

# Mogućnosti uskladištenja energije u iscrpljenim plinskim ležištima polja Žutica

---

**Smojver, Lucian**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:211440>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-28**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Preddiplomski studij geološkog inženjerstva

**MOGUĆNOSTI USKLADIŠTENJA ENERGIJE U ISCRPLJENIM PLINSKIM  
LEŽIŠTIMA POLJA ŽUTICA**

Završni rad

Lucian Smojver  
G2233

Zagreb, 2024.



KLASA: 602-01/24-01/76  
URBROJ: 251-70-13-24-1  
U Zagrebu, 19.09.2024.

Lucian Smojver, student

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/24-01/76, URBROJ: 251-70-13-24-1 od 21.05.2024. priopćujemo vam temu završnog rada koja glasi:

### MOGUĆNOSTI USKLADIŠTENJA ENERGIJE U ISCRPLJENIM PLINSKIM LEŽIŠTIMA POLJA ŽUTICA

Za mentora ovog završnog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i ocjeni završnog rada Izv.prof. dr.sc. Bruno Saftić nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog-fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Mentor:

(potpis)

Izv.prof. dr.sc. Bruno Saftić

(titula, ime i prezime)

Predsjednica povjerenstva za  
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Ana Maričić

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje  
Pašić

(titula, ime i prezime)

MOGUĆNOSTI USKLADIŠTENJA ENERGIJE U ISCRPLJENIM PLINSKIM LEŽIŠTIMA POLJA  
ŽUTICA

Lucian Smojver

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Procjena mogućnosti uskladištenja energije komprimiranim zrakom u slojevima gornjopanonskih pješčenjaka naftno-plinskih ležišta polja Žutica provedena je na temelju podataka iz 70 dubokih istraživačkih bušotina. Za izradu karata, geoloških profila, te izračun volumena kolektorskih stijena korišten je računalni program RockWorks. Ukupni volumen skladišta procijenjen je na 10 273 625,2 m<sup>3</sup>, s kapacitetom do 881,522 TJ energije. Skladištenje energije komprimiranim zrakom temelji se na tehnologiji uskladištenja energije u obliku potencijalne energije stlačenog zraka. Količina električne energije koja se može proizvesti iz uskladištenog zraka ovisi o efikasnosti korištenog CAES sustava. Iako su rezultati samo procjene, pružaju vrijedan alat za procjenu potencijala skladištenja energije u iscrpljenim plinskim ležištima. Obnovljivi izvori poput sunca, vjetra i vode ovise o sezonskim promjenama. Implementacija CAES sustava u takvim ležištima može stabilizirati energetske sustave, no potrebna su daljnja istraživanja za smanjenje gubitaka i poboljšanje tehnologije.

Ključne riječi: CAES, plinska ležišta, Žutica, RockWorks  
Završni rad sadrži: 30 stranica, 1 tablica, 12 slika, 0 priloga, i 18 referenci.  
Jezik izvornika: Hrvatski  
Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb  
Mentor: Izv.prof.dr.sc. Bruno Saftić  
Ocjenjivači: Izv.prof.dr.sc. Bruno Saftić  
Prof.dr.sc. Domagoj Vulin  
Doc.dr.sc. Iva Kolenković Močilac

## **SADRŽAJ**

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. UVOD .....</b>                                                   | <b>1</b>  |
| <b>2. ZEMLJOPISNI POLOŽAJ NAFTNO-PLINSKOG POLJA ŽUTICA.....</b>        | <b>2</b>  |
| <b>3. GEOLOŠKE ZNAČAJKE SAVSKE DEPRESIJE .....</b>                     | <b>3</b>  |
| 3.1. Stratigrafska obilježja .....                                     | 4         |
| 3.2. Strukturni odnosi.....                                            | 6         |
| <b>4. SKLADIŠTENJE ENERGIJE KOMPRIMIRANIM ZRAKOM (CAES) .....</b>      | <b>8</b>  |
| 4.1. Dijabatski CAES .....                                             | 8         |
| 4.2. Adijabatski CAES.....                                             | 9         |
| 4.3. Skladištenje u iscrpljenim plinskim ležištima .....               | 10        |
| <b>5. PRIMJENJENE METODE I REZULTATI.....</b>                          | <b>11</b> |
| 5.1. Karte dubine krovinske i podinske plohe podzemnog skladišta ..... | 17        |
| 5.2. Profili kroz potencijalno podzemno skladište .....                | 17        |
| 5.3. Izračun volumena kolektorskih stijena .....                       | 18        |
| 5.4. Izračun teoretskog kapaciteta uskladištenja energije .....        | 20        |
| <b>6. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK .....</b>                                  | <b>23</b> |
| <b>7. POPIS LITERATURE.....</b>                                        | <b>24</b> |
| 7.1. Objavljeni radovi .....                                           | 24        |
| 7.2. Neobjavljeni radovi .....                                         | 25        |

## POPIS SLIKA

|                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Slika 2-1.</b> Zemljopisni položaj naftno-plinskog polja Žutica.....                                                            | 2  |
| <b>Slika 3-1.</b> Prikaz Panonskog bazena ( <a href="https://www.researchgate.net">https://www.researchgate.net</a> ).....         | 3  |
| <b>Slika 3-2.</b> Stratigrafske jedinice polja Žutica na primjeru duboke bušotine ŽU-249DU (modificirano prema SAFTIĆ, 1993) ..... | 4  |
| <b>Slika 3-3.</b> Tektonska skica zapadnog djela Savske depresije (SAFTIĆ, 1993).....                                              | 6  |
| <b>Slika 4-1.</b> Skladištenje zraka u iscrpljenom plinskom rezervoaru (modificirano prema WAN <i>et al.</i> 2024.).....           | 10 |
| <b>Slika 5-1.</b> Karta lokacija odabranih bušotina naftno-plinskog polja Žutica.....                                              | 11 |
| <b>Slika 5-2.</b> Korelacijska shema genetskih intervala slojeva GIS A', GIS A i GIS A <sub>1-3</sub> .....                        | 12 |
| <b>Slika 5-3.</b> Karta relativne dubine krovinske plohe pješčenjaka A <sub>1-3</sub> .....                                        | 14 |
| <b>Slika 5-4.</b> Karta relativne dubine podinske plohe pješčanjaka A <sub>1-3</sub> .....                                         | 15 |
| <b>Slika 5-5.</b> Profili ležišta A <sub>1-3</sub> : a) poprečni profil 1-1' i b) uzdužni profil 2-2' .....                        | 16 |
| <b>Slika 5-6.</b> 3D geološki model sloja A <sub>1-3</sub> .....                                                                   | 18 |
| <b>Slika 5-7.</b> Volumetrijsko izvješće programa RockWorks.....                                                                   | 19 |

## POPIS TABLICA

|                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------|----|
| <b>Tablica 5-1.</b> Tablica ulaznog koda i rezultata..... | 22 |
|-----------------------------------------------------------|----|

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

| Oznaka         | Jedinica               | Opis                                                 |
|----------------|------------------------|------------------------------------------------------|
| $t$            | $^{\circ}\text{C}$     | Temperatura ležišta                                  |
| $T$            | K                      | Temperatura ležišta                                  |
| $\phi$         | %                      | Prosječna poroznost                                  |
| $h$            | m                      | Dubina ležišta                                       |
| $m_g$          | kg                     | Masa metana                                          |
| $V_t$          | $\text{m}^3$           | Ukupni volumen rezervoara                            |
| $V_p$          | $\text{m}^3$           | Početni volumen pora                                 |
| $V_{gCAES}$    | $\text{m}^3$           | Volumen metana nakon tlačenja na završni uvjet tlaka |
| $V_{pCAES}$    | $\text{m}^3$           | Volumen pora nakon tlačenja na završni uvjet tlaka   |
| $\rho_{ga}$    | $\text{kg}/\text{m}^3$ | Gustoća metana pri tlaku napuštanja                  |
| $\rho_{gCAES}$ | $\text{kg}/\text{m}^3$ | Gustoća metana nakon tlačenja na završni uvjet tlaka |
| $c_p$          | 1/bar                  | Stlačivost pora                                      |
| $f_g$          | bar/m                  | Gradijent tlaka frakturiranja                        |
| $p_{CAES}$     | bar                    | Završni tlak kompresije                              |
| $p_a$          | bar                    | Tlak napuštanja                                      |
| $p_{sr}$       | bar                    | Srednji tlak u ležištu                               |
| $p_f$          | bar                    | Tlak frakturiranja                                   |

## 1. UVOD

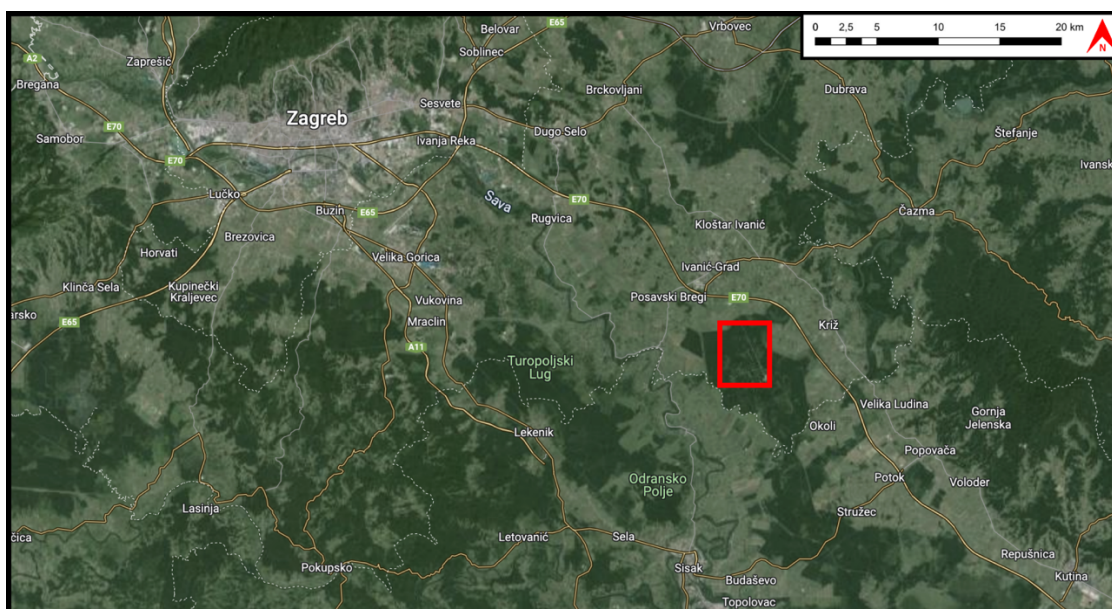
Pod pojmom uskladištenja električne energije često se asociraju litij-ionske baterije koje su danas dominantno sredstvo za pohranu energije. U njima i drugim vrstama baterija pohranjuje se kemijska energija koja se po potrebi pretvara u električnu energiju. Međutim u ovakvim sustavima nije moguće skladištenje velikih količina energije, a osobito nije moguće skladištenje većih količina energije u dužim vremenskim periodima. Iz tog razloga razvijene su tehnologije mehaničkog uskladištenja energije. Trenutno se upotrebljavaju dva takva sustava; hidroakumulacija pumpanjem vode i skladištenje energije komprimiranim zrakom.

Skladištenje energije komprimiranim zrakom (eng. *Compressed Air Energy Storage*, CAES) temelji se na tehnologiji uskladištenja energije u obliku potencijalne energije stlačenog zraka. Višak električne energije koristi se za pokretanje zračnih kompresora koji pumpaju zrak u vanjske spremnike ili prirodno nastale geološke formacije. Komprimirani zrak se može osloboditi po potrebi, čime se pokreće generatorska jedinica i generira električna energija. Ova metoda uskladištenja energije bi teoretski mogla minimizirati dnevne i sezonske oscilacije u proizvodnji i potrošnji energije čime bi se uravnotežio odnos ponude i potražnje električne energije.

U ovom radu provedena je procjena mogućnosti uskladištenja energije komprimiranim zrakom u slojevima gornjopanonskih pješčenjaka Poljana koji pripadaju iscrpljenim naftno plinskim ležištima polja Žutica. Dubine podinske i krovinske plohe slojeva pješčenjaka, koji čine podzemno skladište, određene su na temelju podataka iz 70 dubokih istraživačkih bušotina. Za izradu karata, geoloških profila, 3D modela te izračun volumena kolektorskih stijena korišten je računalni program RockWorks tvrtke RockWare. Izračun uskladištenja energije proveden je pomoću računalnog jezika Python.

## 2. ZEMLJOPISNI POLOŽAJ NAFTNO-PLINSKOG POLJA ŽUTICA

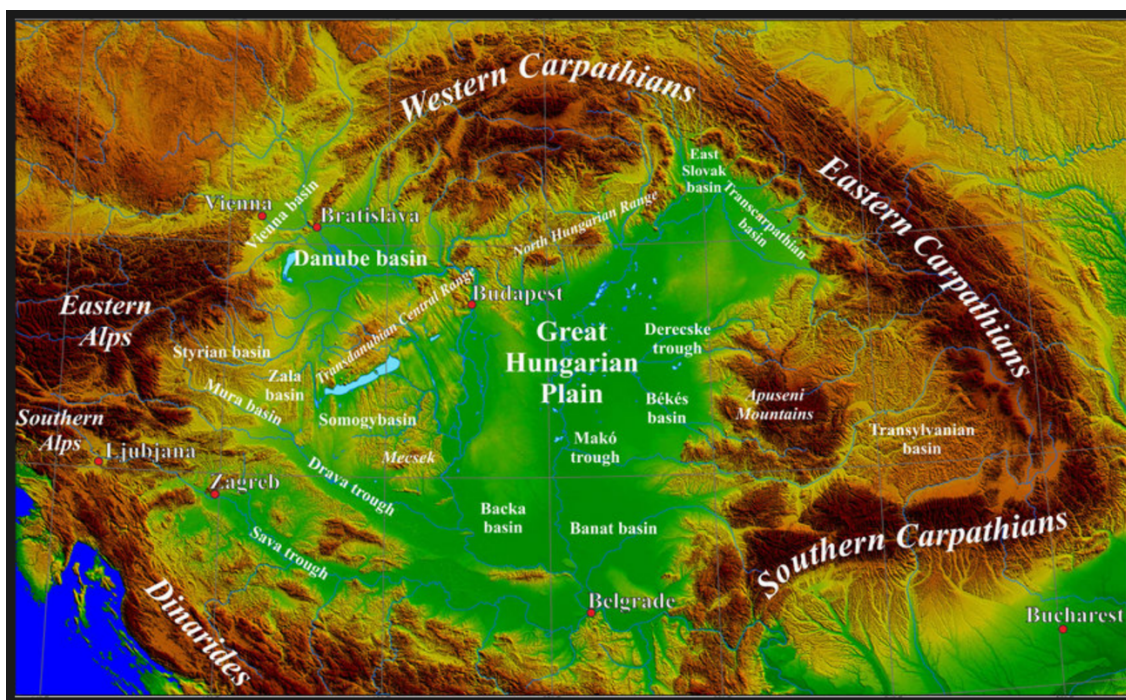
Naftno-plinsko polje Žutica nalazi se približno 40 km jugoistočno od Zagreba, na području istoimene šume u općini Velika Ludina (Slika 2-1.). Teren je gotovo sasvim ravan s nadmorskom visinom u rasponu od 96 do 100 metara, a ukupna površina eksploatacijskog polja Žutica iznosi 55,89 km<sup>2</sup>. Na polju je izbušeno ukupno 317 kanala bušotina različitih namjena od koji su većinski dio naftne bušotine. Uz bušotine se na području eksploatacijskog polja nalaze i otpremna stanica Žutica, kompresijska stanica, Centralna plinska stanica te osam mjernih stanica (RGNF, 2023). Naftno-plinsko polje Žutica se eksploatira od 1966. godine i najveće je nalazište nafte u Hrvatskoj.



Slika 2-1. Zemljopisni položaj naftno-plinskog polja Žutica

### 3. GEOLOŠKE ZNAČAJKE SAVSKE DEPRESIJE

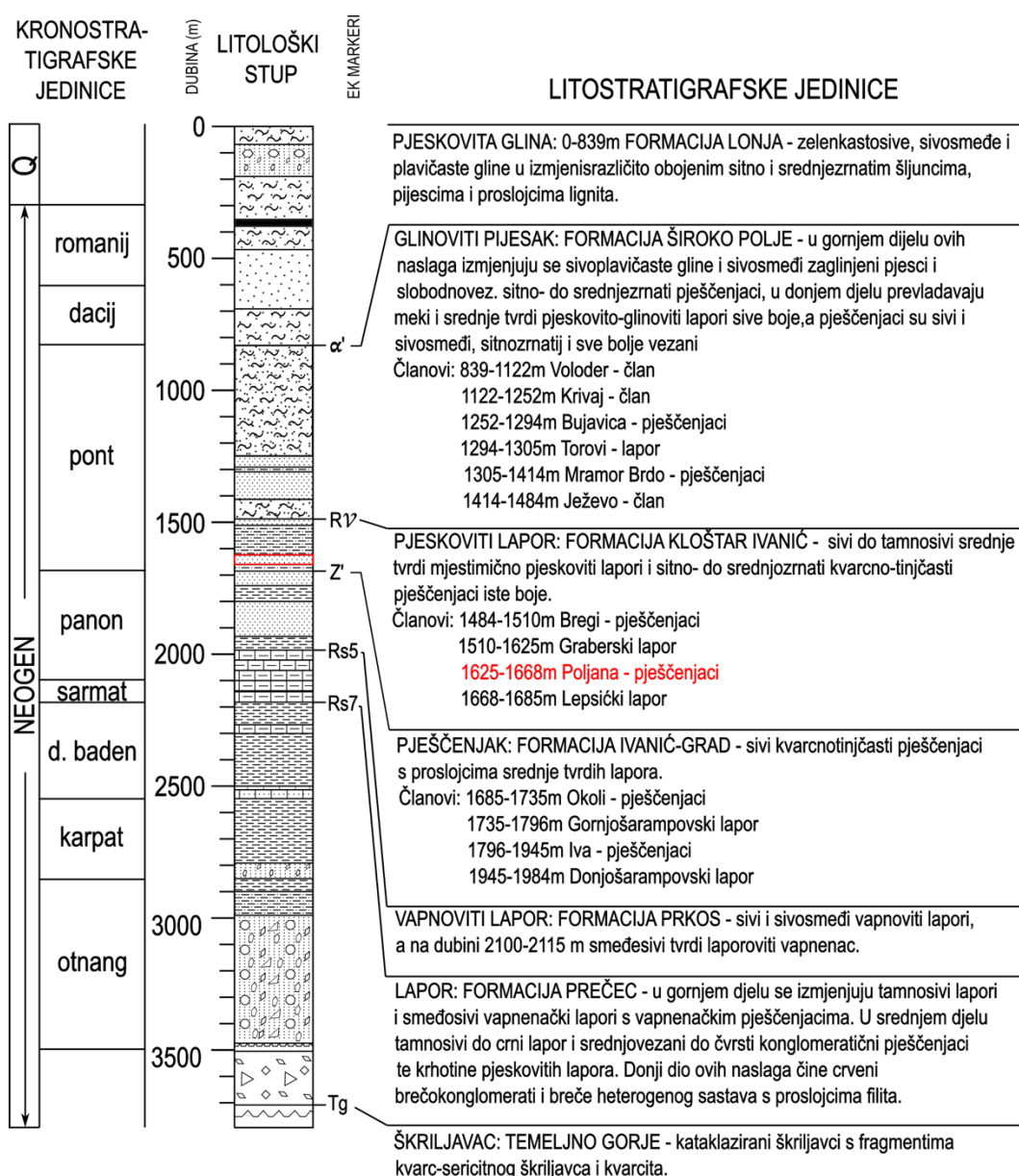
Naftno plinsko polje Žutica jedno je od brojnih polja smještenih uz sjeverni rub Savske depresije, praktički u jugozapadnom rubnom djelu Panonskog bazena. Panonski bazen je područje današnje Panonske ravnice ograničeno planinskim lancima Alpa, Karpata i Dinarida. Stijene koje ispunjavaju strukturne depresije Panonskog bazena nastale su taložnim okolišima praoceana Paratethysa te njegovim raspadom tijekom miocena, prije 17,5 do 20 milijuna godina i kasnijim razvojem Panonskog jezera kao jednoga zatvorenog mora koje se prvo osladilo a na kraju sasvim ispunilo deltama Paleodunava, Paleotise i drugih rijeka (Velić, 2007). Formacije stijena u tome području sastoje se od kompleksne magmatsko-metamorfne i manjim dijelom sedimentne podloge paleozojske i mezozojske starosti na kojoj slijedi sedimentni pokrov tercijarne i kvartarne starosti (Velić, 2007).



Slika 3-1. Prikaz Panonskog bazena (<https://www.researchgate.net>)

### 3.1. Stratigrafska obilježja

Naslage Savske depresije formirane su tijekom neogena i kvartara pri čemu većinom sadrže sedimentne stijene s manjim udjelom vulkanoklastita. Na slici 3-1. prikazan je litoški stup konstruiran na temelju podataka dobivenih iz duboke bušotine ŽU-249DU. Na njemu je prikazano šest formacija Savske depresije, kao i odgovarajuće kronostratigrafske i litostratigrafske jedinice.



**Slika 3-2.** Stratigrafske jedinice polja Žutica na primjeru duboke bušotine ŽU-249DU (modificirano prema SAFTIĆ, 1993)

Prema podacima iz geološkog stupa najstarije naslage, utvrđene na dubini od 3700 m, sastoje se od kataklaziranih škriljavca s fragmentima kvarc-sericitnog škriljavca i kvarcita egenburške starosti.

Nakon njih slijede naslage formacije Prečec koja se proteže od 2115 m do 3700 m dubine. U donjem djelu formacije nalaze se crveni brečokonglomerati i breče heterogenog sastava s proslojcima filita donjeg miocena. U srednjem djelu slijede srednjomiocenski, tamnosivi do crni lapor i srednjovezani do čvrsti konglomeratični pješčenjaci te krhotine pjeskovitih lapora. U gornjem djelu ustanovljena je izmjena tamnosivih lapora i smeđesivih vapnenačkih lapora s vapnenačkim pješčenjacima također srednjomiocenske starosti.

Zatim, na dubini od 1984 m do 2115 m, slijedi formacija Prkos. Donji dio ove formacije, od 2100 m do 2115 m dubine, sastoji se od smeđesivih tvrdih laporovitnih vapnenaca srednjeg miocena dok se u gornjem djelu nalaze sivi i sivosmeđi vapnoviti lapori gornjeg miocena.

Sljedeće naslage rasprostiru se od 1685 m do 1984 m dubine, te pripadaju formacij Ivanić-Grad. One se sastoje od sivih kvarcotinjčastih pješčenjaka s proslojcima srednje tvrdih lapora gornjeg miocena. Unutar ove formacije nalaze se dva intervala sa slojevima kolektorskih stijena, a to su naftonosni pješčenjaci Iva i Okoli.

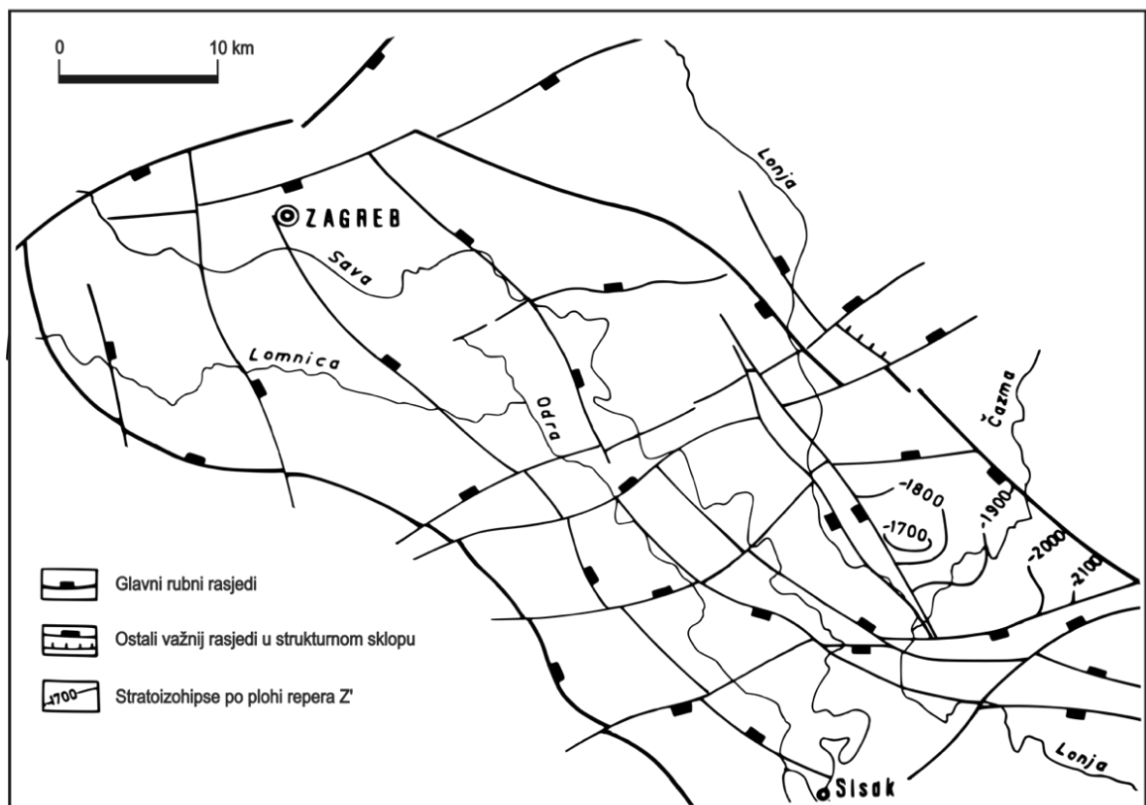
Njih prati formacija Kloštar Ivanić od 1484 m do 1685 m dubine. Tu se nalaze sivi do tamnosivi, srednje tvrdi, mjestimično pjeskoviti lapori i sitno do srednjozrnati kvarcotinjčasti pješčenjaci pontske, odnosno gornjomiocenske starosti. U ovoj formaciji nalazimo relevantne plinske pješčenjake Poljana na dubini od 1625 m do 1668 m. Oni su nastali istodobnim taloženjem pješčenjaka u udubljenjima na morskome dnu i taloženjem silita i lapora po kosinama i vrhovima podmorskih uzvišenja (Saftić, 1993).

Potom slijedi Formacija Široko Polje, također pontske starosti. U njezinom donjem djelu, od 1249 m do 1685 m dubine, prevladavaju meki i srednje tvrdi pjeskovito-glinoviti lapori sive boje dok su pješčenjaci sivi i sivosmeđi, sitnozrnati i sve bolje vezani. Nakon njih izmjenjuju se sivoplavičaste gline i sivosmeđi zaglinjeni pijesci i slabo vezani sitno do srednjezrnati pješčenjaci sve do 839 m dubine.

Najpliće i najmlađe naslage, protežu se od površine do 839 m dubine. Formirane su za vrijeme pliocena i kvartara te pripadaju formaciji Lonja. To su zelenkastosive, sivosmeđe i plavičaste gline u izmjeni s različito obojenim sitno i srednjezrnatim šljuncima, pijescima i proslojcima lignita.

### 3.2. Strukturni odnosi

Na slici 3-3. prikazana je pojednostavljena skica tektonskih odnosa zapadnog djela Savske depresije. Kompleksnost tektonskih odnosa rezultat je subdukcije Jadranske ploče ispod Dinarida i Alpa, proces koji je krenuo tijekom eocena te još uvijek traje. Interpretacijom slike može se uočiti da cijelo područje potpuno ograničeno rubnim normalnim rasjedima. Također je značajan utjecaj rasjednog sustava Samoborska gora – Medvednica – Kalnik koji predstavlja zonu po kojoj su izdignute Medvednica i okolne gore. Medvednička rasjedna zona rezultat je osobito izražene kompresije uslijed izdizanja Dinarida i istočnih Alpa (Velić, 2007). Detalj istraživanog područja ocrtan je na slici 3-3. stratoizohipsom “-1700” koja zapravo, u grubo i u regionalnom mjerilu, označava lokaciju južne antiklinale polja Žutica.



Slika 3-3. Tektonska skica zapadnog djela Savske depresije (Saftić, 1993)

Početak razvoja strukturnih odnosa u Savskoj depresiji, tijekom oligocena i starijeg miocena, karakteriziran je glavnom fazom ekstenzije koja se odlikuje širenjem i produbljivanjem depresije. U razdoblju pliocena i kvartara slijedi neotektonska faza, obilježena promjenama u regionalnom stresu te izraženom kompresijom i transpresijom čime se dodatno deformiraju i oblikuju unutarnje strukture depresije. U završnoj tektonskoj fazi, tijekom transpresije, dolazi do konačnog oblikovanja podzemnih struktura. Ova faza je od velikog značaja jer su tada formirane strukturne zamke za ugljikovodike. Formirani su nizovi kratkih "en-echelon" bora, čije rasjednute antiklinale tvore većinu naftnih i plinskih polja u Savskoj depresiji (Validžić, 2021).

#### **4. SKLADIŠTENJE ENERGIJE KOMPRIMIRANIM ZRAKOM (CAES)**

Sustavi za skladištenje energije komprimiranim zrakom (eng. *Compressed Air Energy Storage*, CAES) rade na principu pretvaranja električne energije u potencijalnu energiju stlačenog zraka, i obrnuto. Višak električne energije, nastao radi veće proizvodnje ili manje potrošnje, koristi se za pokretanje zračnih kompresora koji pumpaju zrak u umjetne spremnike ili prirodno nastale podzemne formacije. Komprimirani zrak se kasnije može osloboditi, tijekom razdoblja veće potrošnje ili smanjene proizvodnje električne energije. Ekspanzijom zraka pokreće se generatorska jedinica i time se mehanička energija pretvara u električnu energiju. Postoji veliki broj različitih vrsta CAES sustava, i tehnologija koje se primjenjuju za kompresiju i ekspanziju zraka. S obzirom na proces rada oni se mogu podijeliti u dvije glavne skupine; dijabatski i adijabatski CAES

##### **4.1. Dijabatski CAES**

Kod tradicionalnih, dijabatskih CAES (D-CAES) proces započinje kompresijom zraka pomoću visokotlačnog kompresora pokretanog električnim motorom. Kompresija uzrokuje porast temperature zraka te se u D-CAES sustavima ta toplina odbacuje u atmosferu pomoću izmjenjivača topline, što dovodi do gubitaka energije (Bikić, 2020). Kada je potrebna električna energija, zrak se iz spremnika ispušta prema turbini. Međutim, budući da komprimirani zrak zbog ekspanzije hladi, prije ulaska u turbinu potrebno je ponovno zagrijavanje. U D-CAES sustavima to se postiže sagorijevanjem fosilnih goriva, najčešće prirodnog plina, u komori za izgaranje. Zagrijani zrak prolazi kroz turbinu koja pokreće generator i proizvodi električnu energiju. Efikasnost sustava je ograničena jer se značajan dio energije gubi kroz odbacivanje topline tijekom kompresije, a korištenje fosilnih goriva također smanjuje učinkovitost i ekološku održivost sustava. Tipična učinkovitost D-CAES sustava kreće se oko 40-55%, ovisno o dizajnu postrojenja (Laython, 2020).

Danas postoje samo dva operativna CAES postrojenja; postrojenje Huntorf u Njemačkoj, s kapacitetom proizvodnje od 321 MW i efikasnošću od oko 42%, te postrojenje McIntosh u SAD-u, s kapacitetom od 110 MW i efikasnošću od 54% (Bikić, 2020). Oba postrojenja koriste dijabatsko skladištenje komprimiranog zraka unutar solnih doma. Tvornica Huntorf dovršena je 1978. te predstavlja prvu elektranu za skladištenje energije u obliku komprimiranog zraka na svijetu.

## 4.2. Adijabatski CAES

U adijabatskom procesu nema prijenosa topline između sustava i okoline te za razliku od dijabatskih sustava, adijabatski CAES (A-CAES) sustavi predstavljaju napredniji i ekološki prihvatljiviji pristup. Proces također započinje kompresijom zraka pri čemu se za stlačivanje koristi višak električne energije iz mreže, najčešće iz obnovljivih izvora energije. Za razliku od dijabatskih sustava, u A-CAES sustavima se toplina koja nastaje tijekom kompresije ne ispušta u atmosferu, već se pohranjuje u poseban spremnik toplinske energije (TES, eng. *Thermal Energy Storage*) (Bikić, 2020). Kada je potrebno generirati električnu energiju, komprimirani zrak se ispušta iz spremnika i prolazi kroz izmjenjivač topline u kojem se zagrijava toplinom pohranjenom u TES sustavu. Nakon što je zrak ponovno zagrijan, prolazi kroz turbinu gdje se ekspanzija zraka koristi za pokretanje generatora i proizvodnju električne energije. Na ovaj način eliminirana je potreba za dodatno sagorijevanje fosilnih goriva, čime se smanjuju emisije stakleničkih plinova i poboljšava ekološka održivost.

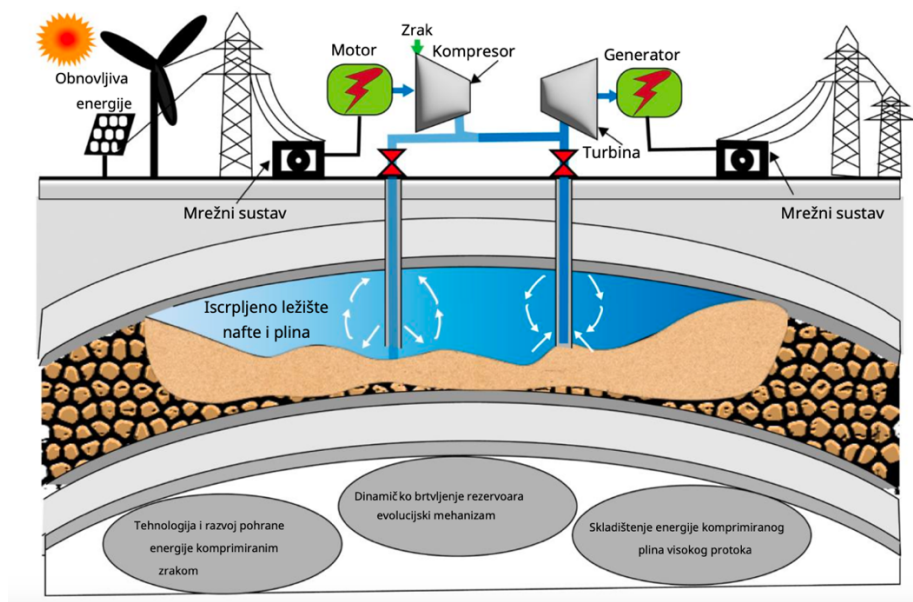
Efikasnost A-CAES sustava teoretski može doseći i do 70% (Laython, 2020), što je značajno više u usporedbi s D-CAES sustavima. Osim toga, budući da ne koriste fosilna goriva, A-CAES sustavi nude CO<sub>2</sub> neutralnu proizvodnju električne energije, što je posebno važno za integraciju s obnovljivim izvorima energije. Iako trenutno ne postoji niti jedno komercijalno A-CAES postrojenje, postoje brojni projekti. Najznačajniji je njemački projekt ADELE, koji cilja na izgradnju postrojenja s učinkovitosti od 70% (Heitmann, 2020), pokazuje veliki potencijal ove tehnologije, iako se ona još uvijek nalazi u fazi istraživanja i simulacija.

### 4.3. Skladištenje u iscrpljenim plinskim ležištima

Da bi geološka formacija bila pogodna za utiskivanje zraka, ona mora biti potpuno izolirana u smjeru uzgona. To mogu biti iscrpljena plinska ležišta, kaverne u solnim domama ili duboke kaverne u tvrdim, konsolidiranim stijenama. Također komprimirani zrak se može uskladištiti u površinskim spremnicima, cijevima te u napuštenim rudnicima.

Plinska ležišta u kojima je iscrpljen sav pridobivi prirodni plin su najčešći oblik podzemnog skladišta plina. Korištenje iscrpljenog rezervoara za skladištenje zraka ima mnoge prednosti. Glavna prednost je korištenje već postojećih bušotina i dijela njihove površinske opreme te činjenica da unaprijed znamo da struktura može biti ispunjena komprimiranim plinom. Uz to, za već eksploatirana polja često su dostupni detaljni podatci o geološkoj građi, temperaturi, poroznosti i povijest ležišnog tlaka.

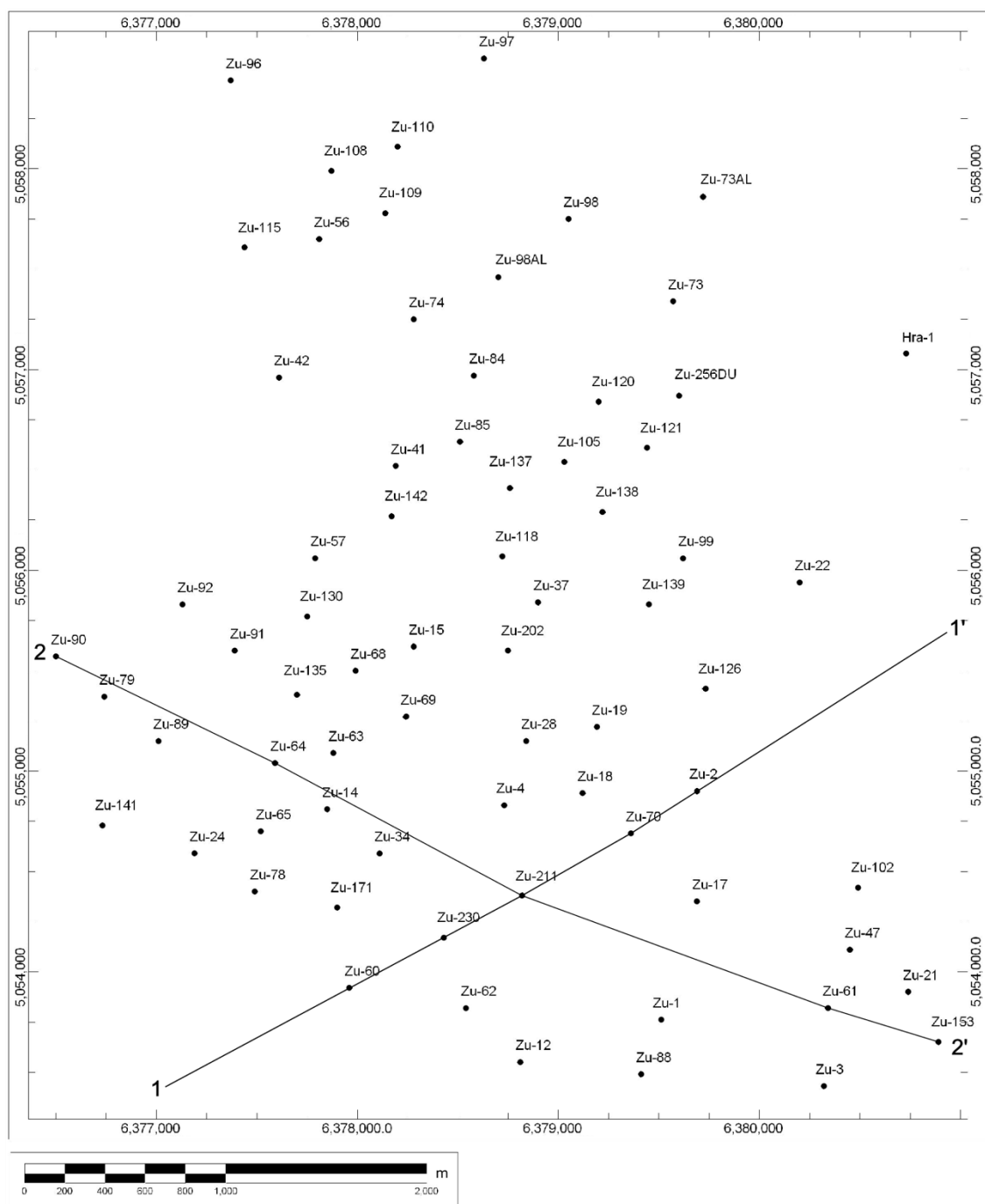
Najbitnija svojstva iscrpljenog ležišta prilikom određivanja kapaciteta uskladištene energije su dubina i volumen ležišta te njegova poroznost i propusnost. Ona uvelike utječu na količinu komprimiranog zraka koji se može uskladištiti, procjeđivanje zraka iz ležišta, ekspanziju pora te brzinu utiskivanja i povlačenja radnog plina. Također je bitna dubina na kojoj se ležište nalazi te ona ne smije biti premala kako ne bi došlo do frakturiranja tijekom kompresije.



**Slika 4-1.** Skladištenje zraka u iscrpljenom plinskom rezervoaru (modificirano prema Wan et al. 2024.)

## 5. PRIMJENJENE METODE I REZULTATI

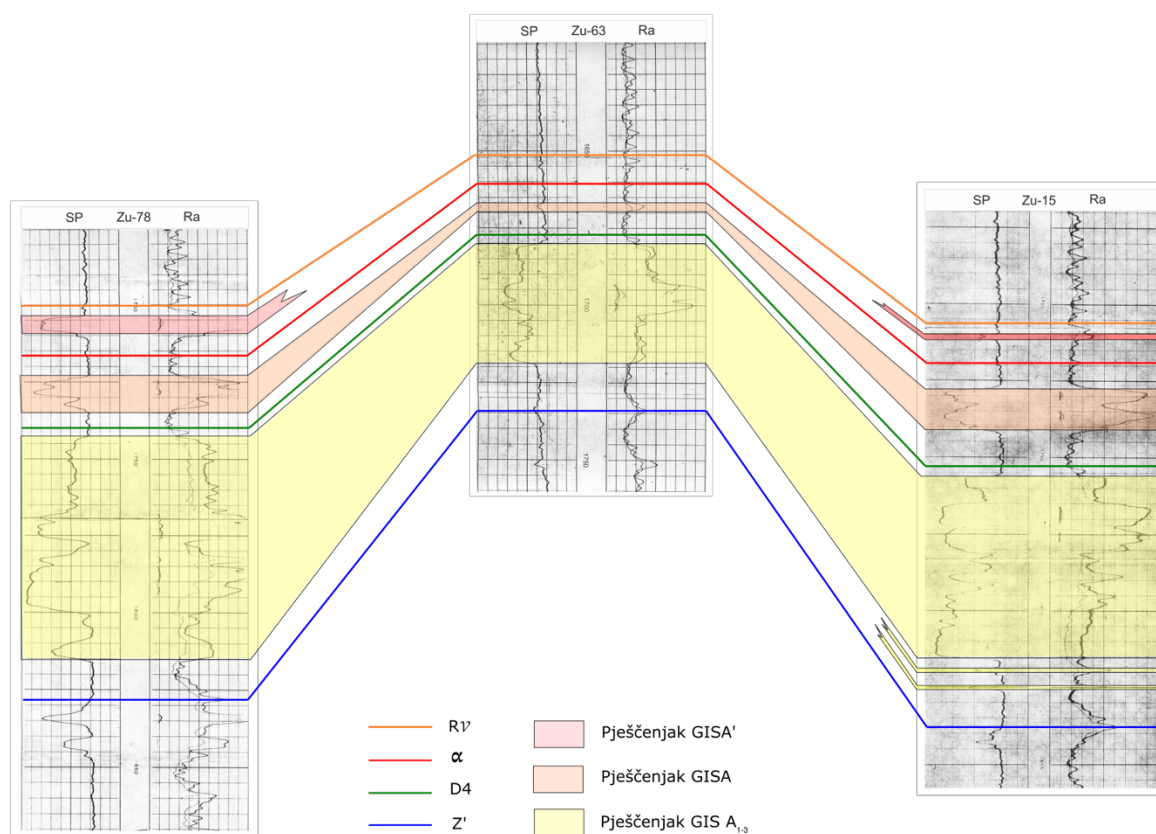
Građa relevantnog sloja pješčenjaka određena je temelju podataka dobivenih karotažom spontanog potencijala i otpornosti iz 70 dubokih istraživačkih bušotina (Slika 5-1).



Slika 5-1. Karta lokacija odabranih bušotina naftno-plinskog polja Žutica

Na karotažnim dijagramima jasno se mogu izdvojiti slojevi različite propusnosti te EK-markeri. EK- markeri su definirani kao prepoznatljivi motivi na krivuljama specifične otpornosti koji predstavljaju promjenu granulometrijskog sastava čestica i načina njihova pakiranja (Velić, 2007). Korelacijom EK markera i granica odgovarajućih slojeva (Slika 5-2.) jasno se vide tri genetska intervala slojeva gornjopontskih pješčenjaka: A', A i A<sub>1-3</sub>.

Genetski interval slojeva (GIS) je skup naslaga nastalih u jednom taložnom ciklusu, koje su međusobno genetski povezane (Bush i Link, 1984). Gornja granica GIS-a je vremensko-litološki marker, dok donja može biti marker, diskordancija ili facijesna promjena. GIS uključuje sve sedimente taložene tijekom jednog ciklusa spuštanja ili izdizanja površine u odnosu na razinu mora (Bush i Link, 1984). Genetska sekvencija slojeva (GSS) se sastoji od dva ili više susjednih GIS-ova i predstavlja rezultat kontinuirane sedimentacije.

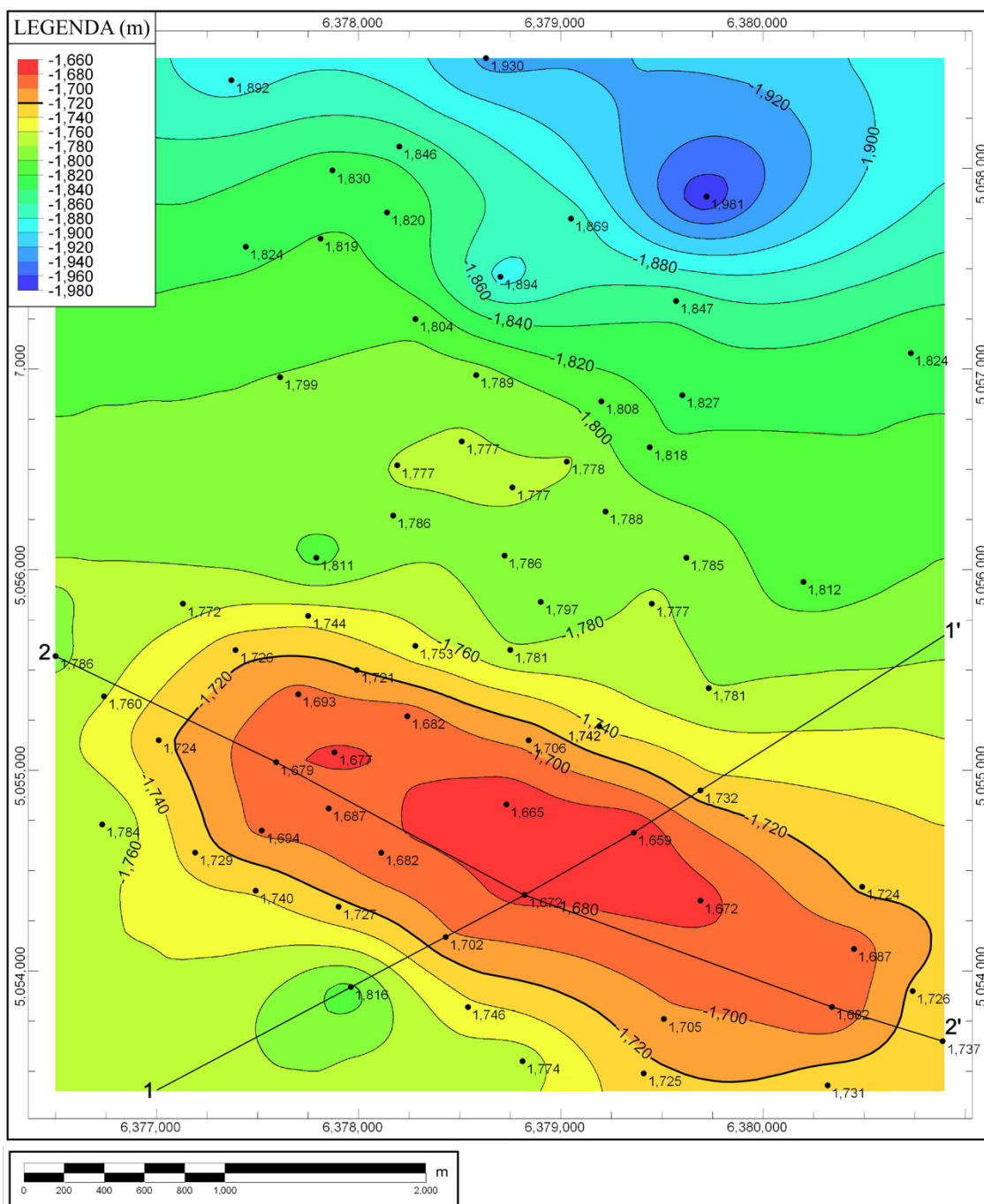


**Slika 5-2.** Korelacijska shema genetskih intervala slojeva GIS A', GIS A i GIS A<sub>1-3</sub>

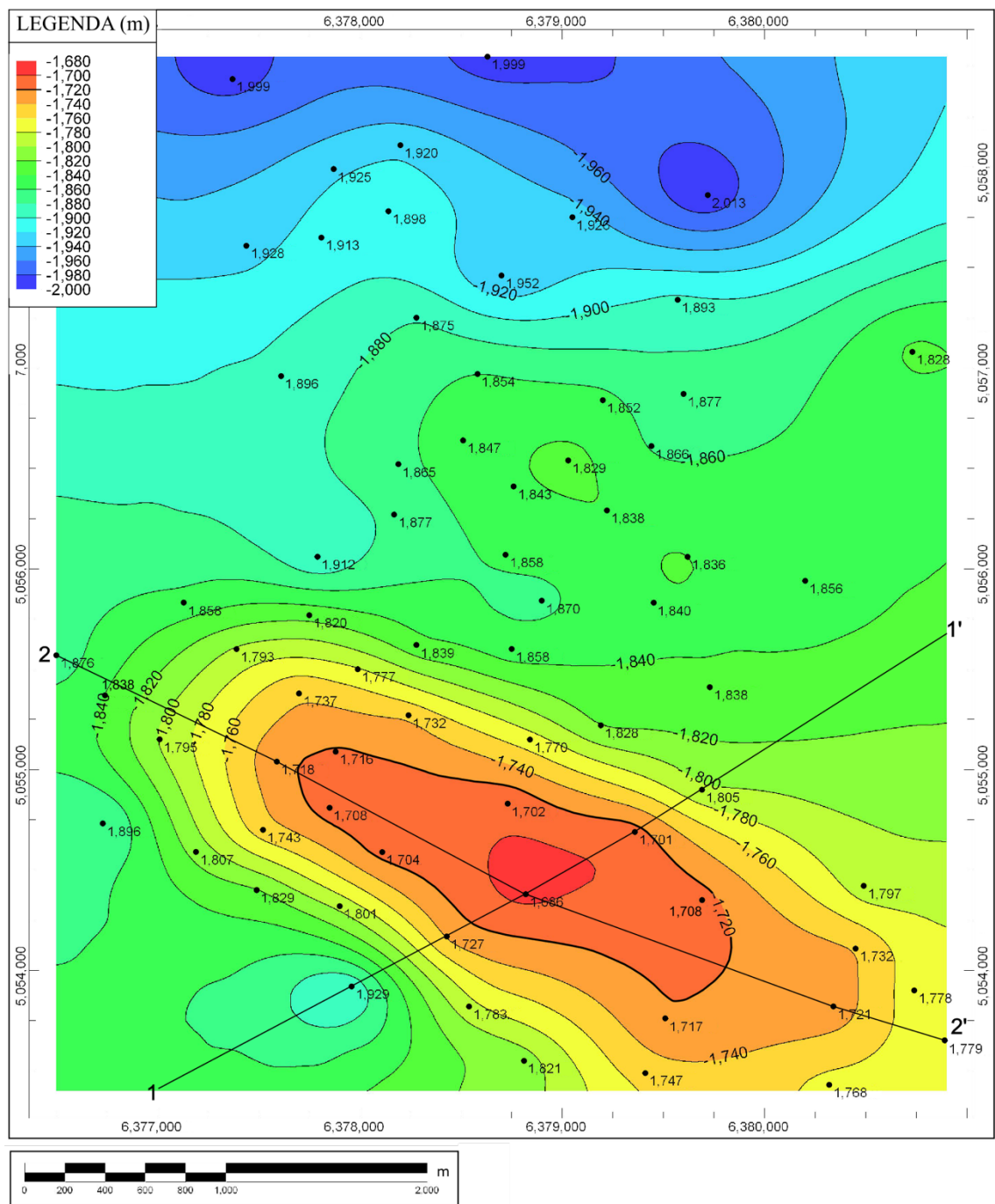
Interpretacijom slike 5-2. može se vidjeti da su plići slojevi, GIS A' i GIS A, tanki te mjestimično isklinjavaju dok je sloj GIS A<sub>1-3</sub> postojan kroz cijelo područje i puno deblji. Iz tog razloga, za procjenu uskladištenja energije, odabran je GIS A<sub>1-3</sub>. Za svaku bušotinu određene su relativne dubine krovinske i podinske plohe pješčenjaka GIS A<sub>1-3</sub> na temelju čega su konstruirane karte relativnih dubina. Kako bi se pojednostavio postupak, dubina EK markera D4 definirana je kao krovinska granica sloja pješčenjaka. Budući da je cijeli teren naftno plinskog polja Žutica poprilično zaravnjen, sa prosječnom nadmorskom visinom od 100 m, on je uzet kao referentna ploha za karte relativne dubine.

Za izradu karata, profila, 3D geoloških modela te i za izračun volumena sloja korišten je računalni program RockWorks tvrtke RockWare. Za konstruiranje karata dubine krovinske i podinske plohe pješčenjaka GIS A<sub>1-3</sub> odabrana je metoda za interpolaciju pod nazivom kriging. Kriging je metoda koja se koristi za interpolaciju prostornih podataka odnosno procjenu nepoznatih vrijednosti u prostoru; u ovom slučaju za procjenu vrijednosti elevacije plohe na prostoru između utvrđenih točaka. On se smatra jednim od najnaprednijih i najsloženijih postupaka interpolacije. Prvi korak u ovome procesu je postavljanje variograma, alata koji definira prostornu varijabilnost podataka. On se koristi za utvrđivanje zavisnosti skupa točaka koje se žele zajednički interpolirati (Horvatinec, 2021). Sljedeći korak je interpolacija. Kod kriginga se vrijednosti poznatih točaka ponderiraju odnosno množe se s odgovarajućim težinskim faktorom. Težinski faktor je specifičan za svaku točku ovisi o njenom prostornom rasporedu i udaljenosti od susjednih točaka čime se postiže naglašavanje podataka u pojedinim smjerovima (Rockware, 2020). Kako bi se pretpostavile nepoznate vrijednosti u prostoru on je podijeljen u mrežicu. Gustoća te mrežice ovisi o odabranom broju ćelija i značajno utječe na konačni rezultat.

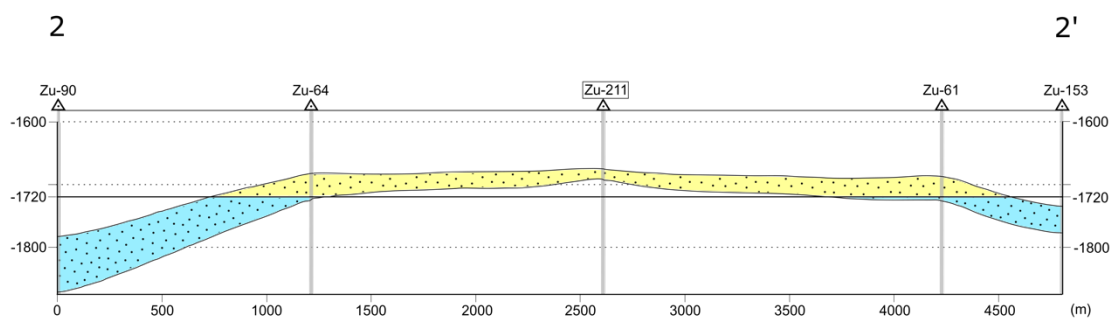
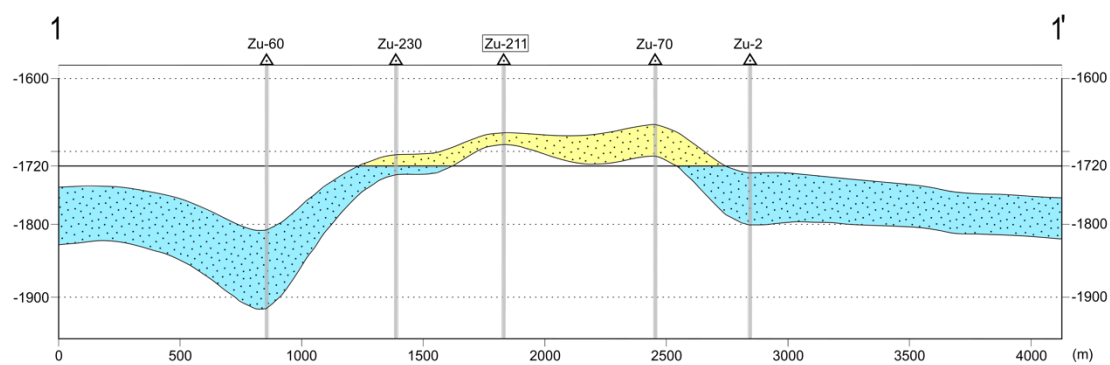
Karte su konstruirane sa dimenzijom mrežice odabranom prema subjektivnoj procjeni od 150 ćelija u X smjeru i 175 ćelija u Y smjeru. Također, odabrana je opcija da se variogram postavlja automatski odnosno program sam odabire model variograma koji se koristi u izračunima.



Slika 5-3. Karta relativne dubine krovinske plohe pješčenjaka A<sub>1-3</sub>



**Slika 5-4.** Karta relativne dubine podinske plohe pješćanjaka A<sub>1-3</sub>



| LEGENDA                             |                          |
|-------------------------------------|--------------------------|
|                                     | Pješčanjak               |
|                                     | Pješčanjak zasičen vodom |
|                                     | Bušotina                 |
| M <sub>H</sub> :M <sub>V</sub> =1:3 |                          |

**Slika 5-5.** Profili ležišta A<sub>1-3</sub>: a) poprečni profil 1-1' i b) uzdužni profil 2-2'

### **5.1. Karte dubine krovinske i podinske plohe podzemnog skladišta**

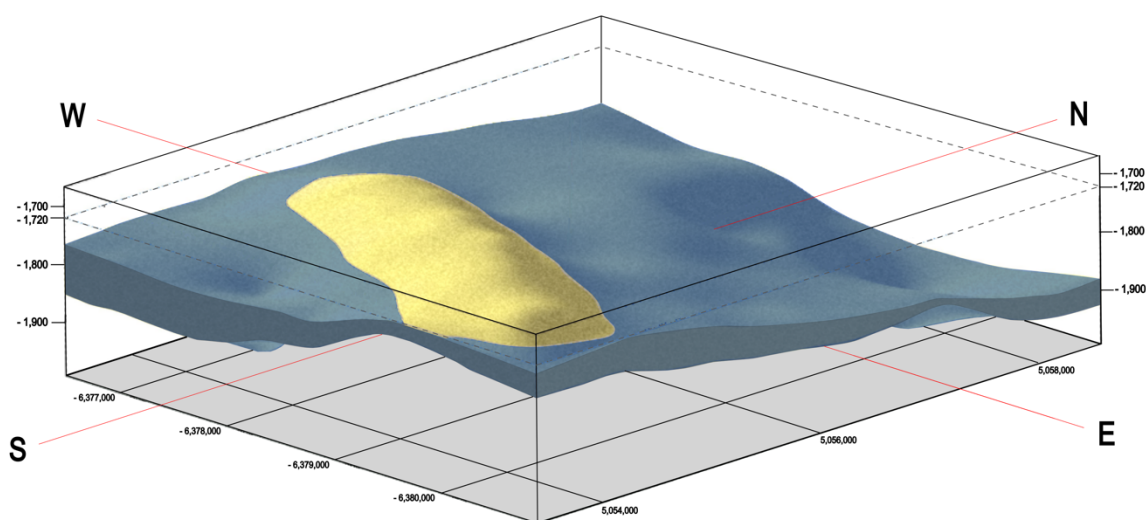
Na južnom djelu karte krovinske plohe pješčenjaka A<sub>1-3</sub> (Slika 5-3.) vidljiva je velika antiklinala pružanja SZ–JI čija su dva vrha ocrтана izobatama od 1660 m. Podebljana izobata na 1720 m predstavlja pretpostavljeni najniži kontakt utisnutog komprimiranog zraka sa slojnom (podinskom) vodom. Dimenzije strukturnog skladišta procijenjene su na približno 4 kilometra duljine (pravcem SZ–JI) i 1,5 kilometara širine (pravcem JZ–SI). Na karti podinske plohe (Slika 5-4.) također je izražena velika južna antiklinala s vrhom ocrtanom izobatom od 1680 m te se vidi da se dio podinske plohe antiklinale nalazi iznad pretpostavljenog najnižeg kontakta utisnutog komprimiranog zraka sa slojnom vodom.

### **5.2. Profili kroz potencijalno podzemno skladište**

Na antiklinalu su postavljena dva profila koja prolaze kroz 5 bušotina i sijeku se u bušotini Zu-211 (Slika 5-5.). Poprečni profil 1-1' se pruža pravcem SZ–JI dok se uzdužni profil 2-2' pruža pravcem JZ–SI. Na konstruiranim profilima može se jasno vidjeti da je u antiklinali sloj pješčenjaka GIS A<sub>1-3</sub> definiran krovinskom i podinskom plohom te „kontakтом komprimirani plin-slojna voda“ na dubini od 1720 metara. U ovakvom slučaju kolektorska stijena je izolirana u smjeru uzgona, kontakтом s izolatorskim stijenama u krovini ležišta, a u podini kontakтом s podinskom vodom ležišta, čime se formira prirodno skladište povoljno za utiskivanje komprimiranog zraka. Valja napomenuti da je u predstavljenom modelu ležišta, radi pojednostavljenja, uzeta pretpostavka da slojna voda neće ispuniti pore ležišta iz kojih je iscrpljen prirodni plin.

### 5.3. Izračun volumena kolektorskih stijena

Za izračun potencijalne količine uskladištene energije potrebno je odrediti volumen efektivnog pornog prostora u stijeni, iskoristivog za utiskivanje zraka. Zato je prvi korak izračun ukupnog volumena skladišta tj. volumen sloja pješčenjaka omeđenog s kontaktom s „podinskom vodom“ postavljenim na dubini od -1720 metara.



Slika 5-6. 3D geološki model sloja A<sub>1-3</sub>

Za ovaj izračun korišten je alat Grid-Based Volume Calculator računalnog programa RockWorks. Ovaj alat služi za izračunavanje volumena geoloških modela na principu podjele modelnog prostora u mrežu čvorova (Rockware, 2020). Svaki čvor predstavlja točku u modelu s pridruženim prostornim vrijednostima. Izračuni volumena ovise o dimenzijama modela, broju čvorova i razmacima između njih. Dimenzije ukupnog polja su konstantne a razmaci između čvorova se mogu podešavati. Smanjivanjem razmaka, povećava se gustoća mrežice što dovodi do veće preciznosti u izračunu volumena.

U programu su postavljeni razmaci točaka od 5m u X i Y smjeru te 1m u Z smjeru čime je uvjetovano 879 točaka u X smjeru, 1025 točaka u Y smjeru i 1721 točku u Z smjeru. Ovakvim modelom izračunat je volumen od 90 240 904 m<sup>3</sup>. Na slici 5-7. priložen je originalan izvještaj generiran pomoću programa RockWorks. U njemu je volumen relevantne antiklinale izražen u intervalima elevacije od 5 metara.

# Stratigraphy Grids Volumetrics Report

| MaxZ    | MinZ   | Sandstone     | Total      | Units        |
|---------|--------|---------------|------------|--------------|
| -----   | -----  | -----         | -----      | -----        |
| -1,660  | -1,665 | 0             | 0          | Cubic Meters |
| -1,665  | -1,670 | 25,758        | 25,758     | Cubic Meters |
| -1,670  | -1,675 | 949,204       | 949,204    | Cubic Meters |
| -1,675  | -1,680 | 2,292,139     | 2,292,139  | Cubic Meters |
| -1,680  | -1,685 | 4,389,627     | 4,389,627  | Cubic Meters |
| -1,685  | -1,690 | 6,763,234     | 6,763,234  | Cubic Meters |
| -1,690  | -1,695 | 9,340,215     | 9,340,215  | Cubic Meters |
| -1,695  | -1,700 | 11,302,771    | 11,302,771 | Cubic Meters |
| -1,700  | -1,705 | 12,600,535    | 12,600,535 | Cubic Meters |
| -1,705  | -1,710 | 13,601,340    | 13,601,340 | Cubic Meters |
| -1,710  | -1,715 | 14,217,648    | 14,217,648 | Cubic Meters |
| -1,715  | -1,720 | 14,758,434    | 14,758,434 | Cubic Meters |
| Totals: |        | 90,240,904.00 |            | Cubic Meters |

**Slika 5-7.** Volumetrijsko izvješće programa RockWorks

#### 5.4. Izračun teoretskog kapaciteta uskladištenja energije

Kako bi se olakšao postupak računanja moguće uskladištene energije u obliku komprimiranog zraka, korišten je programski jezik Python. Python je jedan od najčešće korištenih programskih jezika u znanstvenim i inženjerskim disciplinama, te je vrlo koristan radi velikog broja biblioteka namijenjenih znanstvenim izračunima. U ovome slučaju korištena je biblioteka CoolProp, za jednostavno određivanje gustoće metana pri tlaku napuštanja i tlaku kompresije.

Prvi korak je izračun volumena pora  $V_p$  množenjem ukupnog volumena rezervoara  $V_t$  i prosječne poroznosti  $\phi$ ;

$$V_p = V_t \cdot \phi$$

Prosječna poroznost od 15% procijenjena je na temelju rezultata Kolenković (2012).

Međutim, plinsko ležište nikada nije potpuno iscrpljeno te u njemu uvijek zaostaje značajna količina plina pod određenim tlakom. Taj plin zauzima odgovarajući volumen u porama i smanjuje prostor dostupan za skladištenje komprimiranog zraka. Iz tog razloga sljedeći korak je računanje mase preostalog plina prema formuli;

$$m_g = V_p \cdot \rho_{ga}$$

gdje je gustoća plina (metana)  $\rho_{ga}$  pri tlaku napuštanja od 50 bara, izračunata koristeći funkciju PropsSI iz biblioteke CoolProp.

Kompresijom zraka u ležište dolazi do povećanja tlaka u porama što uzrokuje smanjenje volumena zaostalog plina i povećanje njegove gustoće čime se opet mijenja prostor dostupan za skladištenje komprimiranog zraka. Volumen koji preostali plin zauzima pri uvjetima kompresije označen je sa  $V_{gCAES}$  izražen je formulom;

$$V_{gCAES} = \frac{m_g}{\rho_{gCAES}}$$

Gustoća metana nakon tlačenja na završni uvjet tlaka  $\rho_{gCAES}$ , korištena u formuli, također je izračunata pomoću biblioteke CoolProp, funkcijom PropsSI.

Budući da pore nisu krute te povećanjem tlaka dolazi do njihove ekspanzije, potrebno je izračunati ukupni volumen pora nakon komprimiranja zraka,  $V_{pCAES}$  ;

$$V_{pCAES} = V_p + V_p \cdot c_p \cdot (p_{CAES} \cdot p_a)$$

$c_p$  je faktor stlačivosti, a  $p_{CAES}$  predstavlja konačni tlak u ležištu postignut kompresijom zraka. Odabran je konačni tlak od 200 bara, prema procjeni početnog tlaka ležišta prije proizvodnje ugljikovodika, na temelju dubina i pravila da su ležišta ugljikovodika uvijek na tlaku iznad hidrostatskog. Konačni tlak za CAES uzima u obzir da konačni tlak mora biti manji od 90% tlaka frakturiranja  $p_f$ . Prema Vulin i dr. (2018) za definiranje tlaka frakturiranja preporučeno je oko 90% petrostatskog tlaka, te ukoliko ne postoji procjena petrostatskog tlaka koristi se formula koja uključuje gradijent tlaka frakturiranja  $f_g = 0.2$  bar/m i prosječnu dubina ležišta,  $h$ ;

$$p_f = f_g \cdot h$$

Efektivni volumen  $V_e$  dobiven je oduzimanjem volumena preostalog plina pri uvjetima kompresije  $V_{gCAES}$  od volumena pora pri istim uvjetima kompresije  $V_{pCAES}$ ;

$$V_e = V_{pCAES} - V_{gCAES}$$

Ovaj volumen predstavlja stvarni prostor raspoloživ za skladištenje komprimiranog zraka uzimajući u obzir sve ključne faktore.

Za izračun ukupne uskladištene energije u obliku komprimiranog zraka  $W$  korištena je sljedeća formula;

$$W = p_{CAES} \cdot V_e \cdot \ln\left(\frac{101325}{p_{CAES}}\right) + (p_{CAES} - 101325) \cdot V_e$$

Ova formula predstavlja energiju uskladištenu radi izotermne promjene u tlaku kada se zrak komprimira u ležište.

U nastavku je priložena tablica (Tablica 5-1.) koja sadrži ulazni kod te izlazne rezultate (D. Vulin, osobna komunikacija). Kod je napisan u programskom jeziku Python i u njemu su implementirane sve prethodno navedene formule te faktori korišteni za izračun.

```
t = 85 # °C | Temperatura ležišta
Vt = 90240204 # m3 | Ukupni volumen formacije
c_p = 1e-5 # 1/bar | Stlačivost pora
phi = 0.15 # dij. jed. | Srednja poroznost
Vp = Vt*phi # m3 | Ukupni volumen pora
p_a = 50 # bar | Tlak napuštanja proizvodnje, bar
p_CAES = 200 # bar | Tlak kompresije za CAES
rho_g_a = CP.PropsSI('D', 'P', p_a*1e5, 'T', t+273.15, 'CH4') # kg/m3 | Gustoća plina na kraju proizvodnje
m_g = Vp*rho_g_a # kg | Masa plina na kraju proizvodnje
rho_g_CAES = CP.PropsSI('D', 'P', p_CAES*1e5, 'T', t+273.15, 'CH4') # kg/m3 | Gustoća plina na uvjetima za CAES
Vg_CAES = m_g/rho_g_CAES # m3 | Volumen koji zauzima prirodni plin
Vp_CAES = Vp + Vp*c_p*(p_CAES-p_a) # m3 | Volumen pora nakon stlačenja na završni uvjet tlaka (CAES)
V_e = Vp_CAES - Vg_CAES # m3 | Volumen koji zauzima komprimirani zrak
W = p_CAES*1e5*V_e*np.log(101325/(p_CAES*1e5)) + (p_CAES*1e5-101325)*V_e # J | Energija uskladištena u iscrpljenom ležistu
print (f'Uskladišteno je {-W/1e12:.3f} TJ energije')
print (f'Volumen pora prije stlačivanja: Vp = {Vp:.1f} m3')
print (f'Volumen pora nakon stlačivanja: Vp_CAES = {Vp_CAES:.1f} m3')
print (f'Gustoća prirodnog plina: {rho_g_CAES:.1f} kg/m3')
print (f'Efektivni volumen pora raspoloživ za CAES: Ve = {V_e:.1f} m3')
```

|                                           |                             |
|-------------------------------------------|-----------------------------|
| Uskladišteno je (W)                       | 881,522 TJ                  |
| Volumen pora prije stlačivanja (Vp)       | 13 536 030,6 m <sup>3</sup> |
| Volumen pora nakon stlačivanja (Vp_CAES)  | 13 556 334,6 m <sup>3</sup> |
| Gustoća prirodnog plina nakon stlačivanja | 115,3 kg/m <sup>3</sup>     |
| Efektivni volumen pora (V <sub>e</sub> )  | 10 273 625,2 m <sup>3</sup> |

**Tablica 5-1.** Tablica ulaznog koda i rezultata

## 6. DISKUSIJA I ZAKLJUČAK

U ovome radu ispitane su mogućnosti uskladištenja energije u obliku komprimiranog zraka (CAES) u pješčenjacima iscrpljenog naftno plinskog polja Žutica. Opisanim metodama ukupni volumen pornog prostora za skladištenje procijenjen je na 10 273 625,2 m<sup>3</sup> s kapacitetom pohrane do 881,522 TJ energije. Ova količina uskladištene energije predstavlja značajan kapacitet koji bi mogao pridonijeti stabilizaciji elektroenergetskih sustava na lokalnoj i regionalnoj razini.

Količina električne energije koja se može proizvesti iz uskladištenog zraka ovisi o efikasnosti korištenog CAES sustava. S obzirom na veliki raspon primijenjenih tehnologija, učinkovitost sustava varira, a tehnologije se stalno unaprjeđuju s ciljem povećanja energetske učinkovitosti i smanjenja gubitaka.

Važno je napomenuti da dobiveni rezultati predstavljaju samo procjenu ali jesu relativno precizni. Ipak, ovakav pristup može poslužiti kao vrijedan alat za brzu procjenu teoretskog potencijala skladištenja energije u iscrpljenim plinskim ležištima.

Proizvodnja i potrošnja energije podložne su dnevnim i sezonskim promjenama pri čemu su obnovljivi izvori energije; sunce, vjetar i voda u potpunosti ovisni o promjenama godišnjih doba te dnevnim promjenama.

Iako danas ne postoji aktivan CAES sustav u kojemu je zrak pohranjen unutar iscrpljenih plinskih ležišta, ovakva skladišta se uspješno koriste u okviru skladištenja CO<sub>2</sub> i ostalih plinova. Implementacijom CAES sustava korištenjem postojeće infrastrukture iscrpljenih plinskih ležišta mogla bi se postići učinkovita integracija obnovljivih izvora energije i stabilizacija elektroenergetskih sustava. Potrebna su daljnja istraživanja i inovacije u okviru smanjenja gubitaka tijekom ciklusa kompresije i ekspanzije zraka kako bi, uz daljina poboljšanja u tehnologiji, CAES postao ključan dio održivog energetskog sustava budućnosti.

## 7. POPIS LITERATURE

### 7.1. Objavljeni radovi

BARNES, F.S., LEVINE, J.G. (2011): *Large Energy Storage Systems Handbook*. str. 111 – 135.

BIKIĆ, I. (2020): *Analiza različitih plinova za primjenu tehnologije podzemnih skladišta energije*. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, str 1 – 11.

BUSH, D., LINK, D. (1985): *Exploration methods for Sandstone Reservoirs*. OGCI Publications.

HORVATINEC, D. (2009): *Primjena geostatističkih simulacija u procjeni poroznosti gornjomiocenskih ležišta ugljikovodika polja okoli*. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, str. 13 – 20.

HEITMANN, M. (2020): *Modelling and Evaluation of Compressed Air Energy Storage System*. Diplomski rad. University of South-Eastern Norway, str 8 – 11.

KOLENKOVIĆ, I. (2012): *Mogućnosti za geološko skladištenje ugljičnoga dioksida u gornjomiocenskim pješčenjacima zapadnoga dijela Savske depresije*. Doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, str 130.

LAYTON, L. (2020) *Compressed Air Energy Storage*. str 1 – 39.

RABI, A., RADULOVIC, J., BUICK, J. *Comprehensive Review of Compressed Air Energy Storage (CAES) Technologies*. University of Portsmouth, School of Mechanical and Design Engineering, str 1 – 20.

ROCKWARE, INC. (2020): *RockWorks 2021 Training Manual* , Golden, Colorado, USA.

SAFTIĆ, B. (1993): *Taložni sustav pješćanih rezervoara genetske sekvencije slojeva pješčenjaka Poljana u neogenskim naslagama polja Žutica*. Magistarski rad. RGNF i PMF Sveučilišta u Zagrebu, str. 1 – 11.

VALIDŽIĆ, M. (2021): *Procjena teoretskog kapaciteta uskladištenja CO<sub>2</sub> u iscrpljenim plinskim ležištima polja Žutica*. Završni rad. Sveučilište u Zagrebu. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, str. 1 – 8.

VELIĆ, J. (2007): *Geologija ležišta nafte i plina*. Sveučilišni udžbenik. Sveučilište u Zagrebu. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, str. 342.

VULIN, D., SAFTIĆ, B., & MACENIĆ, M. (2018). *Estimate of dynamic change of fluid saturation during CO<sub>2</sub> injection—Case study of a regional aquifer in Croatia*. 6(1), SB51-SB64.

WAN, J., SUN, Y., HE, Y. *et al.* (2024) *Development and technology status of energy storage in depleted gas reservoirs*.

## **7.2. Neobjavljeni radovi**

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU: 2023. *Studija o utjecaju na okoliš naftno-rudarskih objekata i eksploatacije ugljikovodika na eksploatacijskim poljima ugljikovodika „žutica“ i „vežišće“*. Netehnički sažetak, str. 1 – 5.