$\text{C}_{6+}$	0 %
$\text{CO}_2$	$\text{CO}_2$	0,02 %
$\text{N}_2$	$\text{N}_2$	1,61 %

Nakon crpljenja ležišnog plina i dovođenja plina iz sustava, oni se zamiješaju u omjeru 1:6. Točnije oko 150 milijuna  $\text{Sm}^3$ , iscrpljenog plina, će se miješati sa 900 milijuna  $\text{Sm}^3$  plina iz magistralnog plinovoda "Virovitica – Kutina".[7] To će rezultirati novim sastavom plina koji je prikazan u sljedećoj tablici.

Tablica 4. Molni sastav plina dobivenog miješanjem[8]

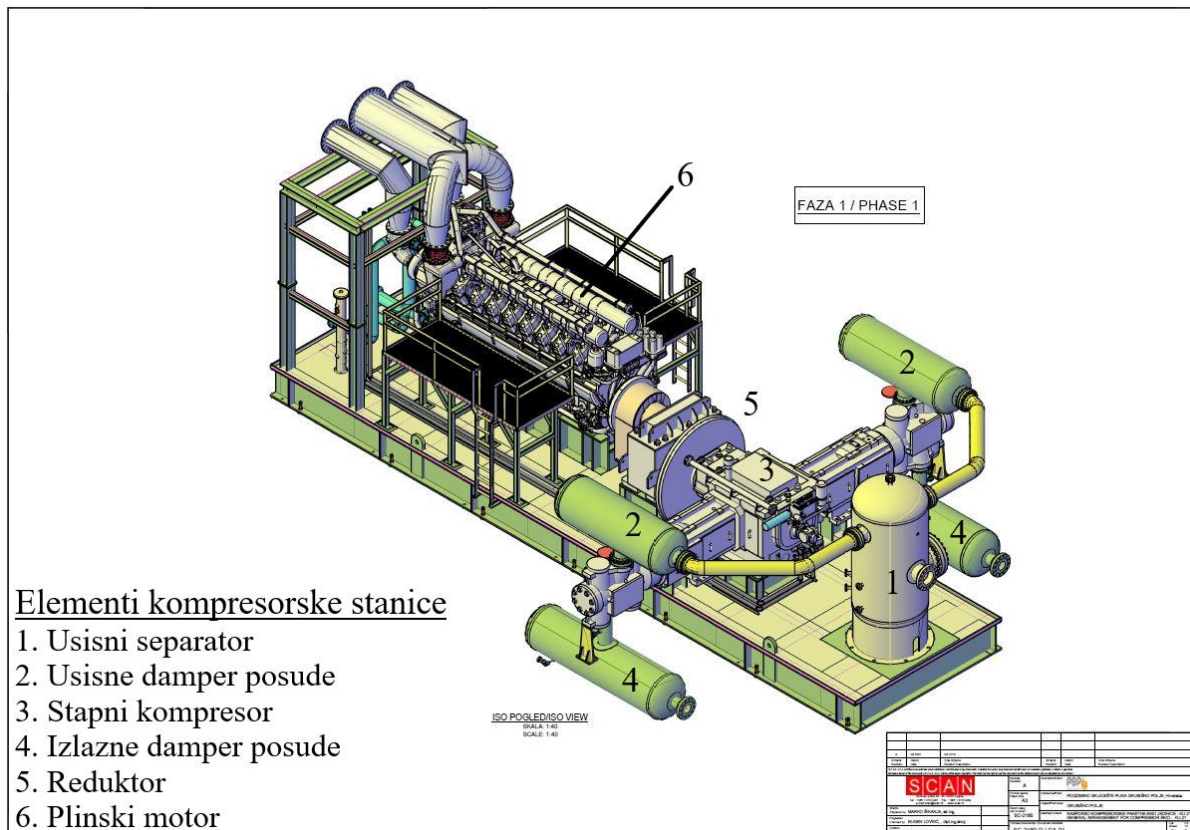
Komponenta	Oznaka	Molni udio, $y_i$ [%]
C <sub>1</sub>	CH <sub>4</sub>	93,461 %
C <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2,224%
C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	0,106 %
n-C <sub>4</sub>	n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	0,02 %
i-C <sub>5</sub>	i-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	0,033 %
n-C <sub>6</sub>	n-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	0,003 %
i-C <sub>7</sub>	i-C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	0,011 %
C <sub>6+</sub>	C <sub>6+</sub>	0,007 %
CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	0,127 %
N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	4,007 %

Schema postrojenja u prvoj fazi projekta je prikazana na sljedećoj slici.



Slika 7. Shema postrojenja u fazi crpljenja ležišnog plina[5]

Prikazano postrojenje nalaziti će se u neposrednoj blizini bušotine "Gr-1z", zbog njezinog povoljnog položaja. Naime, ona se nalazi na udaljenosti od 300-tinjak metara od dionice magistralnog plinovoda "Virovitica – Kutina", dok je bušotina "Gr-2z" na udaljenosti od oko 3500 metara od iste. Obje bušotine će s plinskom stanicom biti povezane sa zasebnim priključnim plinovodima. Na ulazu u plinsku stanicu nalaziti će se razdjelnik bušotina nakon kojega se priključni plinovodi spajaju u zajednički. Nadalje, plin je potrebno osušiti što se provodi u dva stupnja. U prvome, plin se odvodi u separator koji služi za odvajanje plina od vode koja se nalazi u njemu. Ta separirana voda odvodi se privremeno prema rezervoaru tehnološke kanalizacije (RTK spremnik), a nakon pražnjenja spremnika pomoću cisterne trajno u posebno postrojenje u sklopu podzemnog skladišta plina "Okoli". Nakon separacije plin se odvodi prema dehidracijskoj koloni čija je uloga da ga dodatno osuši (drugi stupanj sušenja). Plin u dehidracijskoj koloni struji protusmjerno u odnosu na radni medij, trietilen glikol. To je kemijski spoj koji ima izraženo svojstvo hidrofilnosti, to jest na sebe veže molekule vode. Nakon izlaska iz dehidracijske kolone, glikol se u posebnom spremniku zagrijava kako bi voda iz njega isparila, te dodatno ohlađuje u izmjenjivaču topline kako bi se stvorili uvjeti za njegov ponovni ulazak u destilacijsku kolonu. Bušotinski plin se onda odvodi u mješalište gdje se miješa na način koji je objašnjen ranije. Iz magistralnog plinovoda se u mješalište dovodi plin pri tlaku od 32 do 37 bar i kapacitetom od 40 000 m<sup>3</sup>/h do 60 000 m<sup>3</sup>/h. [5] Novi, izmješani plin odvodi se prema glavnom dijelu ovog plinskog postrojenja, a to je kompresorska stanica, čiji je model prikazan na sljedećoj slici.



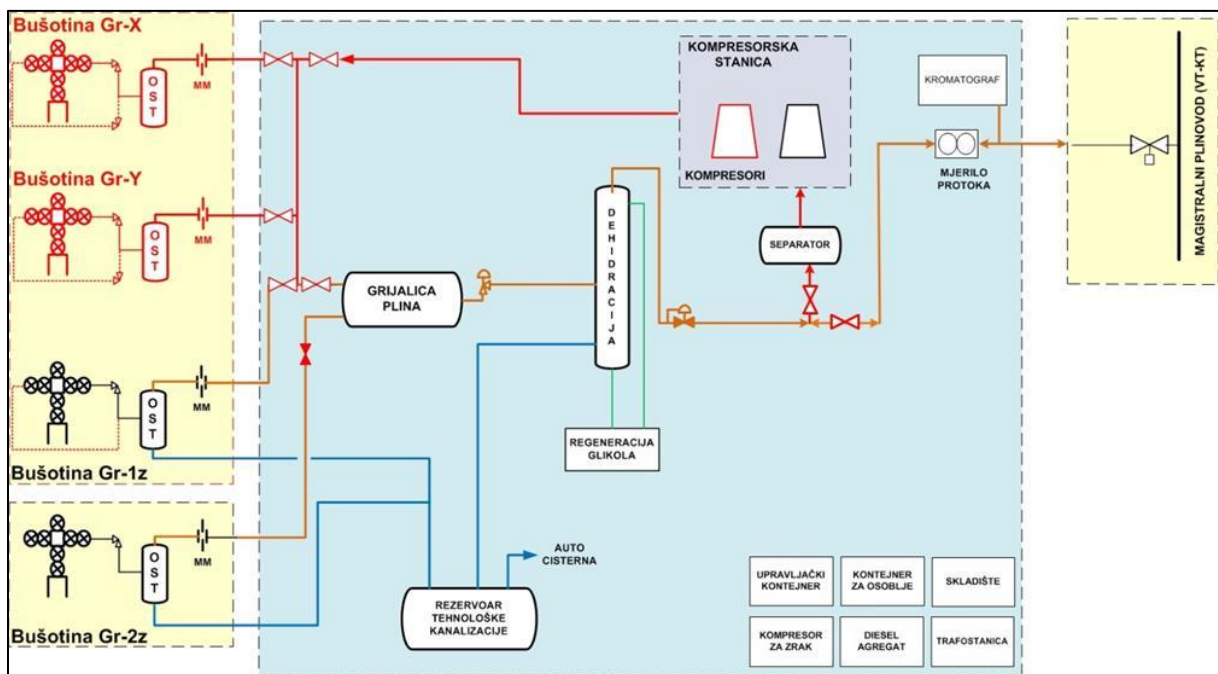
Slika 8. Trodimenzionalni model kompresorskog postrojenja [10]

Na ulasku u kompresorsko postrojenje, plin ponovno ulazi u separator koji sadrži element pod nazivom demister, čija je uloga odvojiti sitne kapljice vlage koje su još uvijek vezane na plinsku smjesu. Nakon usisnog separatora, preko cjevovoda i ulaznih damper posuda plin ulazi u dvocilindrični stapni kompresor, čija je uloga da povisi tlak plina iznad vrijednosti tlaka u magistralnom plinovodu. Tlak na ulazu u izlazne damper posude će biti između 33 i 38 bar, ovisno o usisnom tlaku plina iz magistralnog plinovoda pri ulazu u mješalište. Kompresor je pogonjen pomoću plinskoga motora, a brzina vrtnje mu je regulirana reduktorom između njih. Kao pogonsko gorivo za motor koristi se plin doveden iz plinovoda, jednak onome koji se miješa sa ležišnim. Osim za pogon motora, plin iz magistralnog plinovoda se dovodi i plinskom agregatu, koji omogućava električnu energiju za rad strojeva, opreme i upravljačkih sustava. S obzirom da se tijekom kompresije plina povisuje njegova temperatura, potrebno ga je ohladiti što će se izvoditi pomoću zračnog hladnjaka, koji se nalazi iza kompresorske stanice. Prije nego što napusti postrojenje, plin se još jednom podvrgava procesu separacije, u izlaznom vertikalnom separatoru. Nakon prolaska kroz separator, plin se spojnim plinovodom

odvodi u magistralni plinovod "Virovitica – Kutina", čime se zaokružuje priča o prvoj fazi projekta izgradnje podzemnog skladišta plina u eksploatacijskom ležištu "Grubišno Polje". Potrebno je i spomenuti kako se na ulaznom i izlaznom spojnim plinovodu konstantno mjeri protok plina te kromatografom utvrđuje njegova kvaliteta, što prikazuje i shema. [5]

## 2.5. Faza II – Vršno podzemno skladište plina Grubišno Polje

Nakon faze iscrpljivanja ležišta, potrebno je napraviti određene preinake na postrojenju, kao što je zamjena damper posuda i cilindara kompresora, zbog novih radnih uvjeta.[7] Ova faza se može podijeliti na dva dijela koji se međusobno izmjenjuju tijekom sezone grijanja: utiskivanje plina i njegovo naknadno povlačenje, a oba su prikazana u sljedećoj shemi.



Slika 9. Shema postrojenja u drugoj fazi projekta[3]

Bušotine, "Gr-X" i "Gr-Y", označene crvenom bojom, su one potencijalne koje će se dodatno izraditi unutar postojećih bušotinskih krugova, "Gr-1z" i "Gr-2z". Ti bušotinski krugovi će biti pretvoreni u bušotinske platforme budućih radnih bušotina. Očekuje se da će bušotine "Gr-1z" i "Gr-2z", koje su u prvoj fazi služile za crpljenje ležišnog plina, preuzeti ulogu kontrolno – mjernih bušotina. [5] U sljedećim potpoglavljima govori se o utiskivanju plina u podzemno skladište plina i njegovom kasnijem povlačenju.

### 2.5.1. Utiskivanje plina u skladište

Kompresorska stanica će i u slučaju utiskivanja plina u skladište imati važnu ulogu. Nakon dovođenja plina iz magistralnog plinovoda, kontrolira mu se sastav pomoću kromatografa, te mu se mjere protok, tlak i temperatura, kao i u prvoj fazi. Tlak plina na ulazu u plinsku stanicu ima raspon od 30 do 40 bar, dok mu je temperatura oko 15°C. Na ulazu u kompresorsku stanicu, prolazi kroz separator, koji mu uklanja vlagu. Vлага zadržana u separatoru, odvodi se prema RTK spremniku, koji je njegovo privremeno skladište. Iz separatora plin ulazi u zamijenjene usisne damper posude, iz kojih prestrujava u cilindre kompresora. Režimu utiskivanja, potrebni su viši tlakovi, pa se tlak nakon kompresije kreće u području od 40 do 120 bar. Tako se stlačeni plin, preko zamijenjenih izlaznih damper posuda odvodi u zračni hladnjak, koji ga hladi s temperature više od 100 °C, na 50 °C. Tako ohlađeni plin, se u izlaznom separatoru još jednom čisti od vlage i nakon prolaska kroz razdjelnik bušotina sprema, putem novih radnih bušotina, u ležište. Sada je jasan motiv za zamjenu damper posuda u odnosu na fazu crpljenja plina. Tijekom procesa utiskivanja javljaju se viši tlakovi koji sa stajališta čvrstoće zahtijevaju deblje stijenke na posudama. Na kraju opisa procesa utiskivanja plina u skladište, treba reći kako je nazivni kapacitet utiskivanja jednak 1,4 milijuna Sm<sup>3</sup> dnevno. [8]

### 2.5.2. Povlačenje plina iz skladišta

U režimu povlačenja plina ne koristi se kompresorska stanica, jer je njegov tlak odmah u početku značajno veći od onoga u magistralnom plinovodu. U skladu sa shemom, plin će se nakon prolaska kroz razdjelnik bušotina, proći kroz separator u kojemu će iz njega izdvojiti tekućina. S obzirom da prosječni tlak u spremniku iznosi oko 90 bar, potrebno ga je sniziti prije ulaska plina u plinovod. Za tu svrhu se koristi regulacijski ventil, nakon kojega je tlak plina u području onoga u plinovodu, ali ipak nešto viši kako bi se mogao ostvariti njegov tok u plinovod. Osim pada tlaka, u ventilu se javlja i pad temperature. Taj pad temperature je potencijalno opasan za proces jer može prouzročiti zaleđivanje instalacija, ako plin dostigne temperaturu leđišta. Zbog toga će se plinu, prije dolaska do regulacijskog ventila, povisiti temperatura u grijalici. Slično kao i fazi crpljenja, plin se nakon ventila odvodi prema dehidracijskoj koloni gdje će se potpuno ukloniti vлага iz njega, koristeći svojstvo hidrofilnosti radnog medija glikola. Nakon prolaska kroz dehidracijsku kolonu plin se odvodi prema mjernoj stanici gdje mu se utvrđuje potrebni parametri prije njegovog tlačenja u

plinovod. Tijekom procesa povlačenja plina moguće je ostvariti protok od 100 000 m<sup>3</sup>/h, što je jednako 2,4 milijuna Sm<sup>3</sup> dnevno. [7]

### 3. MATEMATIČKI MODEL

Matematičko modeliranje skladišta plina je izvedeno po uzoru na konfiguraciju podzemnog skladišta plina "Grubišno Polje", a fokus modeliranja će biti na procesima koji se događaju u ležištu i kompresoru te stanjima koje plin poprima zbog njih. Ovo poglavlje će biti podijeljeno u tri potpoglavlja. U prvome će se opisati dinamika ležišnog plina tijekom faze crpljenja, njegovo miješanje s plinom iz magistralnog plinovoda te komprimiranje nastale mješavine u kompresoru. Drugo poglavlje će prikazivati dinamiku smjese u ležištu tijekom procesa utiskivanja plina iz plinovoda, do potpune napunjenosti spremnika. Također, kao i kod crpljenja, promatrati će se proces komprimiranja plina u kompresoru prije utiskivanja u ležište (spremnik). U trećem dijelu matematičkog modela, suprotstavljaju se dva scenarija. U prvom scenariju početna napunjenost spremnika je 20%, a u drugom 80%. Za oba scenarija prikazati će se dinamika pražnjenja i punjenja u skladu s odabranim profilima volumenskog protoka, tijekom hladnih i toplih vremenskih uvjeta. Svrha njihove usporedbe je ishođenje ideja čije bi implementiranje dovelo do optimalnog korištenja spremnika. Treba naglasiti kako će ovaj matematički model prikazivati pojednostavljenu verziju stvarne dinamike skladišta, uz korištenje proizvoljnih uvjeta i parametara. Dio podataka potrebnih za modeliranje je preuzet iz projekta [7], dok su neki odabrani proizvoljno. Također, valja spomenuti kako je za potrebe proračuna korišten računalni program MATLAB.

#### 3.1. Crpljenje rezervi ležišnog plina

Faza crpljenja dijela ležišnog plina je nužan uvjet za uvođenje promatranog ležišta u Grubišnom Polju u plinski transportni sustav. Razlog za to je previsok molni udio inertnih plinova ( $N_2$  i  $CO_2$ ) u ležišnom plinu što je prikazano ranije na Slici 4. Zbog toga se od ukupno dostupnog plina ( $198,6 * 10^6 \text{ Sm}^3$ ), crpi približno  $150,57 * 10^6 \text{ Sm}^3$ . Iscrpljeni plin se miješa s plinom iz magistralnog plinovoda u omjeru 1:6, kako bi se udio inertnih plinova smanjio do zadovoljavajuće vrijednosti ( $< 7\%$ ). Također, iscrpljivanjem i naknadnim utiskivanjem (prikazati će se u sljedećem poglavlju) omogućiti će se da i preostali ležišni plin dobije zadovoljavajuću kvalitetu.

Kako bi se moglo startati s proračunom, potrebno je poznavati početne uvjete tlaka i temperature. Prema projektu je odabrana početna temperatura u ležištu, u iznosu od  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , dok je za iznos početnog ležišnog tlaka uzeta vrijednost od 145 bar.



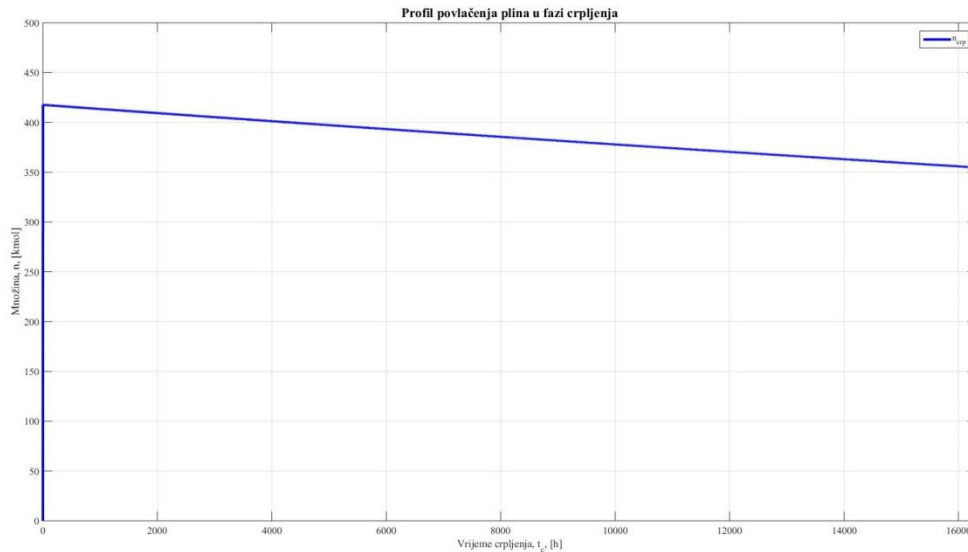
Sa stajališta proračuna računanje s volumenom izraženim u  $\text{Sm}^3$ , nije prikladno jer se on odnosi na volumen koji plin zauzima pri standardnim uvjetima tlaka i temperature koji iznose:  $p_s = 1 \text{ bar}$  i  $T_s = 288 \text{ K}$  ( $15^\circ\text{C}$ ). Zato je zgodno umjesto s volumenom, proračun izvršavati preko množine ili mase pline. U ovom proračunu uglavnom će se koristiti množina plina. Pa tako, u samom početku moguće je izračunati stvarni volumen ležišta, koji je uvijek konstantan. To je prikazano sljedećim jednadžbama.

$$n_{ležp} = \frac{p_s * V_{ležp}}{Rm * T_s}$$

Izračunata množina predstavlja množinu plina koji se nalazi u ležištu prije početka faze crpljenja. Iz nje se lako, uz uvjete ležišta, dobiva njegov stvarni volumen.

$$V_{lež} = \frac{n_{ležp} * Rm * T_{lež}}{p_{lež}} = 1,5837 * 10^6 \text{ m}^3$$

Kako bi se moglo dinamički promatrati proces crpljenja potrebno je zadati profil crpljenja plina. S obzirom da je poznat volumen koji će biti iscrpljen, analogno prethodnim jednadžbama i uvjetima u ležištu dobiva se vrijednost množine plina koja će biti povučena iz ležišta tijekom ove faze projekta, te ona iznosi  $n_{cp} = 6,2883 * 10^6 \text{ kmol}$ . Poznata je također i maksimalna dobava plina, odnosno kapacitet koji kompresor može crpiti tijekom ove faze, te iznosi  $q_{vch} = 10000 \text{ Sm}^3/\text{h}$ . Analogno, prethodnim izračunima, dobiva se iznos maksimalne množine plina koja se može crpiti u jednom satu rada kompresora te iznosi  $n_{ch} = 417,6356 \text{ kmol}$ . Kako bi odabrani profil povlačenja plina iz ležišta, bio što bliže stvarnosti, potrebno je obratiti pozornost na način rada kompresora. Poznato je da stepni kompresori, koji će se koristiti i u ovom projektu, zbog svoje izvedbe imaju gubitke zbog tzv. štetnog volumena. To je volumen između gornje mrtve točke (stap u nju dolazi kada komprimira plin) i dijela stijenke cilindra, u kojem se nalaze usisni i ispušni ventili, a njih stap ne smije doticati. Zato u tom dijelu cilindra zaostaje plin koji ne može biti istisnut u tlačni vod, te se s vremenom smanjuje dobava samog kompresora. Na sljedećoj slici prikazan je odabrani profil povlačenja plina u fazi crpljenja,  $n_{crp}$ .



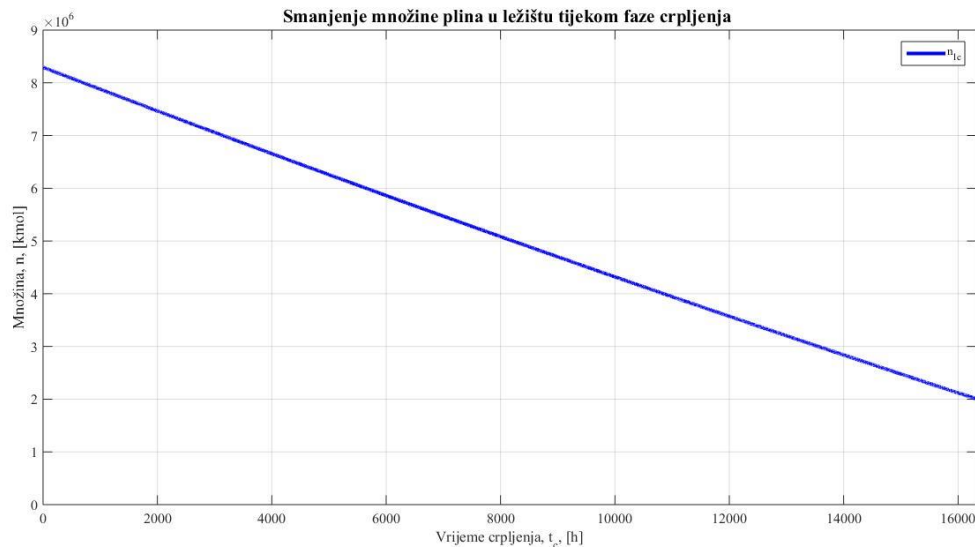
Dijagram 2. Profil povlačenja plina u fazi crpljenja

Jednostavnim izračunom, dolazi se to podatka o vremenu trajanja faze crpljenja dijela ležišnog plina, te ono iznosi 680 dana, odnosno  $t_c = 16320$  h. Vrijeme je u svim proračunima prikazano u satima, jer se time omogućuje veći broj vremenskih trenutaka u kojima se prati ponašanje plina, zbog čega se dobivaju točniji rezultati te su mogući jasniji dijagramski prikazi. Jasno je kako će tijekom opisivanja faze crpljenja, promatrane varijable biti prikazivane u vektorskom obliku s 16320 članova. Nakon odabranog profila crpljenja, korištenjem sljedećeg postupka dobiva se vektor koji pokazuje smanjenje množine ležišnog plina u ovisnosti o vremenu crpljenja.

Za  $i = 1$ , vrijedi  $n_{lc}(i) = n_{ležp}$ , gdje  $i$  označava vektorski član, a  $n_{lc}$  je vektor množine ležišnog plina. Za  $i=2:16320$ , vrijedi sljedeća jednačba:

$$n_{lc}(i) = n_{lc}(i-1) - n_{crp}(i)$$

Na sljedećoj slici prikazano je smanjenje množine plina u ležištu, tijekom faze crpljenja.



Dijagram 3. Smanjenje množine plina u ležištu tijekom faze crpljenja

Tijekom crpljenja, na zaostali plin u ležištu utječu različiti faktori te mu se u stvarnosti mijenjaju svi parametri osim volumena, jer on zauzima nepromjenjivi volumen ležišta. Tako stvarni problem teško je opisati, pa se u svrhu što kvalitetnijeg shvaćanja ponašanja plina, stvarnost opisuje modelima na temelju ravnotežnih i idealiziranih zakonitosti iz termodinamike.

Model crpljenja se sastoji od 3 promjene stanja koje plin doživljava u svakom satu:

- I. Fiktivno smanjenje volumena plina uslijed crpljenja uz  $p=\text{konst.}$  i  $T=\text{konst.}$
- II. Izentropska ekspanzija plina od novonastalog volumena do volumena ležišta
- III. Izohorno zagrijavanje plina zbog razlike temperatura u odnosu na  $T_{ZK}$

Ovakav model crpljenja rezultira s 4 stanja kroz koja plin prolazi u svakom vremenskom razmaku (1 sat). Stanje 1 je početno stanje u svakom vremenskom trenutku, te ono odgovara posljednjem stanju (stanje 4), prethodnog vremenskog trenutka. Nakon procesa I. plinu se uz konstantan tlak i temperaturu, smanjuju množina i tlak, a to nam čini stanje plina 2. Stanje 3 će plin poprimiti nakon izentropske ekspanzije, uz pad tlaka i temperature. Na kraju, stanje 4 se postiže zagrijavanjem plina zbog prethodnog pada temperature. U svrhu modela uzima se

da je temperatura stjenke Zemljine kore, koja okružuje ležište, konstantna duž svih promjena stanja plina i iznosi  $T_{ZK} = 333$  K. Uz rast temperature plinu će porasti i tlak, jer se množina i volumen više ne mijenjaju u promatranom vremenu. Sljedeće jednadžbe prikazuju promjene stanja plina tijekom crpljenja, a dio njih je preuzet iz izvora [11].

Početni vremenski trenutak ( $t_c = 0$ )

Za  $i = 1$  i  $j = 1:4$ , vrijedi:

$$p_c(i, j) = p_{lež}$$

$$T_c(i, j) = T_{lež}$$

$$n_c(i, j) = n_{lc}(i, 1)$$

$$V_c(i, j) = \frac{n_c(i, j) * Rm * T_c(i, j)}{p_c(i, j)}$$

Za  $i = 2:16320$ , vrijedi:

Stanje 1 ležišnog plina - konačno stanje iz prethodnog vremenskog trenutka

Za  $j = 1$ , vrijedi:

$$p_c(i, j) = p_c(i-1, 4);$$

$$T_c(i, j) = T_c(i-1, 4);$$

$$n_c(i, j) = n_c(i-1, 4);$$

$$V_c(i, j) = \frac{n_c(i, j) * Rm * T_c(i, j)}{p_c(i, j)}$$

Stanje 2 ležišnog plina - nakon iscrpljenja dijela plina

Za  $j = 2$ , vrijedi:

$$p_c(i, j) = p_c(i-1, 4);$$

$$T_c(i, j) = T_c(i-1, 4);$$

$$n_c(i, j) = n_{lc}(i);$$

$$V_c(i, j) = \frac{n_c(i, j) * Rm * T_c(i, j)}{p_c(i, j)}$$

Stanje 3 ležišnog plina - nakon izentropske ekspanzije

Za  $j = 3$ , vrijedi:

$$V_c(i, j) = V_{le\dot{z}}$$

$$p_c(i, j) = p_c(i, j-1) * \left( \frac{V_c(i, j-1)}{V_c(i, j)} \right)^{\kappa_{cl}}$$

$$T_c(i, j) = T_c(i, j-1) * \left( \frac{p_c(i, j)}{p_c(i, j-1)} \right)^{\frac{\kappa_{cl}-1}{\kappa_{cl}}}$$

$$n_c(i, j) = n_c(i, j-1);$$

Stanje 4 ležišnog plina - nakon izohornog hlađenja plina

Za  $j = 4$ , vrijedi:

$$V_c(i, j) = V_c(i, j-1)$$

$$n_c(i, j) = n_c(i, j-1);$$

$$Q_{ct}(i) = \alpha_{cl} * A_{le\dot{z}} * (T_{ZK} - T_c(i, j-1)) - \text{toplinski tok koji Zemljina kora predaje plinu}$$

$t_{cZ} = 3600$  s – broj sekundi u jednom vremenskom koraku

$$Q_c(i) = Q_{ct}(i) * t_{cZ}$$

$$T_c(i, j) = T_c(i, j-1) + \frac{Q_c(i)}{n_c(i, j) * C_{mvcl}}$$

$$p_c(i, j) = p_c(i, j-1) * \frac{T_c(i, j)}{T_c(i, j-1)}$$

Za dobivanje stanja 3 potrebno je poznavati izentropski koeficijent ležišnog plina. S obzirom da je poznat sastav plina ( $y_{li}$ ), moguće je uz podatke iz toplinskih tablica odrediti molarni toplinski kapacitet plina uz  $p=\text{konst}$ ,  $C_{mp}$ . Zbog pojednostavljenja, odabrana temperatura za izračun je 0 °C. Iz toga slijedi:

$$C_{mpcl} = \sum C_{mpi} * y_{li}$$

$$C_{mvcl} = C_{mpcl} - Rm$$

$$\kappa_{cl} = \frac{C_{mpcl}}{C_{mvcl}}$$

Podaci o toplinskim kapacitetima sudionika preuzeti su iz izvora [15]. Za dobivanje parametra u stanju 4 potrebno je poznavati koeficijent prijelaza topline ležišnog plina,  $\alpha_{cl}$ . Njegova vrijednost je odabrana proizvoljno i ona je jednaka  $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Kasnije će smisao te vrijednosti biti provjeren. Također, potrebno je odrediti oblik ležišta, kako bi se mogla znati površina (oplošje ležišta) za izmjenu topline,  $A_{lež}$ . Odabran je oblik kocke s bazom  $a_{lež} * b_{lež}$  i visinom  $h_{lež}$ .

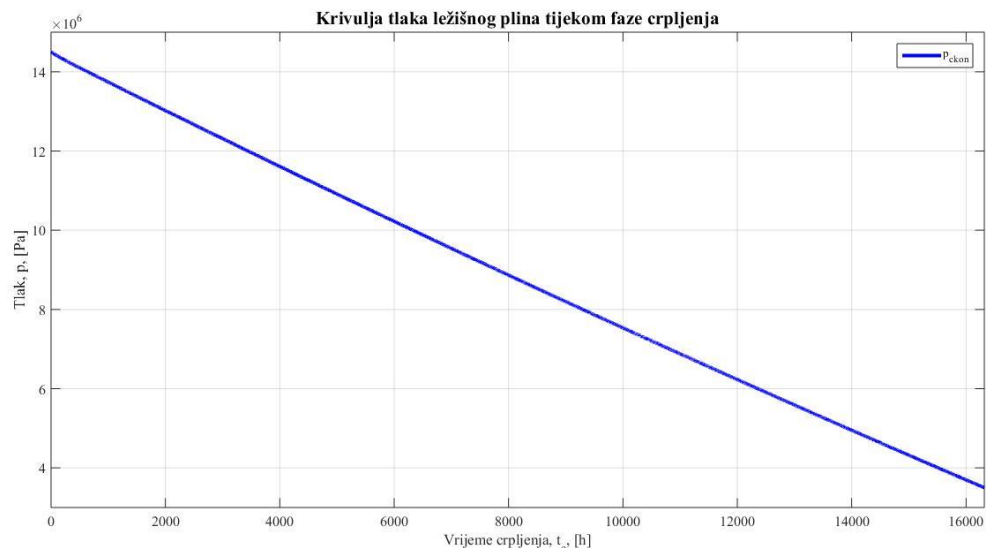
Ako se uzme da je  $a_{lež} = b_{lež} = 150 \text{ m}$ , jednostavno se, uz poznati volumen ležišta, dobiva visina ležišta,  $h_{lež} = 70.3851 \text{ m}$ . Iz ovih vrijednosti slijedi izračun oplošja ležišta.

$$A_{lež} = 2 * a_{lež} * b_{lež} + 2 * a_{lež} * h_{lež} + 2 * b_{lež} * h_{lež}$$

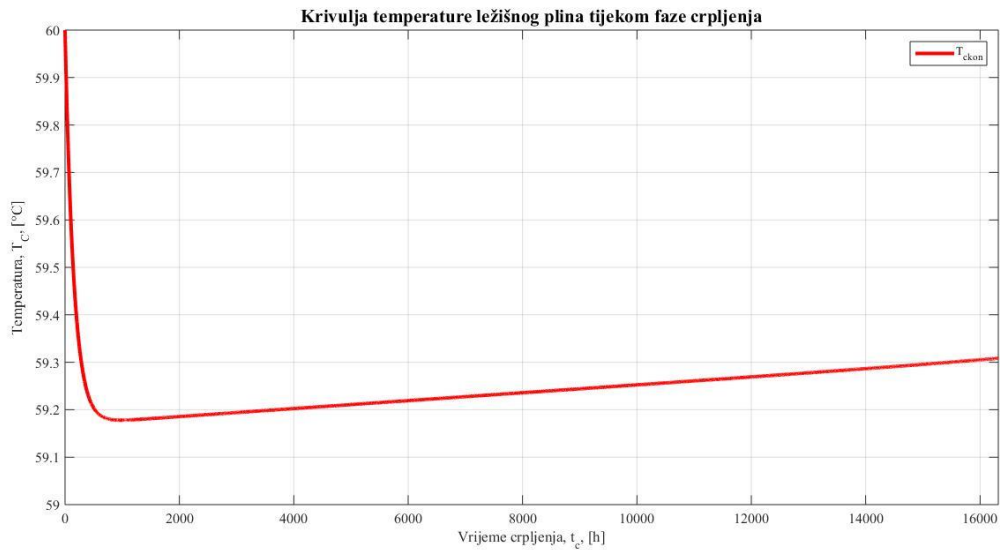
Postupak izračuna svih prethodno navedenih parametara se završava, izračunom posljednjeg vremenskog trenutka, odnosno kada je  $i = 16320$ . Time će se za tlak, temperaturu, množinu i volumen dobiti matrice oblika  $16320 \times 4$ . Podaci koji su konačni i relevantni su oni iz zadnjeg stupca pojedine matrice. Zbog potrebe za dijagramskim prikazom izdvojene su vrijednosti parametra u zadnjem stupcu te su kreirane nove matrice, koje su ujedno i transponirane.

Primjer:  $p_{ckon} = (p_c(1:16320,4))^T$

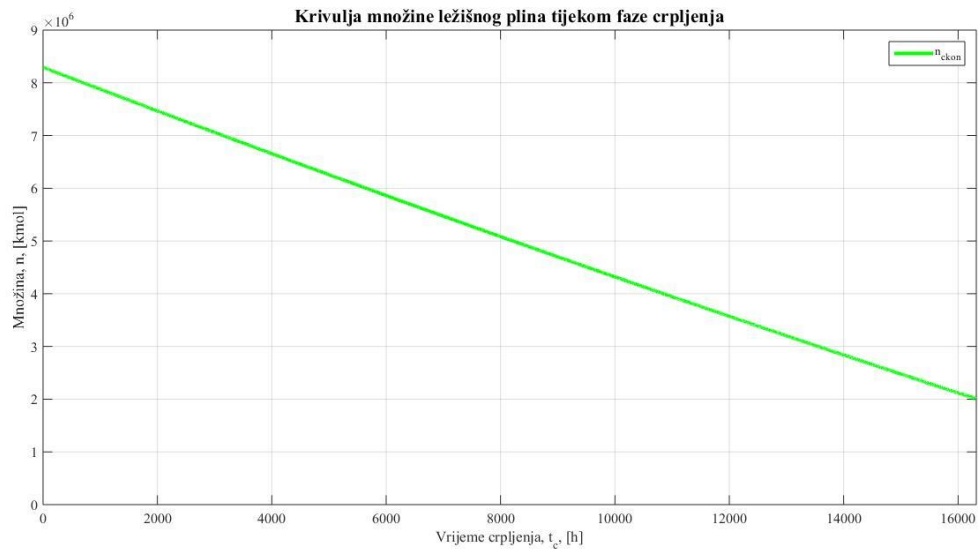
Na sljedećim dijagramima prikazane su promjene tlaka, temperature i množine plina u ležištu tijekom faze crpljenja.



Dijagram 4. Krivulja tlaka ležišnog plina tijekom faze crpljenja



Dijagram 5. Krivulja temperature ležišnog plina tijekom faze crpljenja



Dijagram 6. Krivulja množine ležišnog plina tijekom faze crpljenja

Kao što je ranije spomenuto, potrebno je pokazati je li proizvoljan odabir koeficijenta prijelaza topline bio zadovoljavajući. U tu svrhu, promatra se fenomen prirodne konvekcije uz vertikalni zid. Temperatura plina koja je relevantna za ovaj izračun je najniža temperatura koja se javlja nakon adijabatske ekspanzije, to jest u stanju 3. Ona iznosi  $T_{cmin} = 332,1724$  K. Kako je već poznato, odabrano je kako će stjenka imati konstantnu temperaturu, koja iznosi 333 K. Iz toga slijedi, izračun srednje vrijednosti,  $T_{csr}$  između tih temperatura. Ona je potrebna za dobivanje *Prandtl*-ovog broja. Međutim najprije je moguće izračunati *Grashof*-ov broj.

$$Gr_c = \frac{g * \beta_c * (T_s - T_{cmin}) * h_{lez}^3}{\nu_s}$$

$\beta_c = \frac{1}{T_{cmin}}$  – koeficijent volumnog širenja

S obzirom da je u prirodnom plinu dominantan udio metana, u proračun koeficijenta prijelaza topline, samo će on biti uzet u obzir od svih sudionika. Prema tome, za metan se dobiva vrijednost kinematičke viskoznosti na temperaturi stjenke i iznosi  $\nu_s = 2.1015 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ . Iz toga slijedi iznos *Grashof*-ovog broja,  $Gr_c = 1,929 * 10^{13}$ , koji ukazuje na turbulentno strujanje. Nadalje, potrebno je računati *Prandtl*-ov broj koji ovisi o dinamičkoj viskoznosti, toplinskom kapacitetu i koeficijentu toplinske vodljivosti metana. Za metan i  $T_{csr} = 332,5862 \text{ K}$  vrijedi:

$$\eta_{csr} = 1,2153 * 10^{-5} \text{ Pas}$$

$$c_{psr} = 2316,6 \text{ J/kgK}$$

$$\lambda_{csr} = 0.0297 \text{ W/mK}$$

Iz dobivenih vrijednosti lako se dobiva *Prandtl*-ov broj.

$$Pr_c = \frac{\eta_{sr} * c_{psr}}{\lambda_{csr}} = 0,9489$$

*Rayleigh*-ov broj se dobiva množenjem *Grashof*-ovog i *Prandtl*-ovog broja.

$$Ra_c = Gr_c * Pr_c = 1,8303 * 10^{13}$$

Iz *Rayleigh*-ovog i *Prandtl*-ovog broja slijedi izračun *Nusselt*-ovog broja, prema jednadžbi:

$$Nu_c = \left( 0,825 + \frac{0,387 + Ra_c^{\frac{1}{4}}}{1 + \left( 0,492 * Pr_c^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{1}{4}}} \right)^2 = 3224,7$$

Konačno može se izračunati koeficijent prijelaza topline,  $\alpha_{cl}$ .

$$\alpha_{cl} = \frac{Nu_c * \lambda_{csr}}{I_V}$$

Vrijednost  $I_V$  označava geometrijsku izmjeru izmjenjivačke površine. U slučaju prirodne konvekcije uz vertikalni zid, vrijedi:



$$I_V = \frac{a_{le\dot{z}} * h_{le\dot{z}}}{2 * a_{le\dot{z}} + 2 * h_{le\dot{z}}} = 23,953 \text{ m}$$

Na kraju, dobiva se  $\alpha_{cl} = 3,9945 \text{ W/m}^2\text{K}$ , što pokazuje na jako dobru raniju procjenu reda veličine koeficijenta konvektivnog topline. Jednadžbe korištene pri izračunu  $\alpha_{cl}$  preuzete su iz izvora [12] i [13], dok su vrijednosti  $v_s$ ,  $\eta_{csr}$ ,  $c_{psr}$  i  $\lambda_{csr}$  određene koristeći izvor [14].

S obzirom da, po završetku crpljenja željenog volumena, temperatura plina ( $T_{ckon}(16320) = 332,3084 \text{ K}$ ) nije jednaka temperaturi Zemljine kore oko ležišta, doći će do naknadnog zagrijavanja plina. Pri tome će se osim temperature, mijenjati i tlak plina, to jest on će rasti. Prema sljedećim jednadžbama moguće je izračunati potrebno vrijeme da se temperatura povisi do  $T_{ZK}$  i vrijednost tlaka nakon zagrijavanja.

$$Q_{cZkon} = n_{ckon}(16320) * C_{mvel} * (T_{ZK} - T_{ckon}(16320))$$

$$Q_{cZkon} = A_{le\dot{z}} * \alpha_{cl} * (T_{ZK} - T_{ckon}(16320))$$

$$t_{cZkon} = \frac{Q_{cZkon}}{3600 * Q_{cZtkon}} \approx 38 \text{ h}$$

$$p_{cZkon} = p_{ckon}(16320) * \frac{T_{ZK}}{T_{ckon}(16320)} = 35,067 \text{ bar}$$

Nakon što je iscrpljen, ležišni plin se miješa sa plinom iz plinovoda te nakon kompresije odlazi u magistralni plinovod. Iz projekta [7] je poznato, da će do ulaza u mješalište, tlak ležišnog plina biti reduciran na 20 bar, a temperatura će biti 30 °C. U magistralnom plinovodu "Virovitica-Kutina", vlada tlak između 30 i 40 bar. Za potrebe proračuna uzima se srednja vrijednost, tj. 35 bar. S tim tlakom i temperaturom od 15 °C, plin iz plinovoda ulazi u mješalište. U svakom vremenskom trenutku, količina plina iz plinovoda u mješalištu je 6 puta veća od količine ležišnog plina. To će omogućiti konstantne udjele sudionika u novonastaloj mješavini. S obzirom na omjer plinova, ostvaruje se potreban zahtjev u vezi s udjelom inertnih plinova, koji iznosi  $\approx 3\%$ . Iz projekta je također poznata i temperatura nakon miješanja, točnije na izlazu iz mješališta, gdje se nalazi izmjenjivač topline, zbog kojega smjesa plinova ulazi u kompresor s temperaturom od 15 °C. Volumen nakon miješanja dobiva se sljedećom jednadžbom.

$$V_{cm} = V_{cr} + V_{mp}$$

Volumen  $V_{cr}$  pokazuje koliko se plina iscrpi tijekom jednog sata. Naravno  $V_{mp}$ , predstavlja volumen plina iz plinovoda koji će se zamiješati s ležišnim plinom. Iz dobivenog volumena mješavine može se jednostavno, koristeći jednadžbu stanja idealnog plina, računati tlak mješavine.

$$p_{cm} = \frac{n_{cm} * Rm * T_{cm}}{V_{cm}}$$

Upravo taj tlak odgovara ulaznom tlaku mješavine u kompresor,  $p_{ck1} = p_{cm}$ . Na izlazu iz kompresora tlak mora biti takav da bi savladao otpore na putu do plinovoda i ušao u njega. U tu svrhu uzima se da je tlak nakon kompresije veći od tlaka u plinovodu za 2 bar. Iz toga slijedi da je  $p_{ck2} = 37$  bar (vektorski). S obzirom da je tlak plina poznat, moguće je odrediti vektore volumena ( $v_{uk2}$ ) i temperature ( $T_{uk2}$ ) nakon kompresije. Za to je potrebno znati koeficijent izentropske kompresije mješavine. S obzirom da su omjeri plinova konstantni, zaključuje se da će i sve veličine dobivene na temelju molnih udjela biti konstantne tijekom faze crpljenja plina. Tako se analogno ranijim jednadžbama računaju  $C_{mvm}$  i  $\kappa_{cm}$ .

Na kraju opisa faze crpljenja zgodno je prikazati koliku snagu motor mora dati za pogon kompresora te koliko se pri tome potrošilo goriva.

#### Izračun snage kompresora

Za  $i=1:16320$ ;

Kada plin ulazi u kompresor, stap se pomiče do donje mrtve točke te se oslobađa, tzv. „rad usisavanja“ plina,  $W_{c12}$ .

$$W_{c12}(i) = p_{ck1}(i) * V_{ck1}(i)$$

Za komprimiranje plina kompresoru je potrebno dovesti, tzv. „rad komprimiranja“ plina.

$$W_{c23}(i) = n_{cm}(i) * C_{mvm}(i) * (T_{ck2}(i) - T_{ck1}(i))$$

Zbog kompresije, tj. povećanja tlaka i temperature plina prisutan je i „rad istiskivanja“ plina u tlačni vod.

$$W_{c34}(i) = p_{ck2}(i) * V_{ck2}$$

$$W_{cef}(i) = W_{c23}(i) + W_{c34}(i) + W_{c12}(i)$$

Rad  $W_{cef}$  predstavlja efektivni rad kompresora, koji kada je podijeljen s učinkovitošću kompresora daje nominalni rad koji je potrebno dovesti kompresoru kako bi mogao izvršavati svoju ulogu u fazi crpljenja. Uzima se da je učinkovitost kompresora jednaka 80 %.

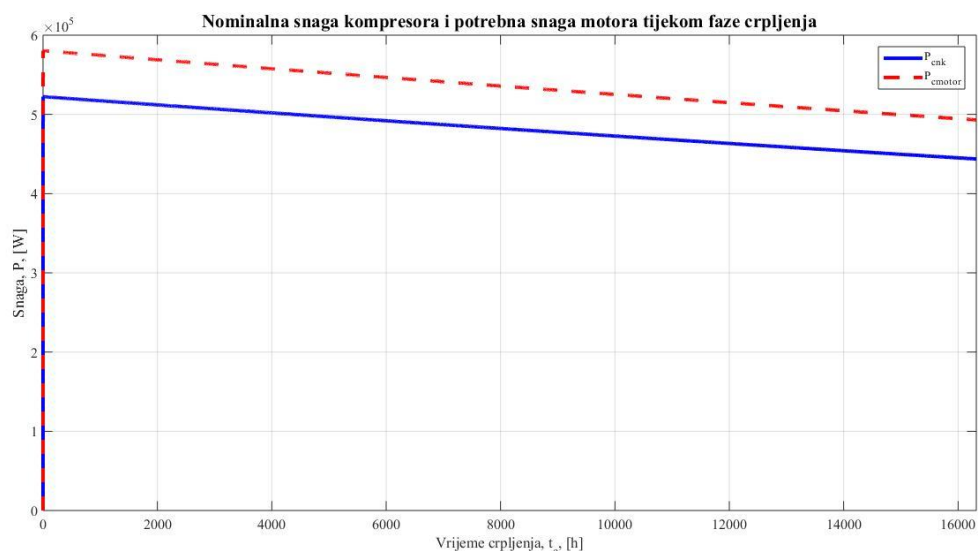
$$W_{cnk}(i) = \frac{W_{cef}(i)}{\eta_k}$$

S obzirom da su vremenski razmaci tijekom faze crpljenja jednaki jednom satu, logično je da se izračunati nominalni rad podijeli s 3600 sekundi (broj sekundi u jednom satu), što rezultira s nominalnom snagom kompresora,  $P_{cnk}$ .

$$P_{cnk}(i) = \frac{W_{cnk}(i)}{3600}$$

Ta snaga se osigurava plinskim motorom, koji pogoni kompresor. Između njih nalazi se reduktor koji kontrolira odnos brzina vrtnje motora i kompresora. Tako se motor vrti sa 1000 okr/min, a kompresor sa približno 3 puta manjom brzinom vrtnje. Zbog postojanja gubitaka na reduktoru, snaga koju je potrebno osigurati na motoru veća je za 10 % od nominalne snage kompresora.

$$P_{cmotor}(i) = \frac{P_{cnk}(i)}{\eta_r}$$



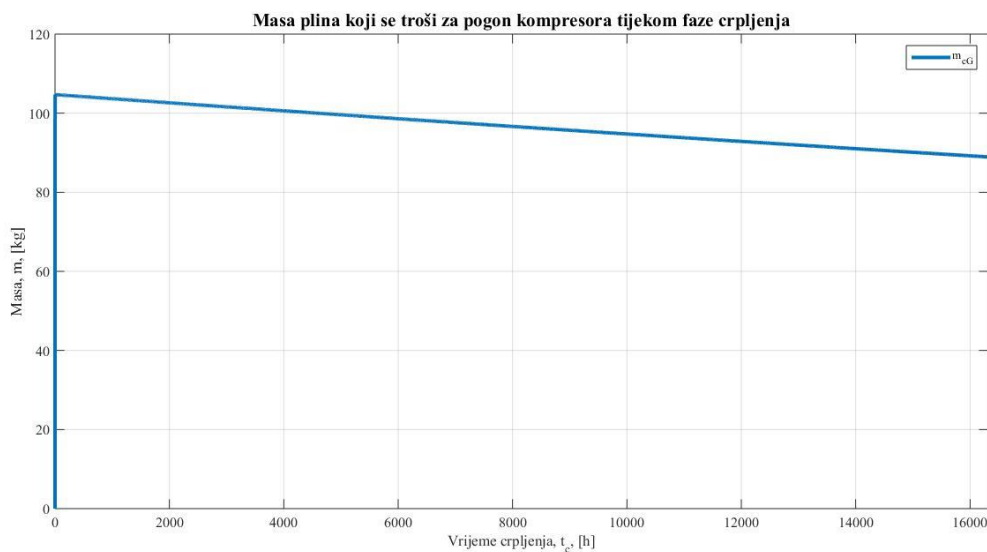
Dijagram 7. Nominalna snaga kompresora i potrebna snaga motora tijekom faze crpljenja

### Potrošnja goriva u fazi crpljenja

Za pogonsko gorivo u motoru uvijek se koristi plin iz plinovoda, bez obzira o kojoj fazi rada spremnika se govori. Ogrjevna vrijednost plina izračunata je analogno izračunu izentropskog koeficijenta, odnosno temelji se na molnim udjelima pojedinog sudionika u plinu iz plinovoda, a oni su: metan ( $\text{CH}_4$ ), etan ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ), propan ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ), normalni butan ( $\text{nC}_4\text{H}_{10}$ ), dušik ( $\text{N}_2$ ) i ugljikov dioksid ( $\text{CO}_2$ ). Naravno, zbog svoje inertni sudionici ( $\text{N}_2$  i  $\text{CO}_2$ ), nisu relevantni za izračun ogrjevne vrijednosti plina, čiji je konačni iznos jednak  $H_{dpp} = 805,791 \cdot 10^6$  J/kmol. S obzirom da je prethodni proračun temeljen na množini tvari, potrebno je uvesti vrijednost molarne mase plina, kako bi se potrošnja goriva izrazila u kilogramima, odnosno tonama. Molarna masa plina dobiva se također sumiranjem umnožaka molarnih masa pojedinog sudionika i pripadajućih molnih udjela u smjesi, te ona iznosi  $M_p = 16,15$  kg/kmol. Iz ovih podataka lako se dolazi do potrošnje plina za pogon motora, koja će također biti prikazana vektorski, tj. u ovisnosti o vremenu crpljenja.

$$q_{mcG} = \frac{P_{cmotor} * M_p}{H_{dpp} * \eta_m}$$

Vrijednost  $\eta_m$  predstavlja učinkovitost plinskog motora, te iznosi 40 %. Dobivena vrijednost  $q_{mcG}$  predstavlja maseni protok goriva u svakom vremenskom trenutku. Iz njega se jednostavno dobiva ukupna masa plina koja se troši svakoga sata, za pogon kompresora u fazi crpljenja.

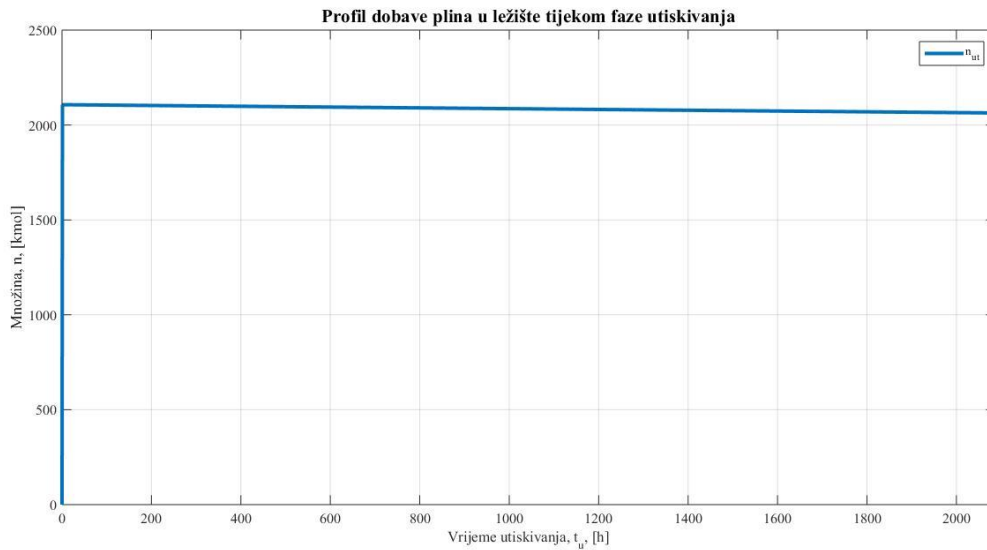


Dijagram 8. Masa plina koji se troši na pogon kompresora tijekom faze crpljenja

Na kraju zgodno je sumirati potrošnju, te se zaključuje kako je potrebno potrošiti ukupno 1576,4 tona plina, tijekom nepune dvije godine koliko će trajati faza crpljenja. Volumen koji je iscrpljen iznosi  $150,57 * 10^6 \text{ Sm}^3$ , a njegovim preračunavanjem u masu dobiva se vrijednost od 118 500 tona plina. Može se zaključiti, kako je dobit tijekom faze crpljenja sjajna jer je uložena masa plina gotovo zanemariva u odnosu na iscrpljenu.

### 3.2. Utiskivanje plina do potpune napunjenosti spremnika

Nakon faze crpljenja dijela ležišnoga plina, pristupa se fazi utiskivanja plina iz plinovoda u ležište. I u tom dijelu projekta jasan je cilj: smanjenje udjela inertnih sudionika u ležišnoj smjesi, kako bi se ona mogla koristiti u plinskom transportnom sustavu. Nakon crpljenja, volumen plin koji je zaostao u ležištu iznosi približno  $48 * 10^6 \text{ Sm}^3$ . Ta količina plina ima ulogu „zračnog jastuka“, odnosno omogućuje kontrolu tlaka u ležištu i upravljanje s istim. Pri tom volumenu plina tlak iznosi 35,07 bar, što će ujedno uvijek biti minimalni dozvoljeni tlak u ležištu. To znači da će volumen plina koji će se utisnuti ovoj fazi projekta, označavati volumen spremnika plina za pokrivanje vršne potražnje u plinsko transportnom sustavu Republike Hrvatske. Taj volumen iznosi  $120,48 * 10^6 \text{ Sm}^3$ . S obzirom da se radi o volumenu pri standardnim uvjetima, on kao i ranije nije proračunski relevantan u područjima tlakova koji vladaju u samom ležištu. Stoga je za razumno, analogno prethodnom poglavlju, stanja plina pratiti koristeći množinu plina, koja se iz jednadžbe stanja uz standardne uvjete lako dobiva i iznosi  $n_{\text{utis}} = 4,3517 * 10^6 \text{ kmol}$ . Poznata je i maksimalna dobava kompresora u fazi utiskivanja plina, te ona iznosi  $1,4 * 10^6 \text{ Sm}^3$  dnevno. Iz nje se analogno dobiva i maksimalna množina tvari koja se može u jednom satu utisnuti u ležište,  $n_{\text{utish}} = 2107 \text{ kmol}$ . Iz ovih vrijednosti množina plina, uz uzimanje u obzir postojanja štetnog volumena u kompresoru kao u fazi crpljenja, utvrđuje se profil utiskivanja,  $n_{\text{ut}}$  tijekom punjenja spremnika do razine potpune napunjenosti. Vrijeme potrebno za ostvarivanje potpune napunjenosti spremnika iznosi 2088 h, odnosno 87 dana. Sljedeći dijagram prikazuje odabrani profil utiskivanja plina u ležište,  $n_{\text{ut}}$  koji je vektorski zapisan za svaki vremenski trenutak.



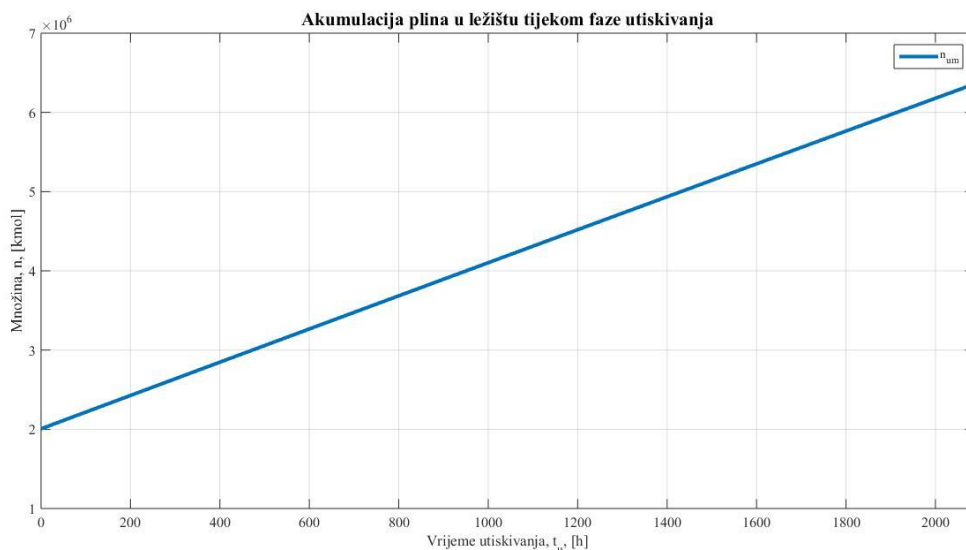
Dijagram 9. Profil dobave plina u ležište tijekom faze utiskivanja

Shodno tome i analogno slučaju crpljenja dobiva se profil akumulacije plina u ležištu, pa za  $i=1$  vrijedi  $n_{um} = n_{ckon}(16320) = 2,0059 \cdot 10^6$  kmol.

Nadalje za  $i = 2:2088$  vrijedi:

$$n_{um}(i) = n_{um}(i-1) + n_{ut}(i)$$

Dobiveni profil akumulacije plina u ležištu prikazan je na sljedećem dijagramu.



Dijagram 10. Akumulacija plina u ležištu tijekom faze utiskivanja

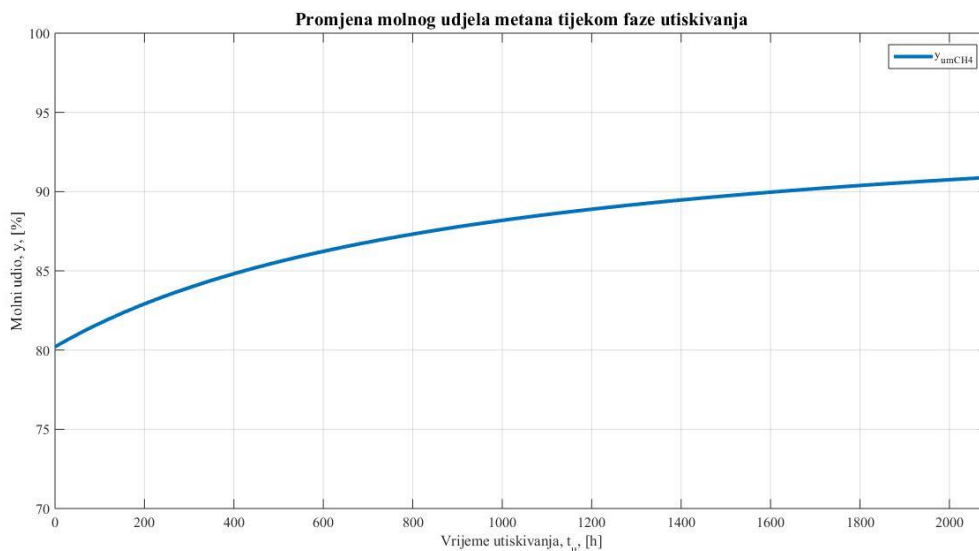
S obzirom da se udio plina iz plinovoda iz sata u sat povećava, jasno je kako će se i udjeli pojedinih sudionika mijenjati tijekom cijelog vremena crpljenja. Zato se promjene njihovih udjela pokazuju sljedećim jednadžbama.

$$n_{uli} = y_{li} * n_{ckon}(16320)$$

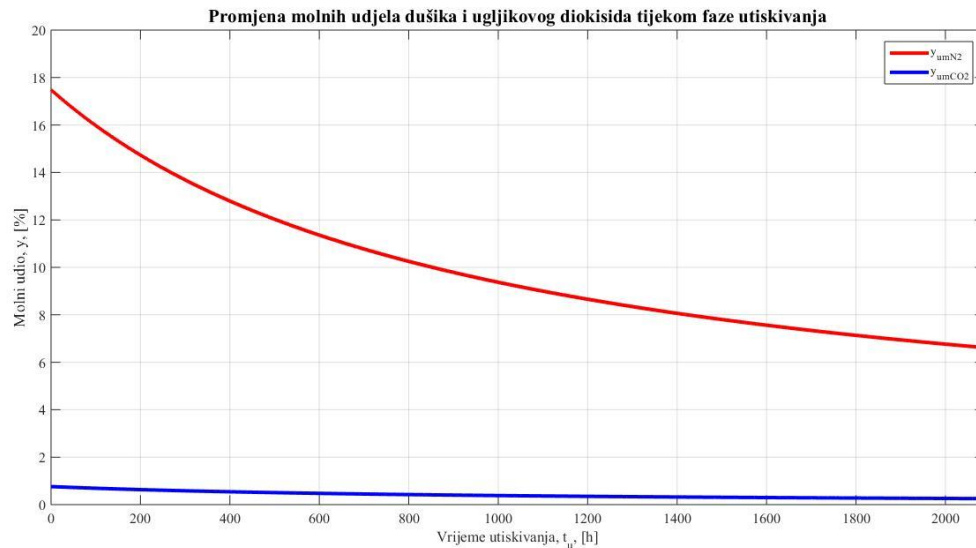
Množina pojedinog sudionika u ležištu prije utiskivanja,  $n_{uli}$  ovisi o njihovim molnim udjelima,  $y_{li}$ . Sukladno tome, dobiva se i množina pojedinog sudionika koji ulazi u ležište u svakom vremenskom trenutku, pa za  $i = 1:2088$ , vrijedi:

$$n_{upi}(i) = y_{pi} * n_{ut}(i)$$

Tako određene množine sudionika mogu se sumirati, analogno izračunu množine  $n_{um}$ , pa se dobivaju vremenski promjenjivi vektori množina sudionika u ležištu tijekom punjenja te je njihov oblik jednak  $n_{umi}(i)$ , gdje je  $i = 1:2088$ . Iz omjera množine pojedinog sudionika i množine smjese tijekom utiskivanja dobiva se profil molnog udjela pojedinog sudionika u novonastaloj smjesi,  $y_{umi}(i)$ . Smisao ove faze projekta očituje se u udjelu inertnih plinova (N<sub>2</sub> i CO<sub>2</sub>) po završetku utiskivanja. Na sljedećim slikama prikazane su promjene udjela metana, dušika i ugljikovog dioksida.



Dijagram 11. Promjena molnog udjela metana tijekom faze utiskivanja



Dijagram 12. Promjena udjela dušika i ugljikovog dioksida tijekom faze utiskivanja

Može se zaključiti kako će svakim daljnjim punjenjem s plinom iz plinovoda, smjesa u ležištu biti sve kvalitetnija jer će rasti udio metana, a padati udio inertnih plinova.

Model punjenja spremnika se sastoji od 3 promjene stanja kroz koje prolazi plin u ležištu:

- I. Miješanje plinova uz fiktivni porast volumena
- II. Izentropska kompresija od novonastalog volumena do  $V_{lež}$
- III. Izmjena topline zbog razlike temperature plina u odnosu na  $T_{ZK}$

Kao i kod crpljenja plina, ovakav model rezultira sa 4 stanja koja plin poprima tijekom svakog vremenskog trenutka. Početno stanje 1 označava prvi korak u novom vremenskom trenutku, koji odgovara stanju 4 iz prethodnog vremenskog trenutka. U stanju 2 porasla je množina zbog utiskivanja, a time se i volumen fiktivno poveća. Miješanje se odvija uz konstantan tlak, dok temperatura smjese opada. Razlog za to je sve veći udio (tijekom vremena) plina iz plinovoda, koji nakon kompresije u kompresoru prolazi kroz zračni hladnjak te mu je temperatura nakon hlađenja jednaka  $T_{ZH} = 323$  K, odnosno  $50$  °C., dok u ležištu prije utiskivanja vlada  $T_{czkon} = T_{ZK} = 333$  K. Nakon izentropske kompresije (stanje 3) dolazi do promjene vrijednosti tlaka, temperature i volumena plina koji zauzima vrijednost  $V_{lež}$ , dok je množina plina ostala ista. Stanje 4, definirano izmjenom topline, dati će nove vrijednosti tlaka i temperature, te će se s tim stanjem ući u sljedeći vremenski korak.



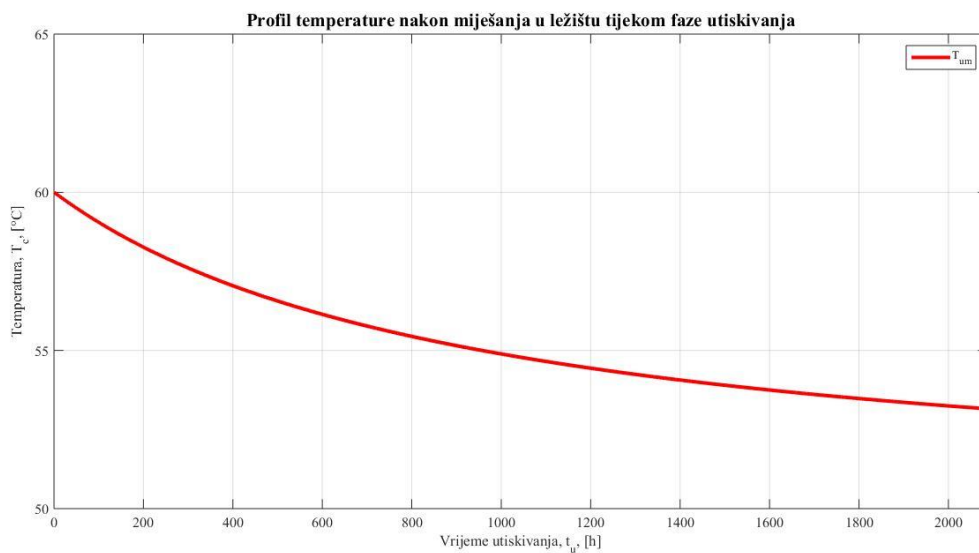
Temperatura nakon miješanja definirana je na sljedeći način.

Za  $i = 1$ , vrijedi:  $T_{um}(i) = T_{lez}$ .

Nadalje, za  $i = 2:2088$ , vrijedi:

$$T_{um}(i) = T_{um}(i-1) * \frac{n_{um}(i-1)}{n_{um}(i)} + T_{ZH} * \frac{n_{ut}(i)}{n_{um}(i)}$$

Ova jednadžba pokazuje kako je profil brzine određen odnosima množina plina u ležištu i nadolazećeg plina iz plinovoda. S obzirom da je se događa akumulacija plina u ležištu, dobiva se padajuća funkcija temperature čija se vrijednost kroz vrijeme sve više približava vrijednosti od 50 °C. Na sljedećoj slici prikazan je profil dobivene temperature.



Dijagram 13. Profil temperature nakon miješanja u ležištu tijekom faze utiskivanja

Putem sljedećih jednadžbi pokazati će se model ponašanja plina u fazi utiskivanja, kroz sva 4 stanja u svakom vremenskom trenutku.

Stanje u početnom vremenskom trenutku ( $t_{utis} = 0$ )

Za  $i = 1$  i  $j = 1:4$ , vrijedi:

$$p_u(i, j) = p_{czkonv}(i, 38)$$

$$T_u(i, j) = T_{um}(i, 1)$$

$$n_u(i, j) = n_{um}(i, 1)$$

$$V_u(i,j) = \frac{n_u(i,j) * Rm * T_u(i,j)}{p_u(i,j)}$$

Za  $i = 2:2088$ , vrijedi:

Stanje 1 ležišnog plina - konačno stanje iz prethodnog vremenskog trenutka

Za  $j = 1$ , vrijedi:

$$p_u(i,j) = p_u(i-1, 4);$$

$$T_u(i,j) = T_u(i-1, 4);$$

$$n_u(i,j) = n_u(i-1, 4);$$

$$V_u(i,j) = \frac{n_u(i,j) * Rm * T_u(i,j)}{p_u(i,j)}$$

Stanje 2 ležišnog plina - nakon miješanja

Za  $j = 2$ , vrijedi:

$$p_u(i,j) = p_u(i-1, 4);$$

$$T_u(i,j) = T_{um}(i);$$

$$n_u(i,j) = n_{um}(i);$$

$$V_u(i,j) = \frac{n_u(i,j) * Rm * T_u(i,j)}{p_u(i,j)}$$

Stanje 3 ležišnog plina - nakon izentropske kompresije plina

Za  $j = 3$ , vrijedi:

$$V_u(i,j) = V_{lež}$$

$$p_u(i,j) = p_u(i,j-1) * \left( \frac{V_u(i,j-1)}{V_u(i,j)} \right)^{\kappa_{um}(i)}$$

$$T_u(i,j) = T_u(i,j-1) * \left( \frac{p_u(i,j)}{p_u(i,j-1)} \right)^{\frac{\kappa_{um}(i)-1}{\kappa_{um}(i)}}$$

$$n_u(i,j) = n_u(i,j-1);$$

Stanje 4 ležišnog plina - nakon izohorne izmjene topline

Za  $j = 4$ , vrijedi:

$$V_u(i, j) = V_u(i, j-1)$$

$$n_u(i, j) = n_u(i, j-1);$$

$$Q_{ut}(i) = \alpha_{ul} * A_{lež} * (T_{ZK} - T_u(i, j-1)) - \text{toplinski tok}$$

$t_{uHZ} = 3600$  s – broj sekundi u jednom vremenskom koraku

$$Q_u(i) = Q_{ut}(i) * t_{cZH}$$

$$T_u(i, j) = T_u(i, j-1) + \frac{Q_u(i)}{n_u(i, j) * C_{mvum(i)}}$$

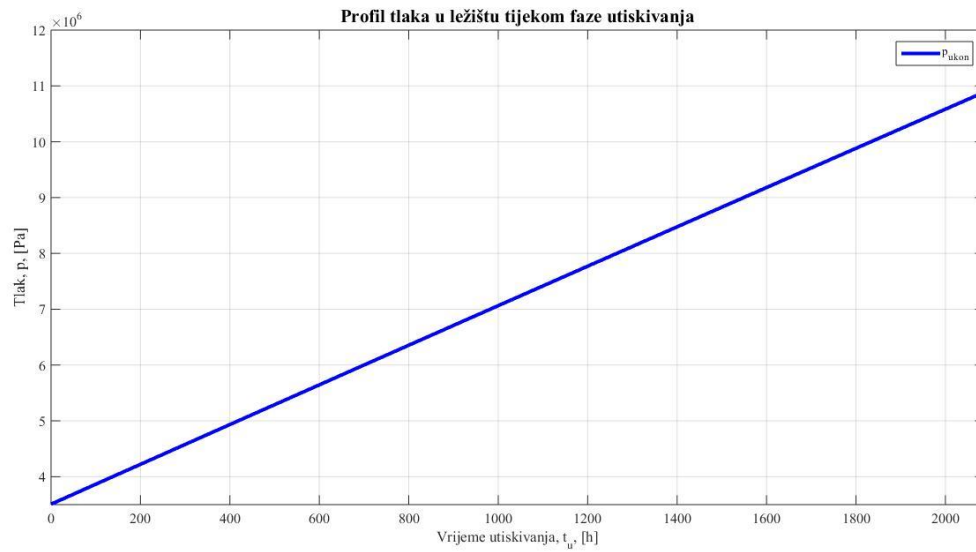
$$p_u(i, j) = p_u(i, j-1) * \frac{T_u(i, j)}{T_u(i, j-1)}$$

Kao i u prethodno slučaju potrebno je računati vrijednosti molarnog toplinskog kapaciteta te izentropskog koefijenta mješavine. S obzirom da se sastav plina tijekom punjenja mijenja, mijenjati će se i vrijednosti  $C_{mvum}$  i  $\kappa_{um}$ , no one se jednostavno dobivaju zbog poznatih molarnih udjela sudionika u mješavini,  $y_{umi}$ . S obzirom da je postupak njihova izračuna prikazan u fazi crpljenja, to je ovdje suvišno i trivijalno. Za iznos koeficijenta prijelaza topline odabrana je vrijednost,  $\alpha_{ul} = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

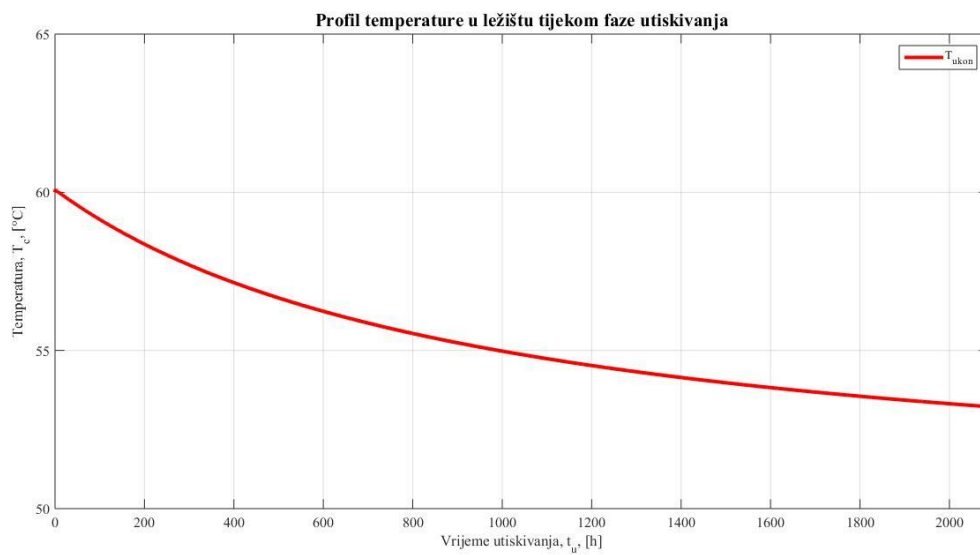
Postupak izračuna svih prethodno navedenih parametara se završava, izračunom posljednjeg vremenskog trenutka, odnosno kada je  $i = 2088$ . Time će se za tlak, temperaturu, množinu i volumen dobiti matrice oblika  $2088 \times 4$ . Podaci koji su konačni i relevantni su oni iz zadnjeg stupca pojedine matrice. Zbog potrebe za dijagramskim prikazom izdvojene su vrijednosti parametra u zadnjem stupcu te su kreirane nove matrice, koje su ujedno i transponirane.

$$\text{Primjer: } p_{ukon} = (p_u(1:2088, 4))^T$$

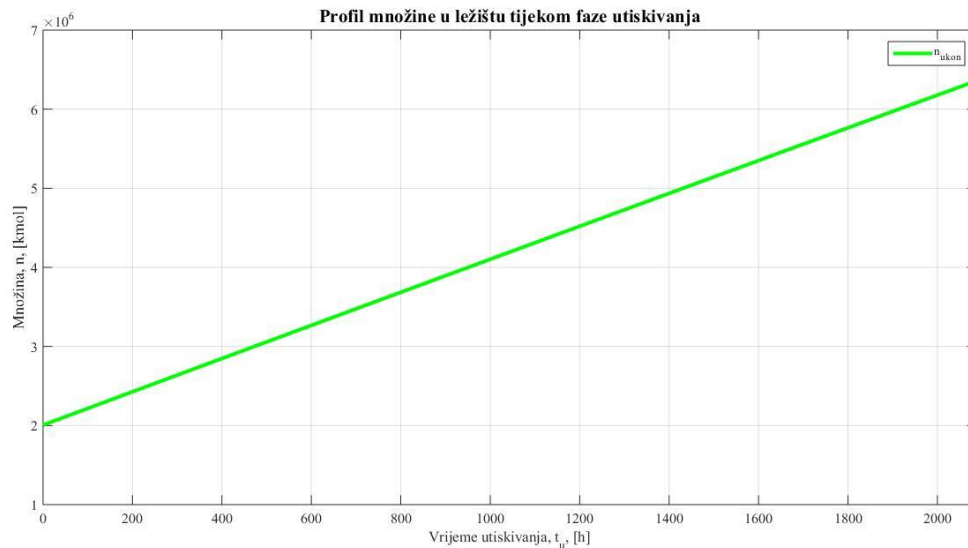
Na sljedećim dijagramima prikazane su promjene tlaka, temperature i množine plina u ležištu tijekom faze punjenja spremnika do njegove potpune napunjenosti.



Dijagram 14. Profil tlaka u ležištu tijekom faze utiskivanja



Dijagram 15. Profil temperature u ležištu tijekom faze utiskivanja



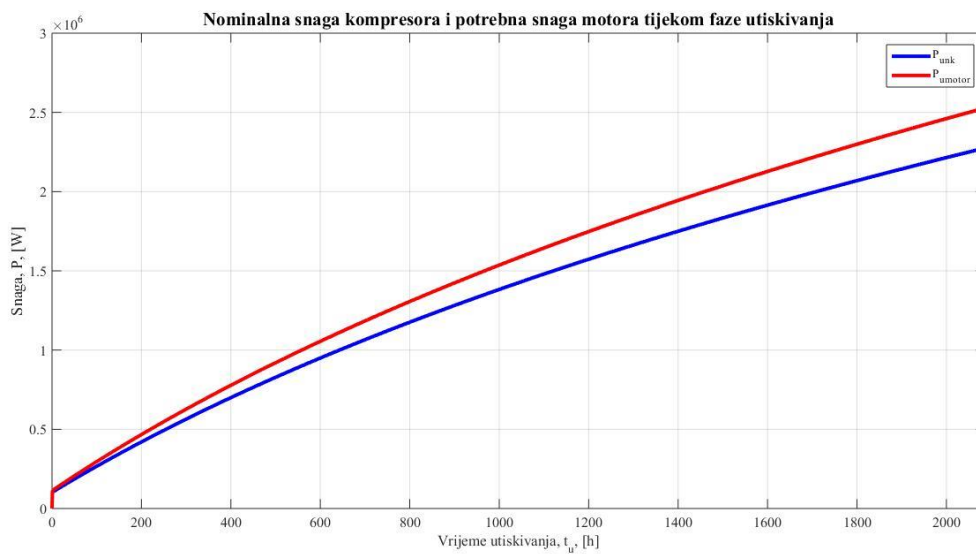
Dijagram 16. Profil množine u ležištu tijekom faze utiskivanja

Kao i u prethodnom primjeru zgodno je provjeriti ispravnost pretpostavke reda veličine koeficijenta konvektivne izmjene topline,  $\alpha_{ul}$ . S obzirom da je proveden na analogan način, nije ga potrebno ponovno prikazivati već će se navesti samo konačni rezultat. Dobiva se vrijednost od  $7,49 \text{ W/m}^2\text{K}$ , pa se može reći kako je ranije odabrana vrijednost korektna.

Poznato je kako je nakon utiskivanja, temperatura plina jednaka  $T_{ukon}(2088) = 326,22 \text{ K}$ . Ona je niža od temperature stjenke ležišta koja iznosi  $333 \text{ K}$ , što znači da će doći do dogrijavanja plina. Koristeći jednadžbe iz prethodnog poglavlja određuje se potrebno vrijeme za ostvarenje zagrijavanja plina do temperature stjenke, te ono iznosi  $t_{uZkon} = 122 \text{ h}$ . To bi značilo da ako će se spremnik, nakon utiskivanja do potpune napunjenosti, odmah podvrgnuti ciklusu povlačenja plina (pražnjenje), morati će se uzimati u obzir i pojava ovog zagrijavanja. Nakon što plin dostigne temperaturu stjenke, lako se dobiva i vrijednost tlaka, te on iznosi  $p_{uZkon}(122) = 111,14 \text{ bar}$ .

Prije ulaska u ležište plin iz plinovoda prolazi kroz kompresor, koji mu podiže tlak što omogućuje njegovo miješanje s ležišnim plinom. Na ulazu u kompresor vrijednosti tlaka i temperature su jednaki onim u plinovodu. Nadalje, tlak nakon kompresije  $p_{uk2}$  će uvijek biti za  $2 \text{ bar}$  veći od tlaka u ležištu. Također, poznata je i množina plina koja u svakom satu prolazi kroz kompresor i ona je jednaka izračunatoj množini  $n_{ut}$ . S obzirom da je proračun potrebne snage kompresora i motora, te potrebne mase goriva za pogon istih, jednak kao i kod

crpljenja plina, nema potrebe za ponovnim pisanjem istih jednadžbi, već će se odmah prikazati dijagrami dinamike relevantnih veličina u ovisnosti o vremenu punjenja.

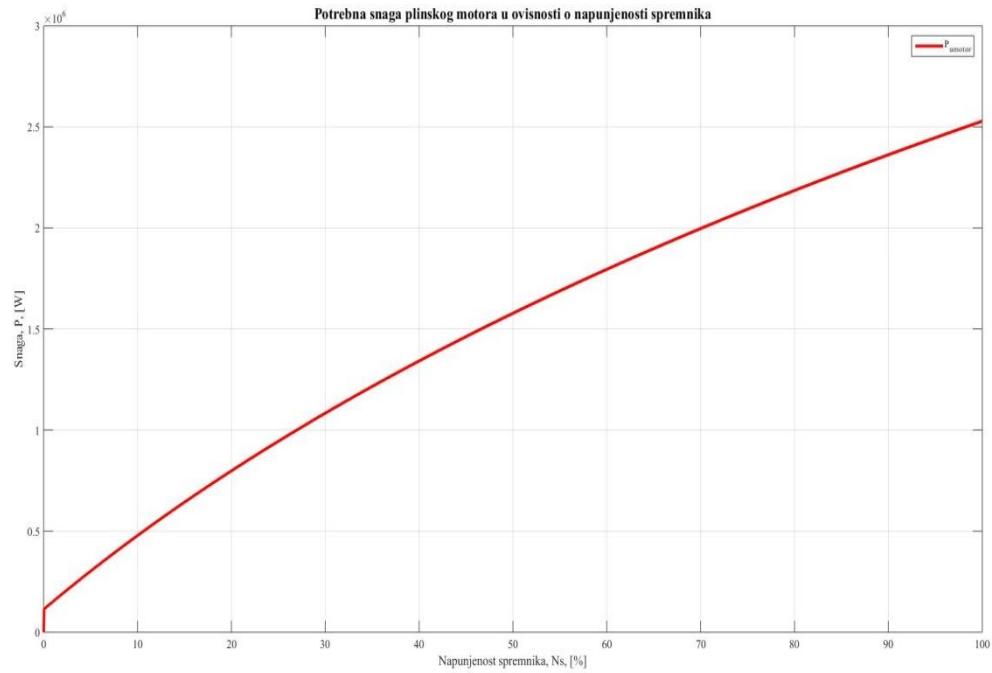


Dijagram 17. Nominalna snaga kompresora i potrebna snaga motora tijekom faze utiskivanja

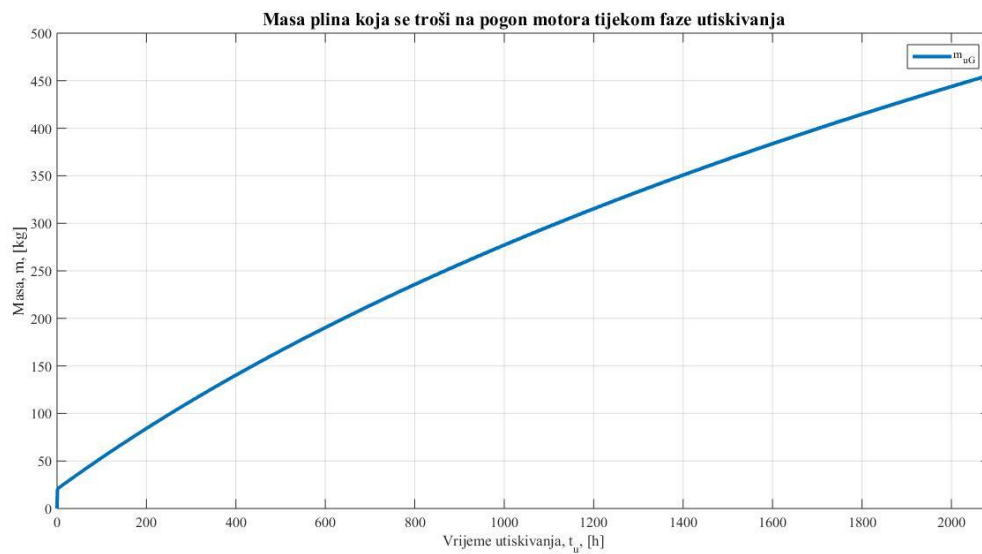
Kao što se i zahtijeva u zadatku, može se prikazati ovisnost potrebne snage plinskog motora o napunjenosti spremnika. Zbog toga se uvodi varijabla,  $N_s$ , a ona predstavlja napunjenost spremnika i računa se prema sljedećoj jednadžbi.

$$N_s(i) = \frac{n_{um}(i) - n_{ckon}(16320)}{n_{um}(2088) - n_{ckon}(16320)} * 100$$

Dobivena vrijednost napunjenosti spremnika izražava se u postocima napunjenosti. Ovisnost snage plinskog motora o napunjenosti spremnika prikazuje se na sljedećem dijagramu.



Dijagram 18. Potrebna snaga motora u ovisnosti o napunjenosti spremnika



Dijagram 19. Masa plina koji se troši na pogon motora tijekom faze utiskivanja

### 3.3. Scenarijska usporedba rada podzemnog skladišta plina

#### 3.3.1 Scenarij I

U prvome scenariju promatra se rad skladišta kada njegova napunjenost iznosi 20%. Kada je spremnik napunjen na 20 % napunjenosti, dostupni volumen u njemu je  $V_I = 24,096 * 10^6 \text{ Sm}^3$ . U skladu s time, može se izračunati i množina plina unutar spremnika, prema sljedećoj jednadžbi.

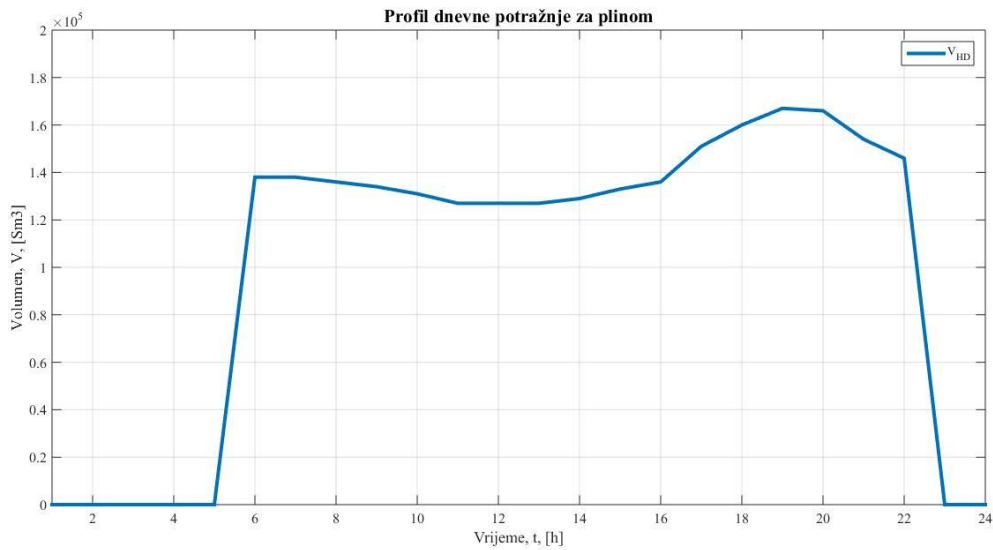
$$n_I = 0.2 * (n_{\text{ukon}}(2088) - n_{\text{ckon}}(16320)) + n_{\text{ckon}}(16320) = 2,8762 * 10^6 \text{ kmol}$$

Koristeći dobivenu vrijednost množine, mogu se odrediti vrijednosti tlaka i temperature u spremniku kada je on napunjen na 20% napunjenosti. Uzima se da vrijednost  $n_I$  odgovara množini  $n_{\text{ukon}}(415)$ , iz čega slijedi da je  $p_I = p_{\text{ukon}}(415) = 49,842 \text{ bar}$  i  $T_I = T_{\text{ukon}}(415) = 330,0713 \text{ K}$ . Kao što je već ranije spomenuto, spremnik u oba scenarija će biti podvrgnut, najprije procesu pražnjenja (povlačenje plina), a nakon toga procesu punjenja (utiskivanje plina).

##### 3.3.1.1. Povlačenje plina

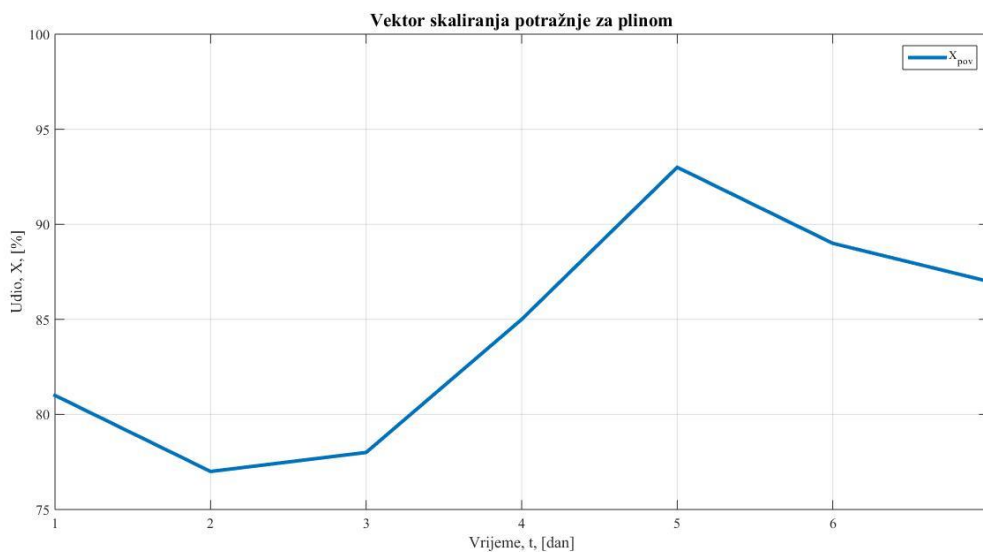
S obzirom da se u scenarijskoj analizi želi prikazati ponašanje skladišta u stvarnim uvjetima ponude i potražnje za plinom, ovdje će se zamisliti postojanje tzv. "karakterističnog hladnog tjedna", u kojem će potražnja za plinom biti visoka. Tada će spremnik imati ulogu izvora plina, te će se koristiti za zadovoljavanje vršne potražnje za plinom. Zbog toga je pretpostavljena dnevna krivulja potražnje za plinom tijekom hladnog tjedna,  $V_{\text{HD}}$ . Zbroj svih vektorskih članova koji opisuju tu krivulju, jednaki su maksimalnom iznosu volumena koji je moguće u jednom danu povući iz skladišta. Taj je volumen definiran projektom i iznosi  $2,4 * 10^6 \text{ Sm}^3$ . Jasno je kako će sve promatrane varijable u scenarijima I i II, biti prikazane kroz 192 vremenska trenutka, što odgovara periodu od 7 dana. Sljedeći dijagram pokazuje dnevnu krivulju potražnje,  $V_{\text{HD}}$ .





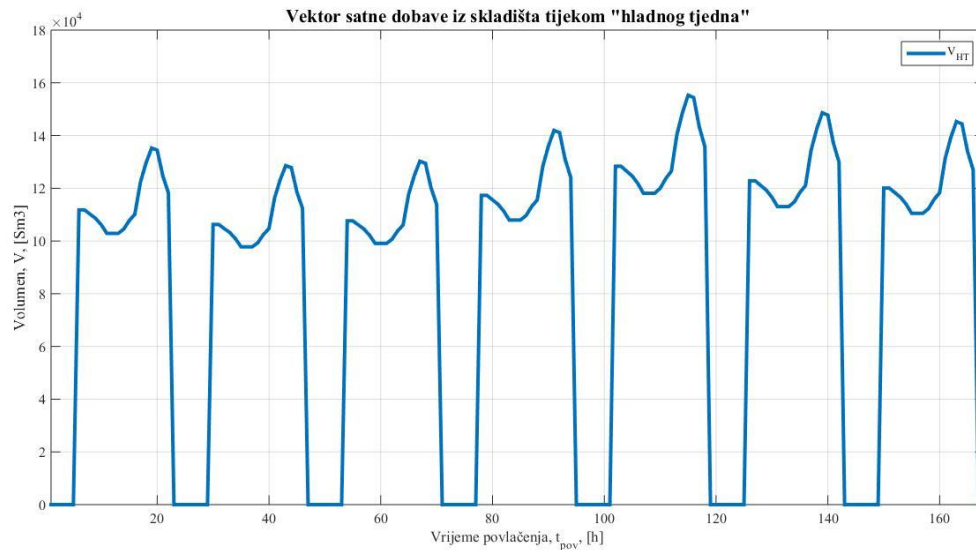
Dijagram 20. Profil dnevne potražnje za plinom

Kako bi se dobila tjedna krivulja, uvodi se vektor  $X_{pov}$ , koji se sastoji od 7 članova, proizvoljnih vrijednosti  $0 < X_{pov} < 1$ .



Dijagram 21. Vektor skaliranja potražnje za plinom

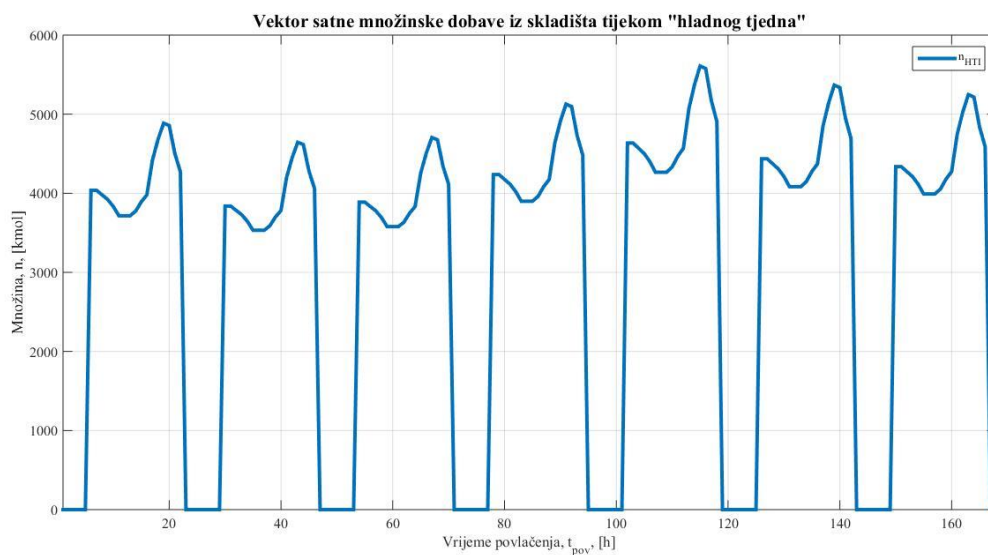
Taj vektor će nam omogućiti skaliranje krivulje dnevne potražnje za period od 7 dana, te se dobiva vektor  $V_{HT}$ , s kojim je opisana satna dobava iz podzemnog skladišta tijekom „karakterističnog hladnog tjedna“.



Dijagram 22. Vektor satne dobave iz skladišta tijekom "hladnog tjedna"

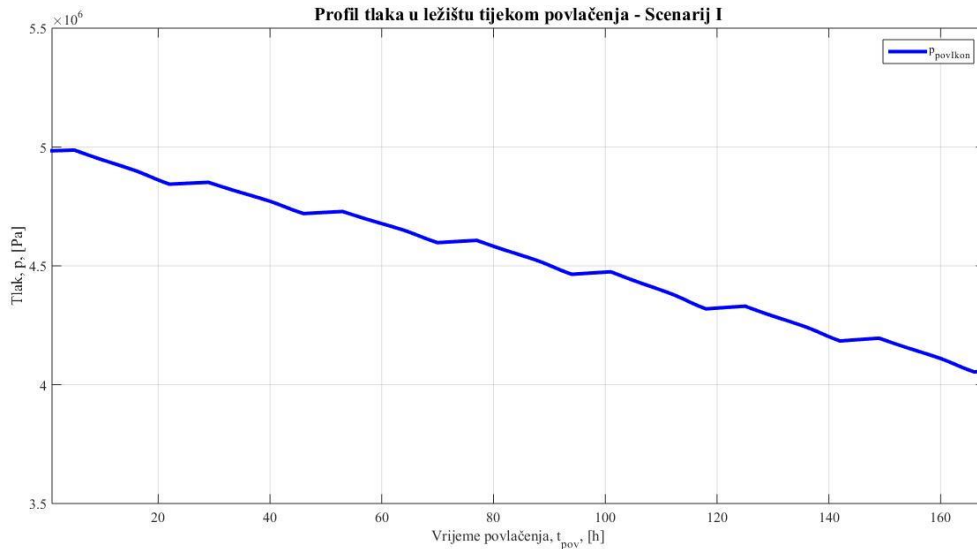
Naravno, kao i ranije neće se u proračunu koristiti volumen definiran u  $\text{Sm}^3$ , već se profil povlačenja plina prikazuje preko množine plina. Profil se, dobiva iz jednadžbe stanja idealnog plina.

$$n_{HTI} = \frac{V_{HT} * p_s}{Rm * T_s}$$

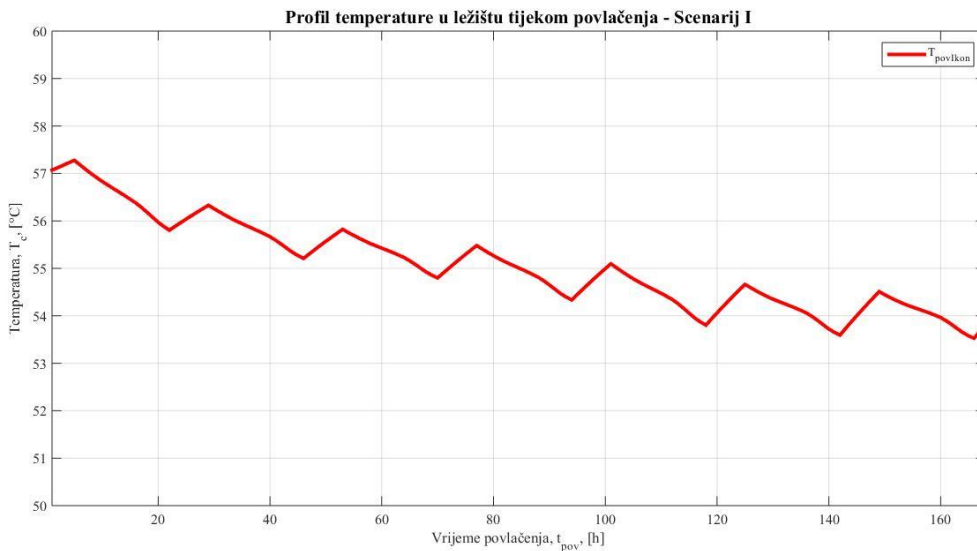


Dijagram 23. Vektor satne množinske dobave iz skladišta tijekom "hladnog tjedna"

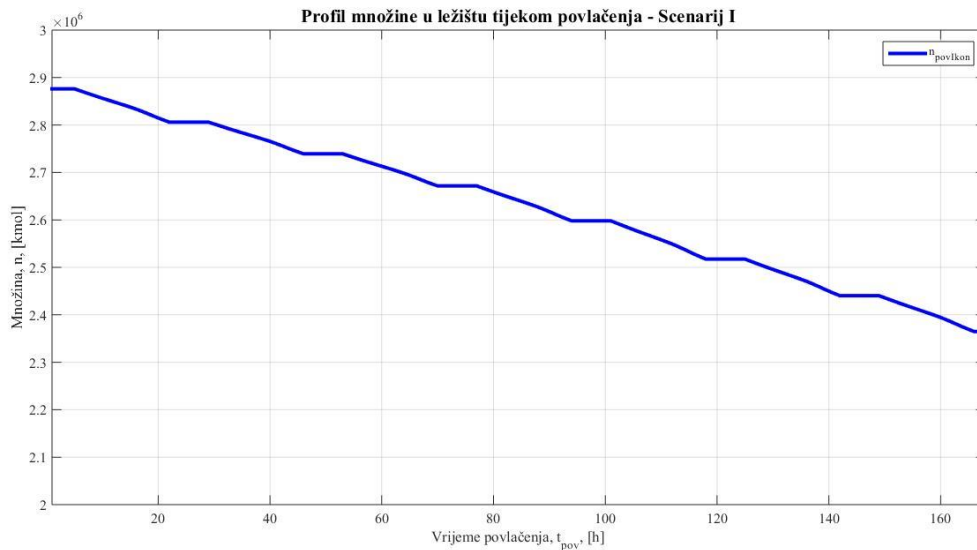
S obzirom na to da je model pražnjenja spremnika prikazan opisom faze crpljenja rezervi ležišnog plina, nema potrebe ovdje ponavljati postupak. U fazi pražnjenja spremnika ne koristi se kompresor, već se plinu na izlasku iz ležišta, po potrebi reducira tlak. Zato će se ovdje prikazati samo dinamika tlaka, temperature i množine plina u ležištu, te će se one usporediti s onima iz drugog scenarija.



Dijagram 24. Profil tlaka u ležištu tijekom povlačenja - Scenarij I



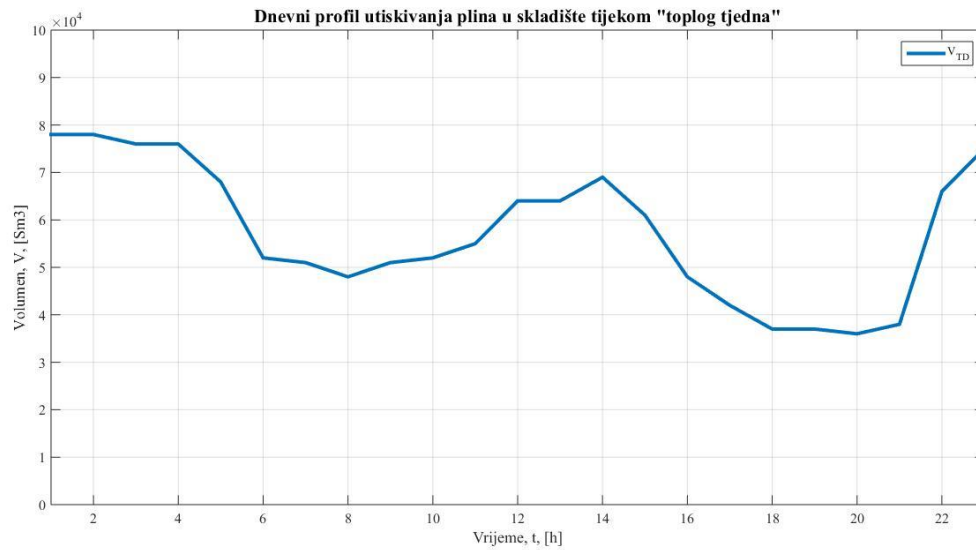
Dijagram 25. Profil temperature u ležištu tijekom povlačenja - Scenarij I



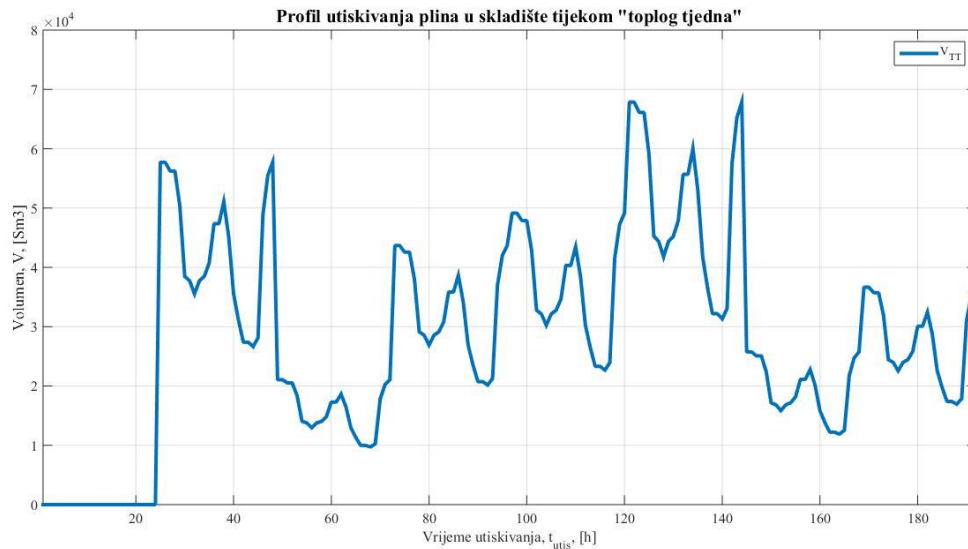
Dijagram 26. Profil množine u ležištu tijekom povlačenja - Scenarij I

### 3.3.1.2. Utiskivanje plina

Nakon jednog „hladnijeg karakterističnog tjedna“, spremnik će se promatrati kroz jedan „topliji karakterističan tjedna“. Tada će potražnja za plinom biti smanjena i javiti će se višak plina u plinsko transportnom sustavu. Zato će skladište preuzeti ulogu ponora plina te će se višak plina u njega spremati. Početni uvjeti prije utiskivanja odgovaraju stanju plina nakon završetka pražnjenja tijekom „hladnijeg tjedna“, te će iznositi 40,573 bar i 326,8125 K. Treba primijetiti da se ovdje zanemari naknadno zagrijavanje plina do  $T_{ZK}$ , jer je ono potpuno irelevantno kod uspoređivanja scenarija I i II. Kao i za slučaj pražnjenja potrebno je odabrati profil utiskivanja plina u ležište tijekom „karakterističnog toplijeg tjedna“. Analogno pražnjenju, određuje se dnevni profil utiskivanja plina u spremnik,  $V_{TD}$ , a suma njegovih vektorskih članova jednaka je maksimalnoj mogućoj dobavi kompresora pri utiskivanja, a poznato je da ona iznosi  $1,4 \cdot 10^6 \text{ Sm}^3$  plina dnevno. Iz njega slijedi, nakon množenja s vektorom skaliranja  $X_{utis}$  (jednak je vektoru  $X_{pov}$ , tjedni profil utiskivanja plina tijekom tjedna niske potražnje,  $V_{TT}$ ). Na sljedećim dijagramima su pokazani profili utiskivanja  $V_{TD}$  i  $V_{TT}$ .

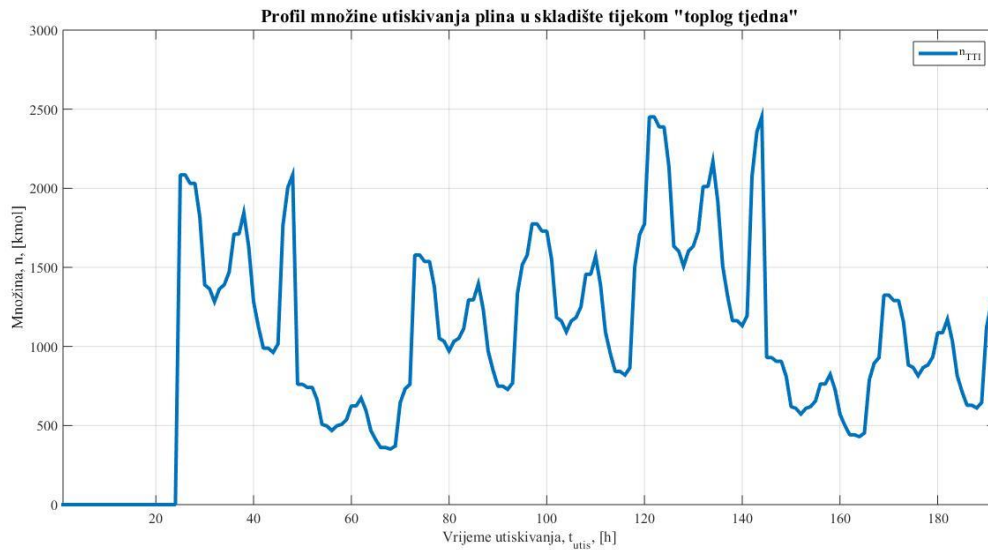


Dijagram 27. Dnevni profil utiskivanja u skladište tijekom "toplog tjedna"



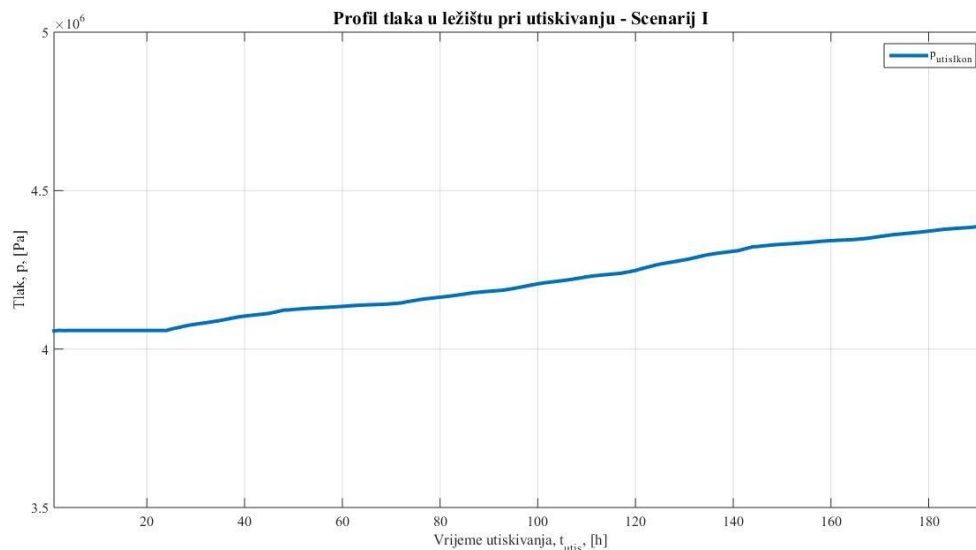
Dijagram 28. Profil utiskivanja plina u skladište tijekom "toplog tjedna"

Korištenjem vektora  $V_{TT}$  uz standardne uvjete, lako se dobiva i množinski zapis utiskivanja plina tijekom „toplijeg tjedna“,  $n_{TTI}$ , koji je prikazan na sljedećem dijagramu.

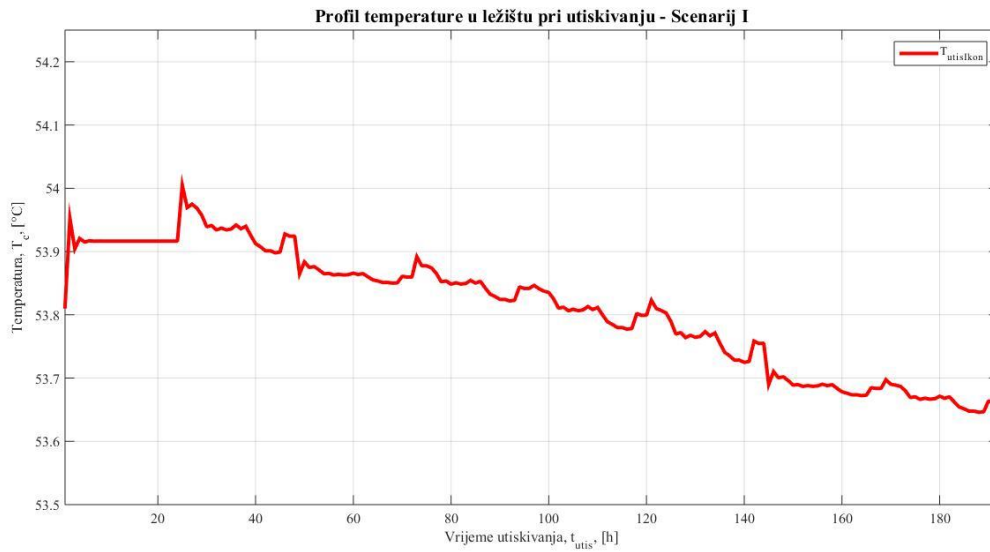


Dijagram 29. Profil množine utiskivanja plina u skladište tijekom "toplog tjedna"

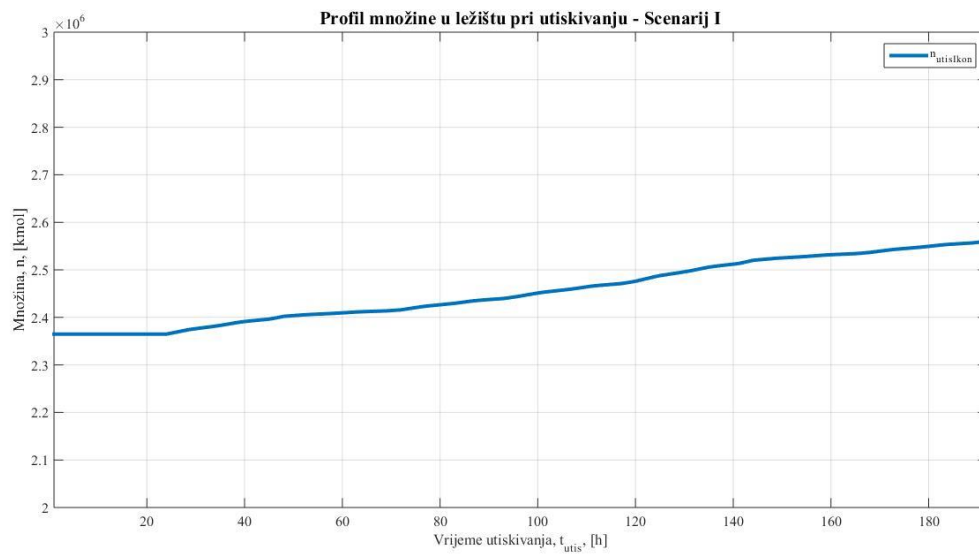
S obzirom da je ranije opisan matematički model punjenja spremnika (do potpune napunjenosti), isti se, uz izmjenu indeksnih oznaka, može primijeniti i ovdje. Zato nije potrebno ponovno zapisivati isti postupak, već će se prikazati relevantne varijable koje su potrebne za usporedbu sa drugim scenarijem. Promatrati će se dinamika temperature, tlaka i množine u ležištu, potrebna snaga motora za pogon kompresora i pripadajuća potrošnja goriva.



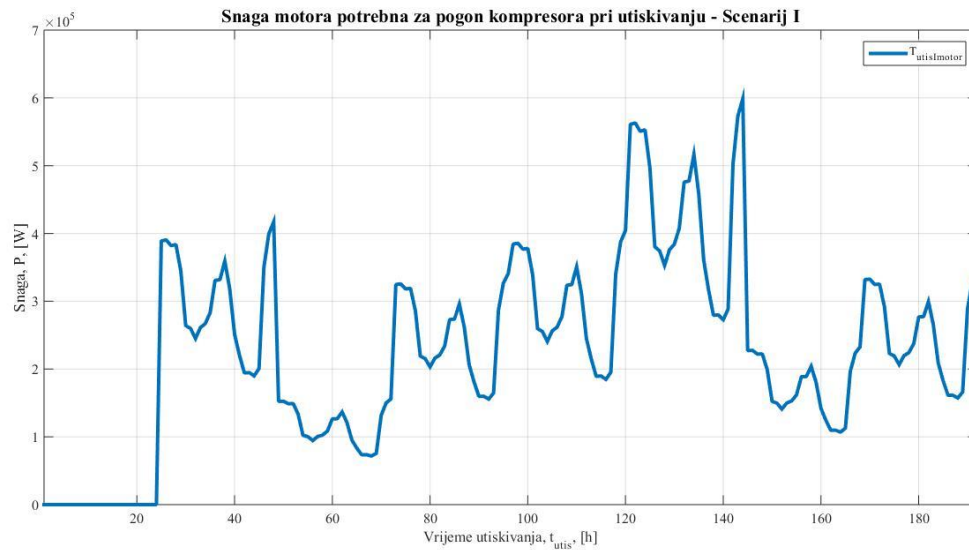
Dijagram 30. Profil tlaka u ležištu pri utiskivanju - Scenarij I



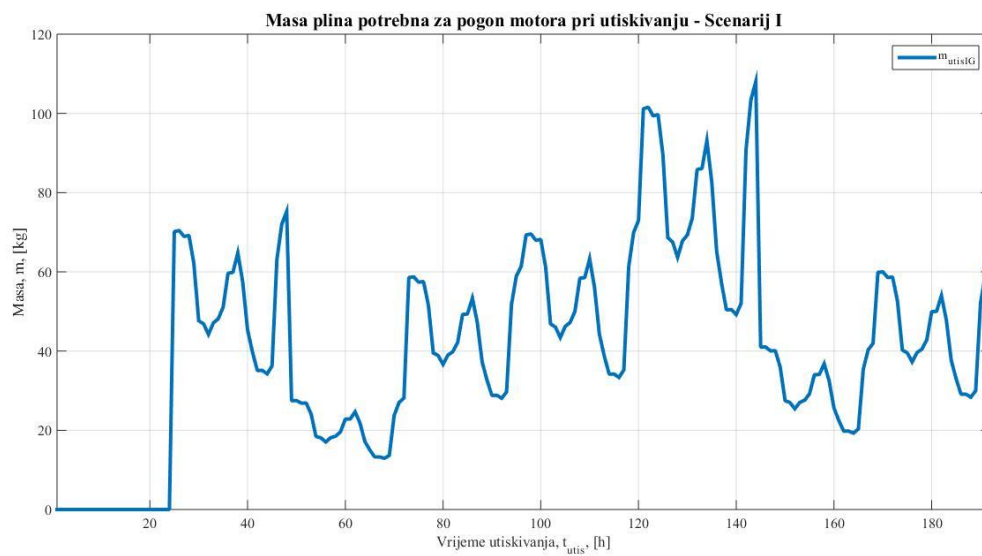
Dijagram 31. Profil temperature u ležištu pri utiskivanju - Scenarij I



Dijagram 32. Profil množine u ležištu pri utiskivanju - Scenarij I



Dijagram 33. Snaga motora potrebna za pogon kompresora pri utiskivanju - Scenarij I



Dijagram 34. Masa plina potrebna za pogon motora pri utiskivanju - Scenarij I



### 3.3.2. Scenarij II

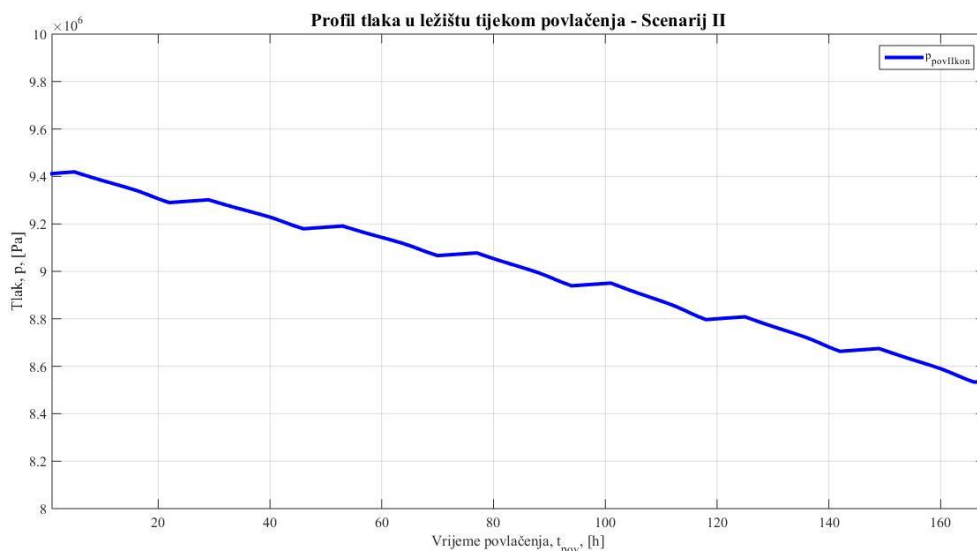
U drugom scenariju razmatra se rad skladišta plina pri napunjenosti od 80%. Kada je spremnik napunjen na 80 % napunjenosti, dostupni volumen u njemu je  $V_{II} = 96,384 * 10^6 \text{ Sm}^3$ . U skladu s time, može se izračunati i množina plina unutar spremnika, prema sljedećoj jednadžbi.

$$n_{II} = 0.8 * (n_{ukon}(2088) - n_{ckon}(16320)) + n_{ckon}(16320) = 5,4873 * 10^6 \text{ kmol}$$

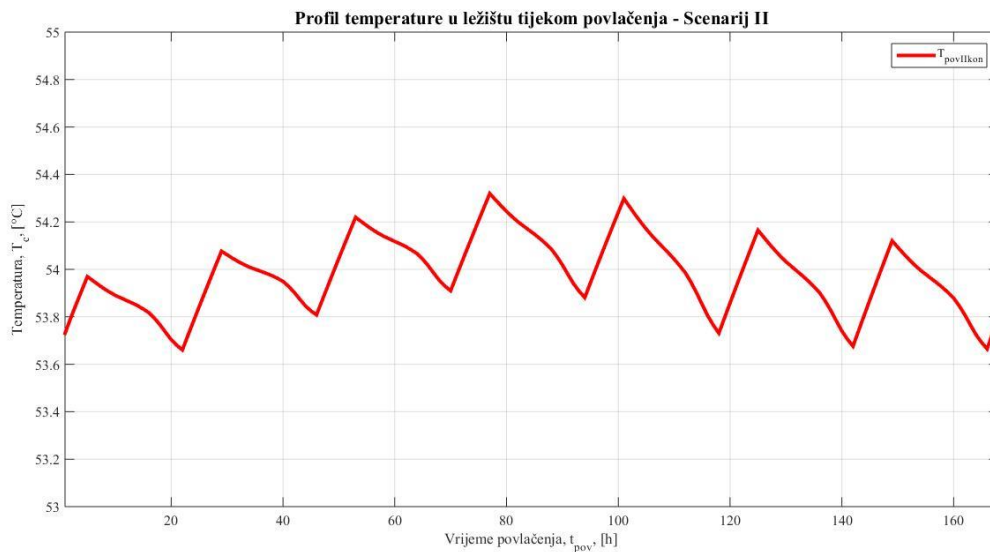
Koristeći dobivenu vrijednost množine, mogu se odrediti vrijednosti tlaka i temperature u spremniku kada je on napunjen na 80% napunjenosti. Uzima se da vrijednost  $n_{II}$  odgovara množini  $n_{ukon}(1667)$ , iz čega slijedi da je  $p_{II} = p_{ukon}(1667) = 94,119 \text{ bar}$  i  $T_I = T_{ukon}(1667) = 326,7303 \text{ K}$ . Kao što je već ranije spomenuto, spremnik u oba scenarija će biti podvrgnut, najprije procesu pražnjenja (povlačenje plina), a nakon toga procesu punjenja (utiskivanje plina).

#### 3.3.2.1. Povlačenje plina

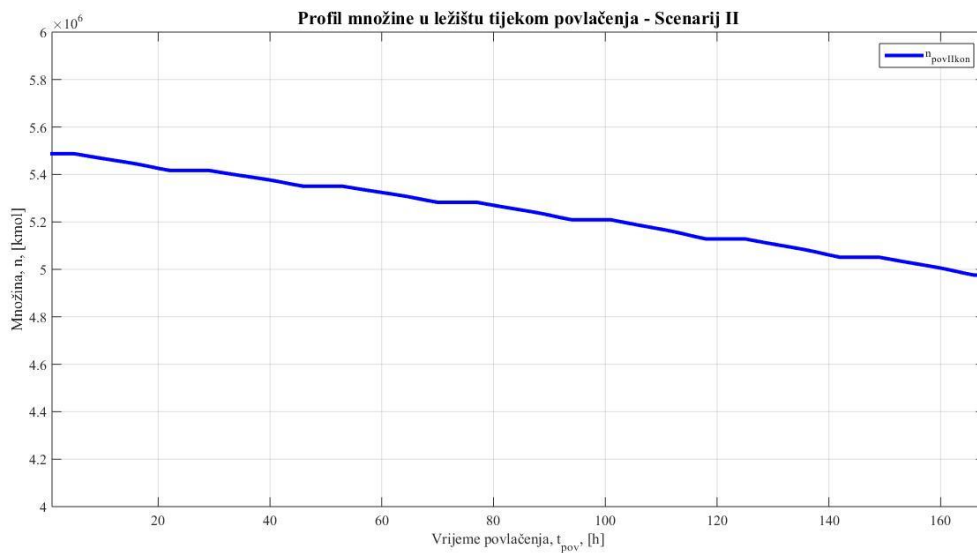
Kako bi se mogli uspoređivati scenariji, potrebno je da njihovi profili povlačenja budu jednaki, te nije potrebno ponovno pokazivati iste dijagrame. Jedina promjena je naziv profila povlačenja u množinskom obliku, koji postaje  $n_{HTII}$ . S obzirom na to da je i ovdje suvišan prikaz proračuna, dati će se prikaz dinamike tlaka, temperature i množine plina tijekom povlačenja u „karakterističnom hladnom tjednu“.



Dijagram 35. Profil tlaka u ležištu povlačenja - Scenarij II



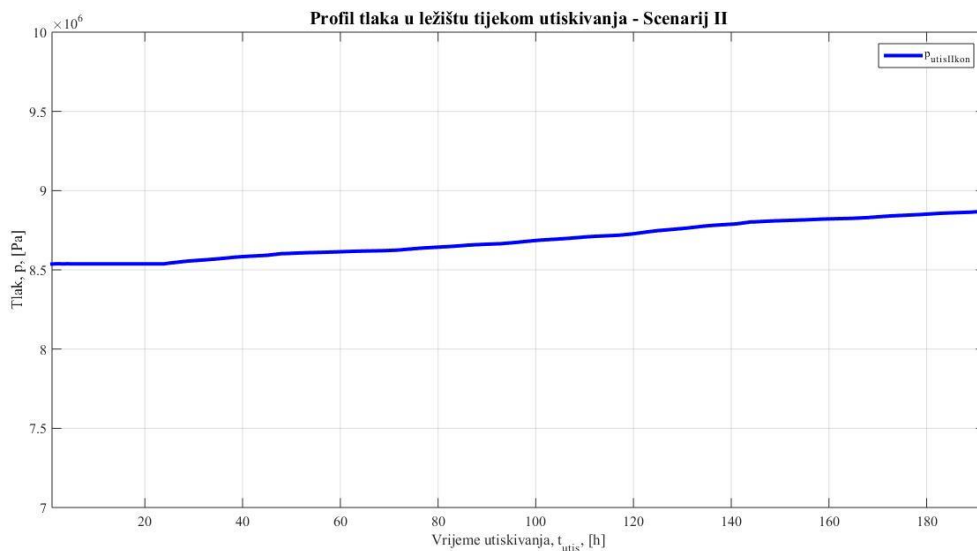
Dijagram 36. Profil temperature u ležištu tijekom povlačenja - Scenarij II



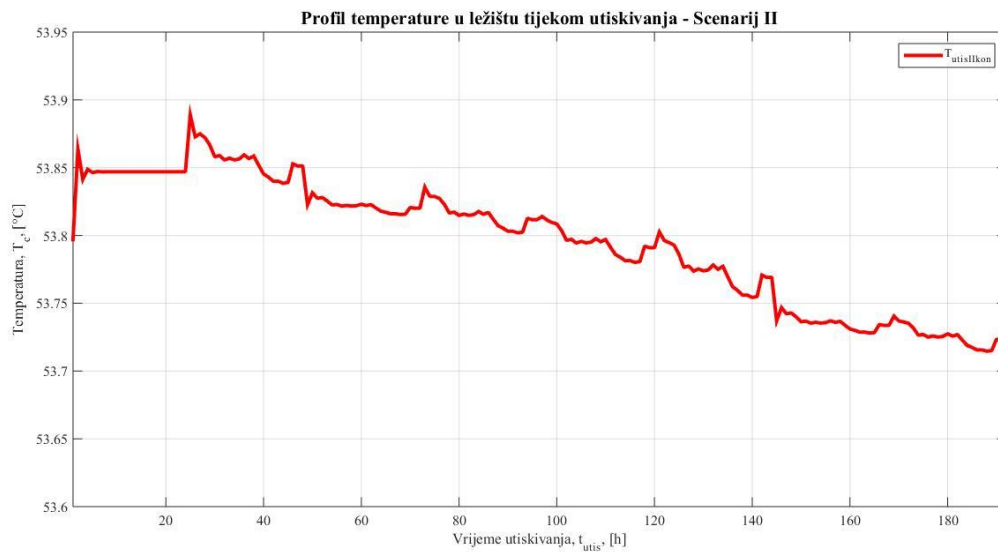
Dijagram 37. Profil množine u ležištu tijekom povlačenja - Scenarij II

### 3.3.2.2 Utiskivanje plina

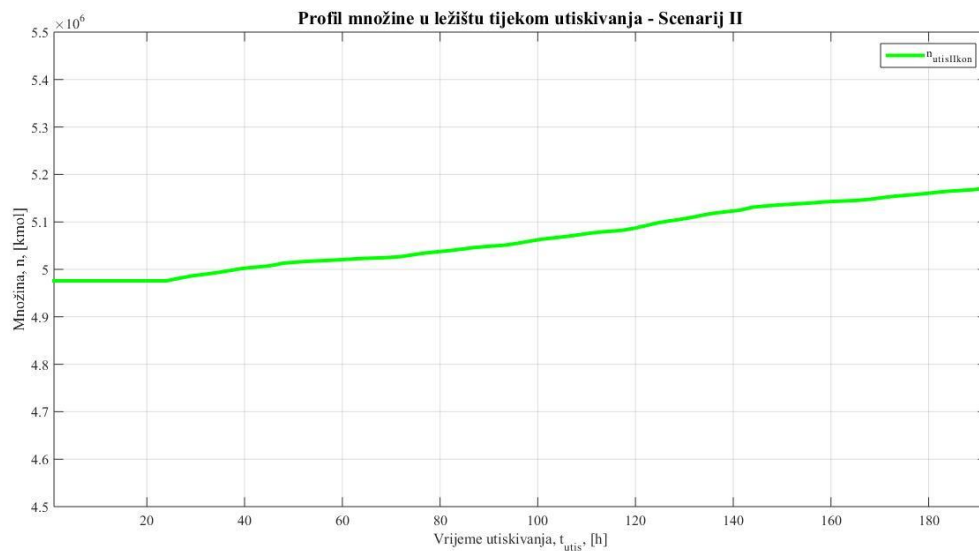
Kod promatranja utiskivanja plina u scenariju II, također nije potrebno prikazivati profil utiskivanja jer je jednak onome iz prvoga scenarija. Isto kao i kod povlačenja plina, promijenjen je jedino naziv profila utiskivanja u množinskom obliku, te je on  $n_{TII}$ . Prikaz proračuna nije potreban, nego će se dati dijagrami koji opisuju dinamiku tlaka, temperature i množine plina u ležištu te potrebne snage za pogon kompresora uz pripadajuću potrošnju goriva.



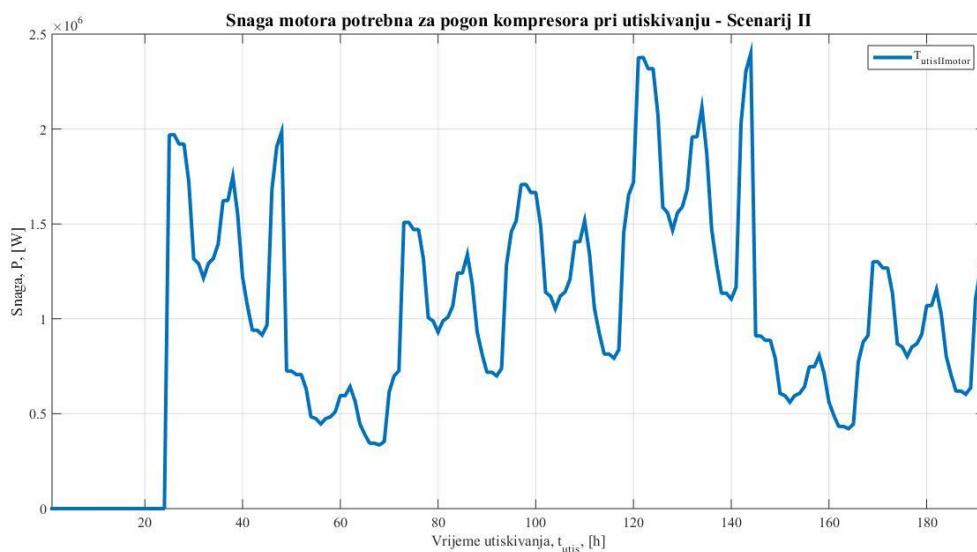
Dijagram 38. Profil tlaka u ležištu tijekom utiskivanja - Scenarij II



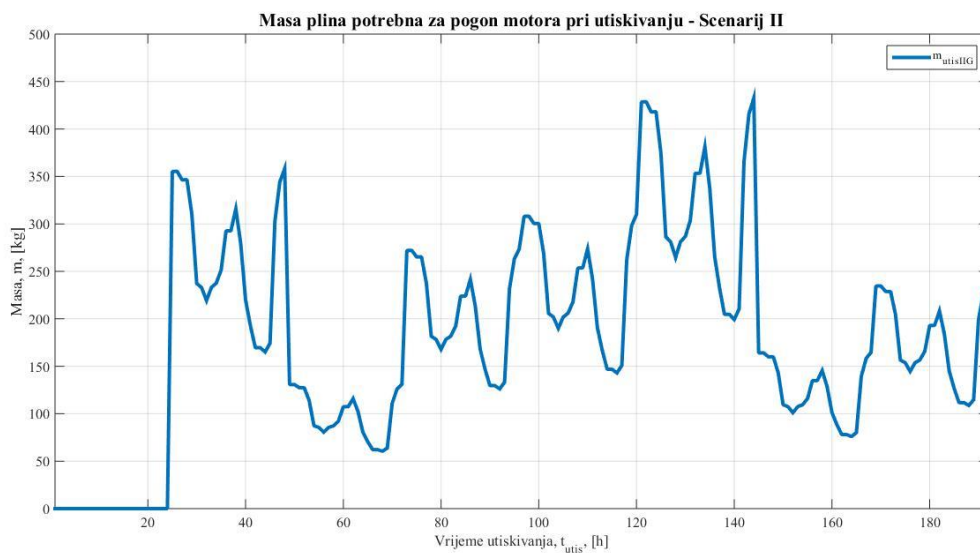
Dijagram 39. Profil temperature u ležištu tijekom utiskivanja - Scenarij II



Dijagram 40. Profil množine u ležištu tijekom utiskivanja - Scenarij I



Dijagram 41. Snaga motora potrebna za pogon kompresora pri utiskivanju - Scenarij II



Dijagram 42. Masa plina potrebna za pogon motora pri utiskivanju - Scenarij II

### 3.4. Analiza matematičkog modela

Prema prikazanom matematičkom modelu faze crpljenja dijela ležišnih rezervi plina, vidljiva je puno veća dobit plina, nego što se istoga mora uložiti za pogon kompresora. Međutim, visokotlačnom ležišnom plinu, prije ulaska u mješalište značajno se reducira energetska stanje, što nije opravdano sa stajališta energetike. Razumno bi bilo razmišljati o iskorištavanju tog pada tlaka, korištenjem plinske turbine, koja bi omogućila dobivanja barem dijela raspoložive energije. U modelu koji opisuje punjenje spremnika do razine maksimalne napunjenosti također je vidljiva relativno mala potrošnja plina za pogon kompresora što pokazuje opravdanost utiskivanja plina u ležište u trenucima smanjene potražnje i korištenja istog kao spremnika plina. On može imati značajnu ulogu u plinsko transportnom sustavu, zbog mogućnosti pokrivanja vršne potražnje što povećava sigurnost opskrbe plinom na području Republike Hrvatske. Usporedbom dvaju scenarija jasno je, kao što je već i spomenuto da bi bilo dobro, sa stajališta energetike, da spremnik bude na nižim razinama napunjenosti jer to smanjuje mogućnost gubitka energije tijekom njegovog povlačenja iz ležišta. Međutim, sa stajališta upravljanja plinskim sustavom nije razumno ostaviti spremnik na niskim razinama napunjenosti jer se gubi smisao samog spremnika. Upravitelj sustava ne smije dozvoliti nedovoljnu razinu napunjenosti spremnika tijekom povećane potražnje. Zato je na primjeru ovog skladišta vidljiva oprečnost između energetske učinkovitosti i upravljanja plinskim sustavom. Taj jaz bi se mogao smanjiti primjerice korištenjem plinske turbine kada plin s povišenim tlakom izlazi iz ležišta.

#### **4. ZAKLJUČAK**

Projekt izgradnje vršnog podzemnog skladišta plina "Grubišno Polje" je od velike važnosti za plinski transportni sustav Republike Hrvatske. Crpljenje plina u njegovoj prvoj fazi omogućiti će raspolaganje s dodatnih 150 milijuna  $\text{Sm}^3$  u sustavu, a u isto vrijeme će se uložiti samo oko 1600 tona plina. Njegova druga faza, to jest korištenje ležišta u svrhu malog podzemnog skladišta omogućuje rasterećenje trenutno jedinog plinskog skladišta "Okoli", koje se ne može nositi sa kratkotrajnim fluktuacijama u potražnji za plinom. Odlika ovog podzemnog skladišta su veliki kapaciteti utiskivanja i povlačenja plina iz skladišta, što pogoduje kvalitetnijoj dinamici cijelog sustava. Isto tako, njegovom izgradnjom i izgradnjom drugih strateških projekata plinskog sustava, potpuno će se osigurati kvaliteta opskrbe plinom u Republici Hrvatskoj. Valja naglasiti i relativno niske investicijske troškove projekta, na što je ponajviše utjecao položaj magistralnog plinovoda "Virovitica – Kutina" koji se nalazi u neposrednoj blizini eksploatacijskog polja "Grubišno Polje", a to znači i manje infrastrukture potrebne za transport plina. Matematički model rada skladišta, napravljen po uzoru na skladište u Grubišnom Polju pokazao je manu ovakvih postrojenja, koja se očituje u radu kompresora na višim razinama napunjenosti. Tada bi pri utiskivanju bilo potrebno dovoditi više snage kompresoru, što znači da raste i potrošnja goriva. S druge strane, u fazi povlačenja plina događao bi se znatan pad energetske vrijednosti plina, uslijed redukcije njegovog tlaka.

## 5. IZVORI

- [1] *Potražnja za prirodnim plinom*, web-stranica "Međunarodne energetske agencije" <https://www.iea.org/reports/natural-gas-information-overview/demand>; pristup: 15.11.2021.
- [2] *Uloga skladišta prirodnog plina u plinskom sustavu*, završni rad, Putnik., A., Zagreb, rujan 2016.
- [3] *Izgradnja vršnog skladišta plina "Grubišno Polje"*, <https://www.psp.hr/izgradnja-vrsnog-skladista-plina-grubisno-polje>, web stranica, pristup: 15.11.2021.
- [4] *Desetogodišnji plan razvoja plinskog transportnog sustava Republike Hrvatske 2021.-2030.*, Plinacro d.o.o., Zagreb, svibanj 2020.
- [5] *Elaborat zaštite okoliša priključenja postojećih bušotina Gr-1z i Gr-2z za inicijalno crpljenje prirodnog plina iz eksploatacijskog polja ugljikovodika "Grubišno Polje" u svrhu izgradnje podzemnog skladišta prirodnog plina*, ECOIna d.o.o., Zagreb, siječanj 2019.
- [6] Prilagođeno prema [4], osobna izrada
- [7] *Podzemno skladište prirodnog plina na eksploatacijskom polju za podzemno skladištenje plina "Grubišno Polje"*, glavni projekt, Podzemno skladište plina d.o.o., Zagreb, srpanj 2021.
- [8] *Tehnička specifikacija za nabavu, montažu i puštanje u rad kompresorske paketne jedinice u sklopu projekta Podzemno skladište plina "Grubišno Polje"*, Podzemno skladište plina d.o.o., Inženjering za naftu i plin d.o.o., Zagreb, travanj 2020.
- [9] *Izmjene i dopune općih uvjeta opskrbe plinom* (NN 74/17), HERA, 2018.
- [10] *Model sklopa kompresorske stanice*, SCAN d.o.o., Zagreb, rujan 2020.
- [11] *Termodinamika I*, udžbenik, Galović, A., Zagreb, 2013.
- [12] *Podloge za vježbe iz Termodinamike II*, Halasz, B., Zagreb, 2001.
- [13] *Korelacijske jednadžbe za laminarnu i turbulentnu slobodnu konvekciju uz vertikalne ploče*, Churchill, S.W., Chu, H. H. S., 1975.
- [14] *Toplinske tablice*, Galović, A., Halasz, B., Boras, I., Zagreb, 2013.