

Utjecaj prostornog rasporeda poroznosti na procjenu ukupnog kapaciteta skladištenja ugljičnog dioksida u dubokom slanom vodonosniku Poljana

Vuković, Tina

Master's thesis / Diplomski rad

2015

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:169:880724>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij geologije

UTJECAJ PROSTORNOG RASPOREDA POROZNOSTI NA PROCJENU UKUPNOG
KAPACITETA SKLADIŠTENJA UGLJIČNOG DIOKSIDA U DUBOKOM SLANOM
VODONOSNIKU POLJANA

Diplomski rad

Tina Vuković

G -153

Zagreb, 2015

UTJECAJ PROSTORNOG RASPOREDA POROZNOSTI NA PROCJENU UKUPNOG
KAPACITETA SKLADIŠTENJA UGLJIČNOG DIOKSIDA U DUBOKOM SLANOM
VODONOSNIKU POLJANA

TINA VUKOVIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Geološko skladištenje ugljičnog dioksida je jedna od mjera za sniženje njegove koncentracije u atmosferi. Duboki slani vodonosnici su najpovoljnija mjesta za skladištenje CO₂, zbog velike površine prostiranja, položaja koji je nerijetko u blizini velikih industrijskih izvora CO₂ i mehanizama uzamčivanja koji se javljaju tijekom različitog vremenskog perioda. Međutim, brojne su nesigurnosti u procjenama kapaciteta skladištenja ovih velikih stijenskih tijela. Nesigurnosti su uglavnom vezane uz nedostatak podataka. U doktorskoj disertaciji KOLENKOVIĆ (2012) kao potencijalni skladišni objekti, u zapadnom dijelu Savske depresije su izdvojeni Poljana pješčenjaci koji su također karakterizirani malim brojem podataka. U tom smislu jedan od kritičnih parametara prilikom procjene je poroznost. U ovom radu se htjela ispitati mogućnost procjene poroznosti izračunom težinske, odnosno ponderirane srednje vrijednosti. Kao težinski parametar, uz poroznost je odabrana efektivna debljina kako bi se bušotinama s većom efektivnom debljinom dao veći utjecaj na procjenu od onih s manjom. Time se htjela izbjeći konstrukcija karte poroznosti na temelju samo 20 bušotina. Uz poroznost, u radu se ispitala i mogućnost podjele područja istraživanja. Dosadašnji radovi su područje istraživanja diskretizirali mrežom blokova iz čijih su središta potom očitavane vrijednosti pojedinih parametara s pripadajućih karata. Takav postupak je vrlo složen i zahtijeva mnogo vremena, a s obzirom na premali broj podataka, dobiveni rezultati ovakvog istraživanja su i tako samo orijentacijskog karaktera i služe isključivo za usmjeravanje istraživanja, a nemaju izravnu primjenu pa bi bilo vrlo korisno pronaći jednostavniji način procjene, uz uvjet da dobiveni rezultati ipak ne odstupaju previše. Prema tome osmišljeno je pet novih načina izračuna kapaciteta skladištenja od kojih je svaki objašnjen i prikazan pripadajućom kartom efektivne debljine i tabličnim izračunom. Radi lakše usporedbe rezultata konstruiran je i dijagram te niz tabličnih prikaza raspodjele podataka. S obzirom na konačne rezultate kapaciteta skladištenja, ovakvo pojednostavljenje izračuna se može smatrati prihvatljivim i naći primjenu u prvoj fazi istraživanja, odnosno u utvrđivanja potencijala područja dubokog slanog vodonosnika za skladištenje CO₂.

Ključne riječi: ugljični dioksid, geološko skladištenje CO₂, Savska depresija, pješčenjaci Poljana, poroznost, kapacitet skladištenja CO₂.

Diplomski rad sadrži: 45 stranica, 13 slika, 7 tablice, 10 priloga

Jezik izvornika: hrvatski

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

Voditelj: Izv. prof. dr. sc. Bruno Saftić

Ocjenivači: Izv. prof. dr. sc. Bruno Saftić

Izv. prof. dr. sc. Rajna Rajić

Doc. dr. sc. Jelena Parlov

Datum obrane: 30.9.2015.

INFLUENCE OF THE POROSITY DISTRIBUTION MODEL ON NUMERICAL ESTIMATES OF
THE TOTAL CO₂ STORAGE CAPACITY IN THE POLJANA DEEP SALINE AQUIFER

TINA VUKOVIĆ

Thesis completed in: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Geology and Geological Engineering,
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Abstract

Geological storage of CO₂ is one of the measurements for reducing its concentration in the atmosphere. Due to their big surface, emplacement near great industrial sources of CO₂ and trapping mechanisms which occur during distinct periods of time the greatest storage potential is estimated in deep saline aquifers. However, there are many uncertainties in the estimates of the storage capacity of these large bodies of rock. Uncertainties are mainly related to the lack of data. In the PhD thesis made by Iva Kolenković, Poljana sandstones are isolated as a potential storage facilities in the western part of Sava Depression. These sandstones are also characterized by a small number of data. One of the critical parameters during the estimation is porosity. Object of this paper was to explore the possibility of calculating the weighted averages of porosity. With porosity, effective thickness was selected as a weight parameter, so that wells with greater effective thickness have a bigger impact on the assessment of those with less. The main intention of this procedure was to avoid construction of the porosity map based on such small amount of data (20 wells). Also, this paper examined the possibility of division of the area of research. The previous papers discretized the aquifer area with grid of blocks from whose centers were determined values of the parameters from the corresponding maps. This procedure is complicated and requires a lot of time. Having in mind that due to lack of data the results of this level of research can be used only for directing the future researches and can not be directly applied, it would be very useful to find a simpler way of assessment provided that the results still do not differ too much. Therefore are designed five new methods of calculating the storage capacity. Every one of them is explained and illustrated with related map of effective thickness and tabular calculation. Also, an diagram and a series of tabular presentations of the distribution of data were designed to facilitate comparisons of results,. According to the final results of the storage capacity, presented simplification of calculation can be considered acceptable and find application in the first stage of research in determining the potential of deep saline aquifers for CO₂ storage.

Keywords: carbon dioxide, CO₂ geological storage, Sava depression, Poljana sandstones, porosity, CO₂ storage capacity,

Thesis contains: 45 pages, 13 figures, 7 tables and 10 enclosures

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Associate Professor Bruno Saftić, PhD

Technical support and assistance: Iva Kolenković, PhD

Reviewers: PhD Bruno Saftić, Associate Professor

PhD Rajna Rajić, Associate Professor

PhD Jelena Parlov, Assistant Professor

Date of defence: September 30, 2015

SADRŽAJ:

1. Uvod.....	1
2. Koncept i metode geološkog skladištenja CO₂	5
2.1. Skladištenje CO ₂ u ležišta nafte ili plina	7
2.2. Skladištenje CO ₂ u slojeve ugljena	8
2.3. Skladištenje CO ₂ u dubokim slanim vodonosnicima	9
2.4. Mehanizmi uzamčivanja	10
2.5. Sigurnost.....	11
3. Geološke značajke Savske depresije	13
3.1. Stratigrafski odnosi	14
3.1.1 Taložni megaciklusi	16
3.2. Strukturna obilježja	18
4. Metode regionalne procjene kapaciteta skladištenja CO₂ u dubokim slanim vodonosnicima	20
4.1. Kapacitet skladišta.....	20
4.2. Metoda procjene kapaciteta skladištenja CO ₂ u regionalnim dubokim slanim vodonosnicima prema US Department of Energy (US DOE).....	22
4.3. Procjena kapaciteta skladištenja u regionalnim dubokim slanim vodonosnicima u Republici Hrvatskoj.....	23
4.4. Utvrđivanje područja istraživanja i granica regionalnog vodonosnika	24
4.5. Parametri za procjenu kapaciteta skladištenja i diskretizacija prostora dubokog slanog vodonosnika Poljana	25
4.6. Određivanje efektivne debljine pješčenjaka Poljana, gustoće CO ₂ i koeficijenta učinkovitosti skladištenja	25
4.7. Određivanje poroznosti pješčenjaka Poljana.....	27
4.7.1. Određivanje poroznosti i kapaciteta skladištenja pješčenjaka Poljana pomoću aritmetičke sredine	28
4.7.2. Određivanje poroznosti pješčenjaka Poljana pomoću težinskih prosjeka.....	28

4.7.2.1 Određivanje kapaciteta skladištenja pješčenjaka Poljana podjelom područja na 4 razreda jednake širine ($e=50$ m)	29
4.7.2.2 Određivanje kapaciteta skladištenja pješčenjaka Poljana podjelom područja na 5 razreda jednake širine ($e=40$ m)	30
4.7.2.3 Određivanje kapaciteta skladištenja pješčenjaka Poljana podjelom područja na 4 razreda prema vrijednosti medijana	30
4.7.2.4 Određivanje kapaciteta skladištenja pješčenjaka Poljana podjelom područja na 5 razreda prema vrijednosti medijana	31
5. Rezultati	32
5.1 Karta efektivne debljine, tablica poroznosti pješčenjaka Poljana i izračun kapaciteta skladištenja pomoću aritmetičke sredine.....	32
5.2 Karta efektivne debljine, tablica poroznosti pješčenjaka Poljana i izračun kapaciteta skladištenja podjelom područja na 4 razreda jednake širine ($e=50$ m)	34
5.3 Karta efektivne debljine, tablica poroznosti pješčenjaka Poljana i izračun kapaciteta skladištenja podjelom područja na 5 razreda jednake širine ($e=40$ m)	35
5.4 Karta efektivne debljine, tablica poroznosti pješčenjaka Poljana i izračun kapaciteta skladištenja podjelom područja na 4 razreda prema vrijednosti medijana.....	36
5.5 Karta efektivne debljine, tablica poroznosti pješčenjaka Poljana i izračun kapaciteta skladištenja podjelom područja na 5 razreda prema vrijednosti medijana.....	37
6. Diskusija.....	38
7. Zaključak	41
8. Literatura.....	43
8.1 Objavljeni radovi.....	43
8.2 Web izvori	45

POPIS SLIKA :

Slika 1.1 - Godišnja stopa rasta koncentracije ugljičnog dioksida u atmosferi posljednjih desetljeća prema mjeranjima na Mauna Loi (NOAA)	2
Slika 1.2 - Projekcije porasta emisije stakleničkih plinova (KOLENKOVIĆ, 2012, prema EKONERG, 2007).....	3
Slika 2.1 - Najveći izvori CO ₂ , duboki slani vodonosnici, iscrpljena naftna i plinska polja i regionalni cjevovodi u Hrvatskoj (SAFTIĆ et al., 2008)	6
Slika 2.2 - Mogućnosti geološkog skladištenja CO ₂ (www.co2geonet.com).....	7
Slika 2.3 - Povećanje sigurnosti skladištenja CO ₂ djelovanjem različitih mehanizama kroz dugi vremenski period (IPCC, 2005)	10
Slika 3.1 - Depresije unutar hrvatskog dijela Panonskog bazena (KRANJEC et al., 1981)	13
Slika 3.2 - Geološki stup naslaga u jugozapadnom dijelu Panonskog bazena.....	15
Slika 3.3 - Recentni strukturni odnosi u jugozapadnom dijelu Panonskog bazena (LUČIĆ et al., 2001.).....	19
Slika 4.1 - Tehno-ekonomska piramida kapaciteta (CSLF, 2007)	21
Slika 4.2 - Regionalni duboki slani vodonosnici u hrvatskom dijelu Panonskog bazena (KOLENKOVIĆ, 2012, modificirano prema SAFTIĆ, et al., 2008).....	23
Slika 4.3 - Dijagram gustoće CO ₂ (VULIN, 2010, korištenjem jednadžbe SPAN & WAGNER, 1996).....	26
Slika 6.1 - Dijagram usporedbe kapaciteta skladištenja.....	39

POPIS TABLICA:

Tablica 4.1 - Ulazni parametri i rezultati procjene kapaciteta skladištenja za duboke slane vodonosnike u hrvatskom dijelu Panonskog bazena (KOLENKOVIĆ, 2012, preuzeto iz EU GEOCAPACITY, 2009)	24
Tablica 5.1 - Bušotinski podatci poroznosti za duboki slani vodonosnik Poljana	33
Tablica 5.2 - Rezultati izračuna pomoću aritmetičke sredine	33
Tablica 5.3 - Rezultati izračuna podjelom područja na 4 razreda jednake širine ($e=50$ m)	34
Tablica 5.4 - Rezultati izračuna podjelom područja na 5 razreda jednake širine ($e=40$ m) ..	35
Tablica 5.5 - Rezultati izračuna podjelom područja na 4 razreda prema vrijednosti medijana	36
Tablica 5.6 - Rezultati izračuna podjelom područja na 5 razreda prema vrijednosti medijana	37

POPIS PRILOGA:

PRILOG 1 - Karta efektivne debljine dubokog slanog vodonosnika Poljana (KOLENKOVIĆ, 2012)

PRILOG 2 - Karta efektivne debljine dubokog slanog vodonosnika Poljana prema podjeli područja na 4 razreda prema jednakoj širini razreda

PRILOG 3- Karta efektivne debljine dubokog slanog vodonosnika Poljana prema podjeli područja na 5 razreda prema jednakoj širini razreda

PRILOG 4 - Karta efektivne debljine dubokog slanog vodonosnika Poljana prema podjeli područja na 4 razreda prema vrijednosti medijana

PRILOG 5 - Karta efektivne debljine dubokog slanog vodonosnika Poljana prema podjeli područja na 5 razreda prema vrijednosti medijana

PRILOG 6 – Distribucija podataka prema razredima za 2. način izračuna (podjela prema istoj širini razreda; $e=50$ m)

PRILOG 7- Distribucija podataka prema razredima za 3. način izračuna (podjela prema istoj širini razreda; $e=40$ m)

PRILOG 8 - Distribucija podataka prema razredima za 4. način izračuna (podjela prema medijanu; 4 razreda)

PRILOG 9 - Distribucija podataka prema razredima za 5. način izračuna (podjela prema medijanu; 5 razreda)

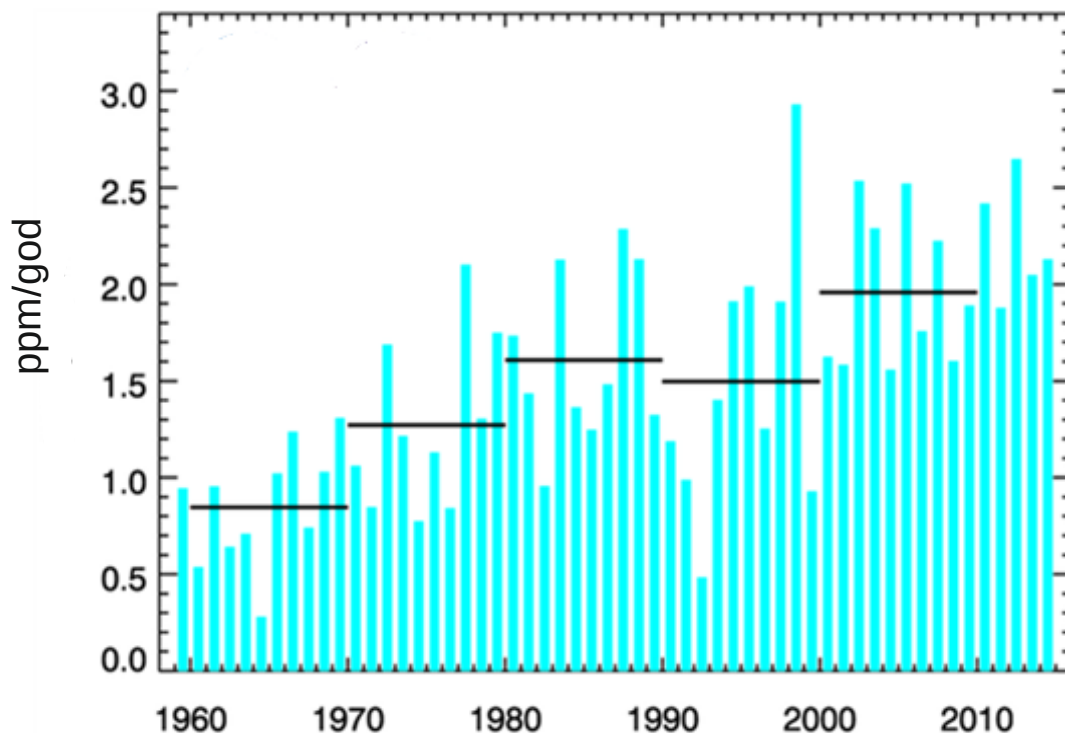
PRILOG 10 - Distribucija podataka poroznosti s pripadajućim efektivnim debljinama i ponderiranom srednjom vrijednosti poroznosti

1. Uvod

Tijekom geološke prošlosti klimatski uvjeti na Zemlji su bili podložni promjenama. Ovisno o malim varijacijama u Zemljinoj orbiti Sunčeve zrake su stizale na naš planet u većim ili manjim količinama pa su sukladno tome prevladavali topliji ili hladniji klimatski uvjeti, čiji su maksimumi bili izraženi kao ledena doba ili doba zatopljavanja. Kada Sunčeve zrake dosegnu Zemljinu atmosferu dio se odbija natrag u svemir, a dio apsorbiraju oceani i tlo. Upravo se ta apsorbirana energija pretvara u toplinsku i zagrijava naš planet. Uslijed zagrijavanja, oceani, mora i kopno počinju emitirati toplinu natrag prema atmosferi, međutim dio topline reflektira se natrag zbog djelovanja vodene pare i stakleničkih plinova (ugljičnog dioksida, metana, dušičnih oksida...) što uzrokuje zagrijavanje Zemlje. Ovakvo zagrijavanje se naziva prirodni efekt staklenika i nužno je za postojanje i održavanje života na Zemlji. Bez efekta staklenika, prosječna površinska temperatura Zemlje bi iznosila, vrlo niskih -18°C , umjesto sadašnjih ugodnih 15°C (<http://earthobservatory.nasa.gov/>).

Međutim, postoji i tzv. pojačani efekt staklenika uzrokovan antropogenim utjecajem koji se ponajprije odnosi na pretjeranu upotrebu fosilnih goriva i prekomjernu sječu šuma. Negativan utjecaj imaju i proizvodnja energije, grijanje, industrija, transport... Sagorjevanjem fosilnih goriva oslobađaju se velike količine ugljičnog dioksida u atmosferu. Ugljični dioksid, kao glavni staklenički plin, ima znatan utjecaj na globalne klimatske promjene, dok se sječom šuma sprječava njegova apsorpcija djelovanjem drveća.

Prije industrijske revolucije, koja je počela 1750-ih godina, koncentracija ugljičnog dioksida u atmosferi je iznosila oko 280 ppm, dok danas prelazi čak 400 ppm-a. Prema izvješćima U.S.Department of Commerce, koji vrši mjerenja koncentracije ugljičnog dioksida na Mauna Loi, na Hawaiiima, koncentracija ugljičnog dioksida u travnju ove godine je iznosila 403,26 ppm-a, dok je u istom razdoblju prošle godine iznosila 401,29 ppm-a. Zabrinjava i godišnja stopa rasta koja se ubrzano povećava, a za 2014. godinu iznosi 2,13 ppm-a. Na slici 1.1, prikazan je globalni trend rasta koncentracije ugljičnog dioksida u atmosferi od 1960. godine pa sve do danas. Trend pokazuje konstantan porast koncentracije, osim u razdoblju od 1990.-2000. godine, međutim već u idućem desetljeću je zabilježen značajan porast.

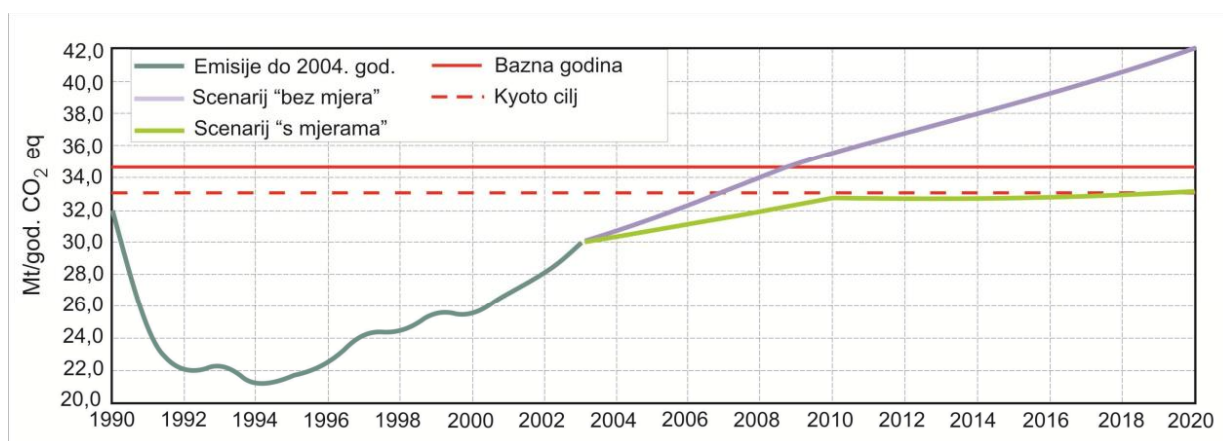


Slika 1.1 Godišnja stopa rasta koncentracije ugljičnog dioksida u atmosferi posljednjih desetljeća prema mjerenjima na Mauna Loi (NOAA)

Budući da glavninu suvremenih potreba za energijom čovječanstvo osigurava iz neobnovljivih izvora energije, prvenstveno fosilnih goriva, teško je očekivati da će se u skoroj budućnosti energetske potrebe u potpunosti ili barem većim dijelom zadovoljavati iz obnovljivih izvora kao što su energija vjetera ili sunca. Prepreka tomu leži u niz razloga poput tehnologije, infrastrukture i kretanja cijena. Prema tome, potrebno je pronaći prijelazno rješenje kojim bi se osiguralo dovoljno vremena za prijelaz na obnovljive izvore energije te istovremeno smanjilo otpuštanje ugljičnog dioksida u atmosferu kako njegova koncentracija ne bi dosegla razinu od 450 ppm-a koju mnogi stručnjaci definiraju kao kritičnu, iznad koje možda neće biti moguće spriječiti najdrastičnije posljedice. Takvo prijelazno rješenje moguće je ostvariti geološkim skladištenjem ugljičnog dioksida u različite geološke medije kao što su: duboki slani vodonosnici, iscrpljena plinska i naftna ležišta, kaverne u soli, slojevi nepridobivog ugljena, bazalti i šejlovi bogati organskom tvari.

Emisije stakleničkih plinova u Republici Hrvatskoj su razmjerno niske, a najveći udio u emisiji ima upravo ugljični dioksid. Međutim i Hrvatska se obvezala na smanjenje emisije stakleničkih plinova potpisom Kyoto protokola u ožujku 1999. godine. Hrvatski Sabor je protokol ratificirao u travnju 2007. godine. Ovim protokolom Hrvatska se obvezala smanjiti

emisiju stakleničkih plinova za 5% u razdoblju od 2008.-2012. godine u odnosu na referentnu emisiju iz 1990. godine. Na slici 1.2, prikazana je projekcija porasta emisije ugljičnog dioksida. Razvidno je da su predviđanja ukazivala na prekoračenja graničnih vrijednosti ukoliko se ne primjene mjere za sniženje emisije. Ipak, Hrvatska je zadržala vrijednosti emisija unutar granica, ali prema KOLENKOVIĆ (2012) razlog sniženja treba tražiti i u opadanju gospodarske aktivnosti u skladu s globalnom recesijom s obzirom da najveće sniženje emisije bilježe industrijski i građevinski sektor koji su jako pogođeni globalnom krizom.



Slika 1.2 Projekcije porasta emisije stakleničkih plinova (KOLENKOVIĆ 2012)

U ovom radu ispitat će se mogućnost procjene ukupnog kapaciteta skladištenja ugljičnog dioksida u dubokom slanom vodonosniku Poljana u zapadnom dijelu Savske depresije. Odnosno, detaljnije će se obraditi utjecaj procjene poroznosti na izračun kapaciteta skladištenja. S obzirom da je poroznost jedan od parametara čija je procjena u prijašnjim radovima (PEREŠIN, 2011; KOLENKOVIĆ, 2012) zbog manjka podataka o svojstvima stijena u dubokom podzemlju dosta nesigurna, htjelo se ispitati različite mogućnosti procjene kako bi se utvrdilo koji način pruža najkvalitetniju procjenu poroznosti, a potom i kapaciteta skladištenja. Poroznost je procjenjivana na pet načina, koristeći bušotinske podatke preuzete iz disertacije I. KOLENKOVIĆ (2012). Prvi način uključivao je procjenu poroznosti pomoću aritmetičke sredine. U preostala četiri načina računala se ponderirana srednja vrijednost poroznosti i efektivne debljine s tim da se područje istraživanja podijelilo na 4 ili 5 razreda. Načini podjele u razrede će biti kasnije detaljnije opisani. Dobiveni rezultati svih pet pristupa su uspoređeni i objašnjeni, uz priložene tablične izračune poroznosti i kapaciteta skladištenja ugljičnog dioksida i karte efektivnih debljina dubokog slanog vodonosnika Poljana podjeljenih u razrede. Rezultati su uspoređeni i s vrijednostima

dobivenim u doktorskoj disertaciji (KOLENKOVIĆ, 2012) radi utvrđivanja prednosti i mana navedenog postupka.

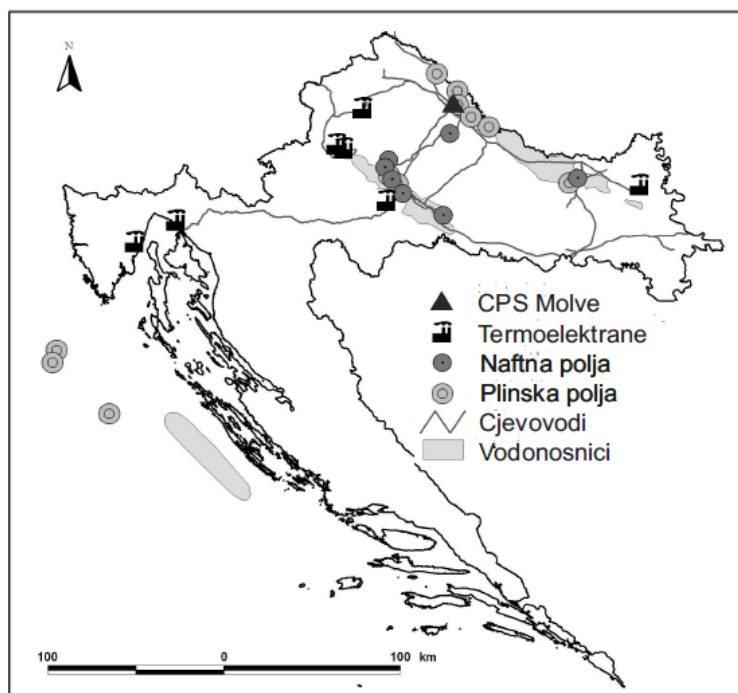
2. Koncept i metode geološkog skladištenja CO₂

Ideja o skladištenju CO₂ duboko u podzemlje se zapravo temelji na potpuno prirodnoj pojavi. Naime, na raznim mjestima diljem svijeta već postoje prirodne akumulacije CO₂ koji je u ležištima zadržan već tisućama i milijunima godina. Primjeri takvih ležišta se nalaze u Francuskoj, Grčkoj, Italiji, Njemačkoj, Mađarskoj (polje Mihalyi smješteno u Panonskom bazenu) (STEVENSON et al., 2001). U Hrvatskom dijelu Panonskog bazena visoke koncentracije CO₂ su prisutne u plinskim ležištima u zapadnom dijelu Dravske depresije. Ovakva prirodna ležišta pomažu u razumijevanju uvjeta pod kojima bi CO₂ trebalo uskladištiti u podzemlje te dokazuju da je skladištenje moguće provesti sigurno tijekom dugog vremenskog perioda.

Trajno skladištenje CO₂ je moguće provesti na više načina: u duboko smještenim poroznim i propusnim stijenama („geološko skladištenje“), stvaranjem karbonatnih minerala na površini, te otapanjem u oceanima. Skladištenje u oceanima predstavlja vrlo veliki sigurnosni rizik zbog mogućeg sniženja pH-vrijednosti i negativnog utjecaja na marinske ekosustave, a skladištenje stvaranjem karbonatnih minerala, je uz to što zahtijeva mnogo vremena, i izuzetno financijski zahtjevno. Prema tome najpovoljniji oblik trajnog skladištenja CO₂ je skladištenje u dubokim poroznim i propusnim stijenama.

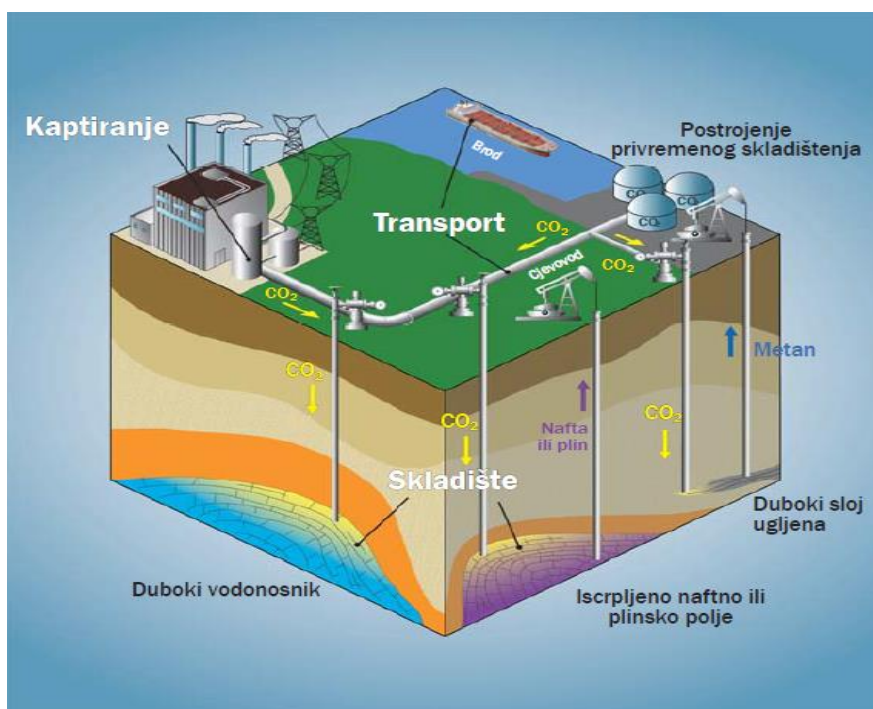
Proces skladištenja CO₂ duboko u podzemlju počinje njegovim kaptiranjem na velikim stacionarnim izvorima, kao što su rafinerije i elektrane, zatim se transportira cjevovodima ili brodovima do mjesta skladištenja i na kraju se utiskuje duboko u podzemlje. S ekonomskog i sigurnosnog aspekta je poželjno da izvor i mjesto skladištenja budu na što manjim udaljenostima. Manjim udaljenostima bi se smanjili troškovi transporta, ali isto tako bi se mogućnost nekontroliranog istjecanja CO₂ iz transportnog sustava svela na minimum. Kaptiranje i skladištenje CO₂ moglo bi utjecati na smanjenje emisije u atmosferu za čak 33 % (www.co2geonet.com), što bi značajno pridonijelo smanjenju učinka efekta staklenika i globalnog zagrijavanja.

Na slici 2.1, prikazani su najveći stacionarni izvori CO₂ u Hrvatskoj, naftna i plinska polja te cjevovodi kojima se nafta i plin transportiraju do rafinerija i termoelektrana. Povoljan čimbenik je taj što se veliki izvori CO₂ nalaze u blizini vodonosnika u koje bi se moglo vršiti utiskivanje i geološko skladištenje, a isto tako već postoji dobro razvijen sustav cjevovoda kojima bi se mogao vršiti transport CO₂. Jednim dijelom cjevovoda CO₂ se već transportira od CPS Molve do naftnih ležišta u blizini Ivanić Grada radi primjene tercijarnih metoda povećanja iscrpka, dok bi se preostali cjevovodi mogli prenamijeniti za transport CO₂.



Slika 2.1 Najveći izvori CO₂, duboki slani vodonosnici, iscrpljena naftna i plinska polja i regionalni cjevovodi u Hrvatskoj (SAFTIĆ et al., 2008)

Kao što je već spomenuto u uvodu, CO₂ je moguće skladištiti u različite geološke medije, a najvažniji su: duboki slani vodonosnici, iscrpljena plinska i naftna ležišta te slojevi ugljena (slika 2.2). Prema BACHU (2000), skladištenje je moguće i u kaverne u soli, bazalte s razvijenom pukotinskom poroznošću te u šejlove bogate organskom tvari, međutim kapaciteti takvih skladišta su mnogo manji.



Slika 2.2 Mogućnosti geološkog skladištenja CO₂ (www.co2geonet.com)

2.1. Skladištenje CO₂ u ležišta nafte ili plina

Geološko skladištenje CO₂, u ležišta nafte i plina uključuje dvije mogućnosti. Prva mogućnost se odnosi na skladištenje u već iscrpljenim naftnim i plinskim ležištima dok druga mogućnost podrazumijeva korištenje CO₂ u svrhu povećanja iscrpka (engl. *Enhanced Oil Recovery - EOR* i *Enhanced Gas Recovery - EGR*).

Skladištenje CO₂ u iscrpljena ležišta je izuzetno povoljno iz više razloga. Jedan od razloga je taj što su nafta i plin koji su se akumulirali u strukturnim i stratigrafskim zamkama, u tim zamkama ostali zarobljeni dugo vremena, u nekim slučajevima čak i milijunima godina što ukazuje na učinkovitost njihovog zadržavanja. Prednost ovakvih područja leži i u izuzetno dobroj istraženosti. Već postoje brojni podatci i modeli ležišta, konstruirani zbog potrebe za detaljnom karakterizacijom ležišta prije crpljenja ugljikovodika, što bi teoretski uštedjelo i vrijeme i novac potreban za brojna istraživanja. Još jedna velika prednost je postojeća infrastruktura koja se može iskoristiti za skladištenje CO₂. No samo dva projekta utiskivanja CO₂ u Europi vezana su za dobrim dijelom iscrpljena plinska ležišta - nizozemski pilot projekt K-12B u podmorju, te demonstracijski projekt Lacq francuskog Totala (www.co2crc.com.au/) na kopnu. Oba uključuju plinska ležišta. Razlog tomu treba tražiti i u

povećanju cijene energenata na svjetskom tržištu zbog čega ležišta ostaju duže u proizvodnji pa nije za očekivati da će u bližoj budućnosti ovakva područja postati podzemnim skladištima CO₂. Negativna strana skladištenja CO₂ u iscrpljena ležišta očituje se u opasnosti od ispuštanja CO₂ kroz brojne stare istraživačke i proizvodne bušotine.

S već spomenutog ekonomskog stajališta, zanimljiviji način skladištenja CO₂ podrazumijeva njegovo utiskivanje u ležišta u proizvodnji radi povećanja iscrpka nafte ili plina. Te operacije se u naftnom rudarstvu koriste kao tercijarne faze u eksploataciji ležišta pa se i utiskivanje ugljičnog dioksida vrši na način koji omogućava maksimalno povećanje iscrpka što znači da ovakve operacije predstavljaju samo uvjetno skladištenje, jer se veliki dio utisnutog ugljičnog dioksida crpi zajedno s ugljikovodicima na proizvodnim bušotinama, dok tek manji dio zaostaje u ležištu. Međutim, danas se veća pažnja posvećuje zadržavanju CO₂ u ležištu (primjerice polje Weyburn u Kanadi). INA d.d. je u Savskoj depresiji provela pokusna utiskivanja ugljičnog dioksida na naftnom polju Ivanić, a poslije probnog utiskivanja započelo se i s industrijskom primjenom na naftnim poljima Ivanić i Žutica (KOLENKOVIĆ, 2012). Rezultati pokusnog utiskivanja (DOMITROVIĆ et al., 2005) pokazali su da je utiskivanje tehnički izvedivo i da se može postići dodatni iscrpak uz trajno zadržavanje znatnog dijela CO₂ u ležištu.

2.2. Skladištenje CO₂ u slojeve ugljena

Geološko skladištenje ugljičnog dioksida utiskivanjem u slojeve ugljena uglavnom je povezano s crpljenjem metana iz slojeva koji se ne mogu rudariti, najčešće zato što zaliježu na većim dubinama (engl. *Enhanced Coal Bed Methane Recovery – ECBMR*, KOLENKOVIĆ, 2012). Tijekom utiskivanja u slojeve ugljena, CO₂ će zbog većeg afiniteta za adsorpciju na površini ugljene tvari istisnuti metan iz pora, pukotina i prslina u ugljenu. Primjenom ove metode moguće je povećati iscrpak metana s 50% na gotovo 90%. Problem ovog načina skladištenja je vrlo niska propusnost ugljena i bubrenje uzrokovano adsorpcijom ugljičnoga dioksida na površini ugljena koje dodatno smanjuje propusnost, čime se povećavaju troškovi utiskivanja. U svijetu se ovakvi projekti provode u SAD-u, Kanadi i južnoj Poljskoj, a radi se i na pripremi utiskivanja u podmorje u Škotskoj. Slojevi ugljena u Hrvatskoj, iako postoje, ne mogu se smatrati perspektivnima za izgradnju podzemnih skladišta ugljika jer uglavnom

zaliježū na malim dubinama i niskog su stupnja karbonizacije (EU GEOCAPACITY, 2009) tako da imaju općenito malu sposobnost adsorpcije CO₂.

2.3. Skladištenje CO₂ u dubokim slanim vodonosnicima

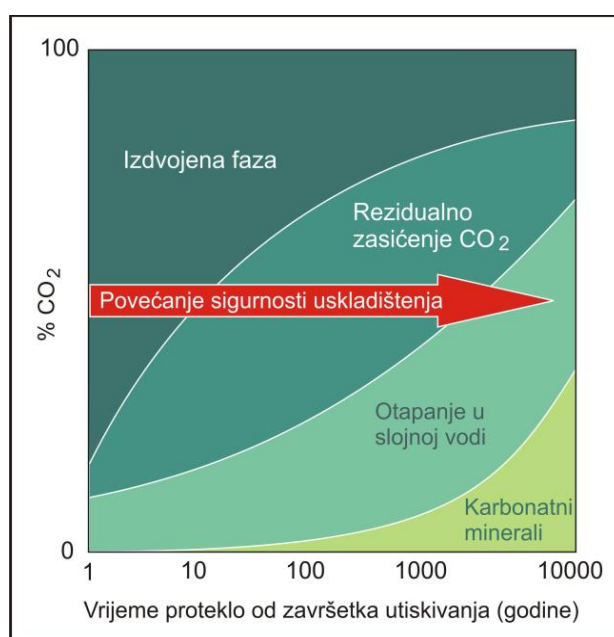
Duboki slani vodonosnici se smatraju najperspektivnijim podzemnim skladištima ugljičnoga dioksida. Duboki slani vodonosnici predstavljaju porozne i propusne stijene, smještene duboko u podzemlju u čijim se porama nalazi voda s visokim sadržajem otopljenih tvari (KOLENKOVIĆ, 2012). Takva voda nije pogodna za ljudsku, industrijsku i poljoprivrednu upotrebu. Povoljne značajke dubokih slanih vodonosnika su: široka geografska rasprostranjenost, prisutnost u svim sedimentnim bazenima, veliki potencijalni kapaciteti skladištenja, a često se nalaze i u blizini industrijskih izvora CO₂. Ovakav način skladištenja bi omogućio trajno i sigurno skladištenje CO₂ zbog djelovanja različitih mehanizama uzamčivanja, odnosno vezanja CO₂ u podzemlju, koji s vremenom povećavaju stabilnost uskladištenog CO₂. No problem predstavlja nedostatak podataka o građi tih prostranih slojeva što rezultira brojnim nesigurnostima pri procjenama, jer se radi o velikim stijenjskim tijelima koje je potrebno detaljno istražiti. Mehanizmi uzamčivanja će detaljnije biti opisani u poglavlju 2.3.1.

Učinkovitost geološkog skladištenja ugljičnog dioksida ovisi o brojnim čimbenicima, uključujući gustoću CO₂, tlak i temperaturu u podzemlju, gustoću i kemijski sastav slojne vode, litološku heterogenost i mineralni sastav stijena u koje se CO₂ utiskuje (SAFTIĆ & KOLENKOVIĆ, 2008).

Glavni geološki kriteriji odabira vodonosnika pogodnih za skladištenje CO₂ uključuju: dubinu zalijeganja, efektivnu debljinu, poroznost, propusnost, kontinuiranost (cjelovitost) pokrovnih stijena te salinitet. Vodonosnici moraju zalijegati na dubinama od 800-2500 m, zbog toga što se na tim dubinama dostižu nadkritični uvjeti tlaka i temperature. U nadkritičnim uvjetima CO₂ ima povećanu gustoću što omogućuje bolje iskorištavanje pornog prostora i veću sigurnost skladištenja. Podzemna skladišta moraju biti smještena u tektonski stabilnim područjima te moraju biti prekrivena debelim nepropusnim naslagama kako bi bila onemogućena dismigracija ugljičnog dioksida prema površini, odnosno u pliće smještene vodonosnike s pitkom vodom.

2.4 Mehanizmi uzamčivanja

Nakon utiskivanja CO₂ u duboki slani vodonosnik, ili neku drugu geološku formaciju u podzemlju zasićenu slojnom vodom, počinju djelovati mehanizmi uzamčivanja. Mehanizmi uzamčivanja se javljaju u različitim vremenskim razdobljima od vremena utiskivanja, neki počinju djelovati odmah po utiskivanju dok drugi postaju aktivni tisućama godina nakon utiskivanja (slika 2.3). Koji od mehanizama uzamčivanja će biti najdjelotvorniji ovisi, osim o vremenu, i o lokaciji te obliku ležišta. U svakom slučaju, mehanizmi uzamčivanja pridonose sigurnosti podzemnog skladišta kroz fizičke i kemijske procese.



Slika 2.3 Povećanje sigurnosti skladištenja CO₂ djelovanjem različitih mehanizama kroz dugi vremenski period (IPCC, 2005)

U fizičke procese uzamčivanja ubrajamo strukturno uzamčivanje koje uzrokuje akumulaciju CO₂ ispod pokrovne stijene. Budući da je CO₂ lakši od vode, po utiskivanju u vodonosnik njegovo kretanje će biti potaknuto uzgonom. CO₂ će migrirati prema vrhu strukture sve dok ne dođe do nepropusnog sloja, odnosno pokrovne stijene koja će onemogućiti njegovo daljnje uzdizanje.

Rezidualno uzamčivanje počinje djelovati tek po završetku utiskivanja djelovanjem kapilarnih sila. Kao što je već spomenuto, nakon utiskivanja CO₂ u vodonosnik njegovo kretanje je uglavnom uvjetovano uzgonom. Nakon prestanka utiskivanja oblak CO₂ se i dalje kreće u smjeru uzgona i istiskuje vodu iz pora, međutim porni prostor može biti toliko uzak da

CO₂ ne može dalje migrirati i istiskivati okolnu vodu te će djelovanjem kapilarnih sila ostati zarobljen u porama. Kako oblak CO₂ napreduje i istiskuje vodu iz pora, na donjem kraju oblaka voda se vraća natrag u pore i dolazi do razrjeđenja CO₂ koji će u suženim porama ostati zarobljen, odnosno uzamčen djelovanjem kapilarnih sila i to se zove rezidualnim uzamčivanjem.

Uzamčivanje otapanjem postaje značajnije tek nakon dužeg vremenskog perioda. Grube procjene na projektu Sleipner pokazuju da se otprilike 15% CO₂ otopi 10 godina nakon utiskivanja (www.co2geonet.com). CO₂ se može miješati sa slojnom vodom i otapati u njoj kroz procese difuzije, disperzije i konvekcije (BACHU et al., 2007). Nakon utiskivanja prvo dolazi do disperzije, a zatim difuzije i konvekcije. Brzina otapanja ovisi o kontaktu CO₂ i slojne vode pa kada slojna voda u kontaktu sa CO₂ postane zasićena dolazi do miješanja difuzijom. Voda zasićena sa CO₂ je gušća od slojne vode pa će doći do konvekcijskog strujanja pri čemu će se teža voda, zasićena sa CO₂ spuštati prema dnu ležišta dok će se lakša, slojna voda kretati prema gore. Količina CO₂ koja se može otopiti konstantno će se povećavati zbog obnavljanja kontakta između slojne vode i CO₂. Glavna prednost uzamčivanja otapanjem jest ta što kada se CO₂ jednom otopi, više nije slobodan, odnosno ne postoji kao samostalna faza čime je onemogućeno njegovo uzdizanje prema višim slojevima djelovanjem uzgona.

Mineralno uzamčivanje je također proces koji postaje djelotvoran tek nakon dugog vremenskog perioda (vidi sliku 2.3). CO₂ može u kombinaciji sa slojnom vodom reagirati s mineralima od kojih se sastoji ležišna stijena ili s onima otopljenim u slojnoj vodi. Ovisno o pH-vrijednosti i mineralnom sastavu može doći do otapanja minerala ili do taloženja novih mineralnih faza.

2.5 Sigurnost

Najveći sigurnosi rizik prilikom skladištenja CO₂ predstavlja mogućnost nekontroliranog istjecanja CO₂ iz podzemnog skladišta ili iz cjevovoda tijekom transporta. Povećana koncentracija CO₂ ima izuzetno negativan utjecaj na ljudsko zdravlje. Kod koncentracija iznad 2% CO₂ ima jak utjecaj na respiratorni sustav, a koncentracije iznad 7-10% mogu uzrokovati nesvjesticu i smrt (IPCC, 2005). Nekontrolirano istjecanje CO₂ može

imati i negativan utjecaj na marinske i terestričke ekosustave, onečišćenje podzemne vode, pojavu induciranog seizmiciteta.

Potencijalni putevi dismigracije CO₂ su diskontinuiteti u stijenskoj masi (pukotine, rasjedi) i bušotine (istraživačke ili utisne). Do dismigracije može doći u obliku naglog i brzog ispuštanja ili polaganog i postupnog koje je možda i opasnije zbog teže detekcije. Zbog navedenih razloga izuzetno je važno identificirati potencijalne puteve dismigracije, odrediti načine monitoringa podzemnog skladišta te predvidjeti moguće scenarije istjecanja CO₂ te sukladno tome odrediti postupke u slučaju istjecanja i mjere sanacije. Ipak, najbolja metoda zaštite je prevencija pa prema tome zakonodavne vlasti trebaju odrediti način planiranja i provođenja projekta i osigurati poštivanje sigurnosnih odredbi.

3. Geološke značajke Savske depresije

Panonski bazenski sustav je pretežno nizinsko područje, smješteno između Europske ploče na sjeveru, Alpa na zapadu, Jadranske karbonatne platforme na jugu i Mezijske ploče na istoku. Formiranje Panonskog bazena počelo je u miocenu, prije 17,5 – 20 milijuna godina raspadom Parathetysa na niz manjih bazena. U geotektonskom smislu najveći dio centralnog Parathetysa obuhvaća Panonski bazenski sustav (panonski prostor) ograničen Alpama, Karpatima i Dinaridima (BUCKOVIĆ, 2006). Hrvatskoj pripada jugozapadni dio Panonskog bazenskog sustava i obuhvaća četiri depresije, od sjeverozapada prema jugoistoku to su: Murska, Dravska, Savska i Slavonsko-srijemska (slika 3.1). Savska depresija, u kojoj se nalaze pješčenjaci Poljana, smještena je uz jugozapadni rub Panonskog bazena.

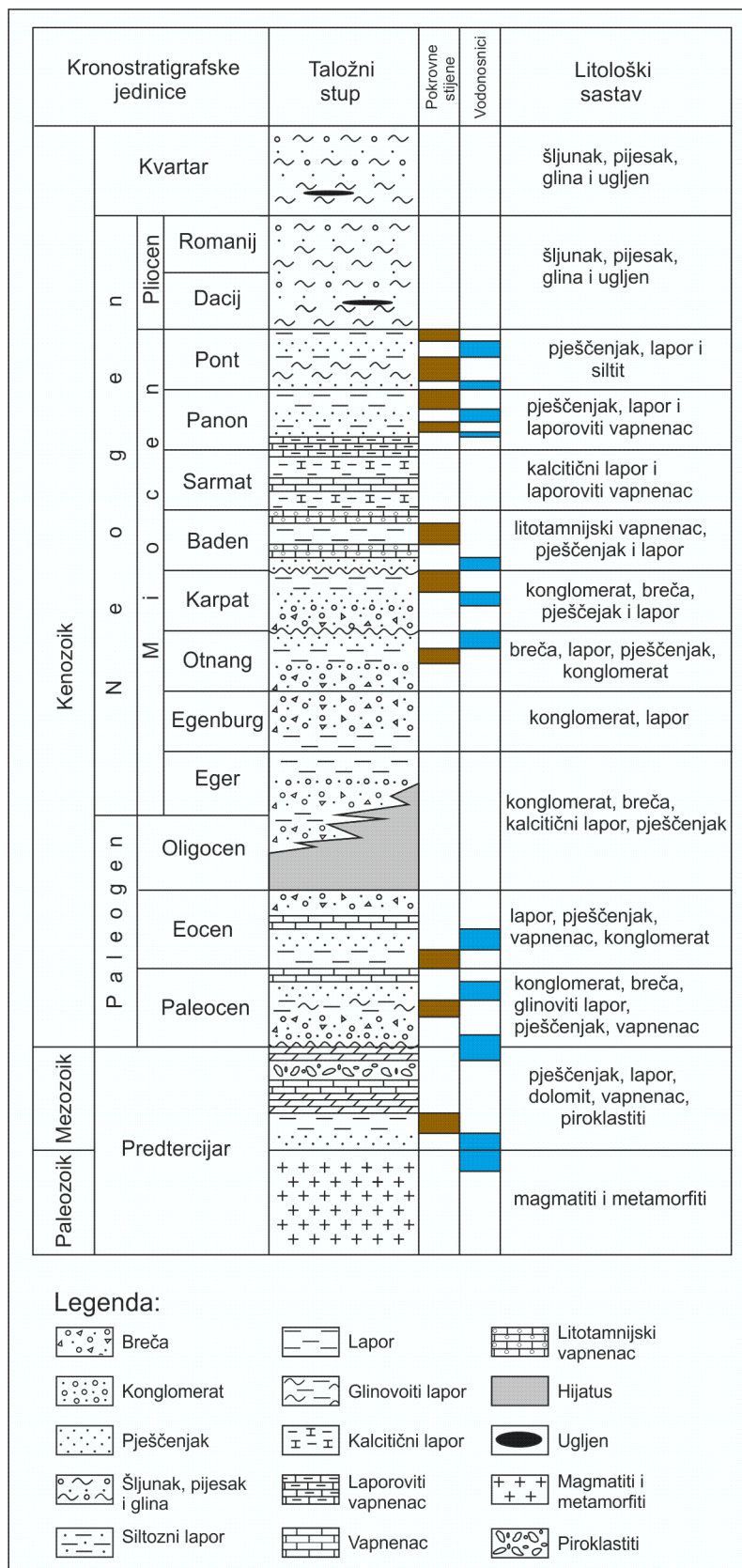


Slika 3.1 Depresije unutar hrvatskog dijela Panonskog bazena (KRANJEC et al., 1981)

U ovom poglavlju pobliže su opisana stratigrafska i strukturna obilježja Savske depresije s naglaskom na naslage neogenske i kvartarne starosti, s obzirom da najveći dio klastičnih sedimenata kojima je Savska depresija ispunjena pripada upravo tom razdoblju.

3.1. Stratigrafski odnosi

Na slici 3.2 prikazan je geološki stup s kronostratigrafskim jedinicama i litološkim sastavom u Savskoj depresiji. Na stupu su označeni vodnosnici i pokrovne stijene. Pješčenjaci Poljana, potencijalni objekti za skladištenje ugljičnog dioksida, pripadaju donjem pontu, a u krovini im je pokrovna stijena - Graberski lapor.



Slika 3.2 Geološki stup naslaga u jugozapadnom dijelu Panonskog bazena

U građi Savske depresije, kao i drugih depresija u jugozapadnom dijelu Panonskog bazena, razlikuju se magmatsko-metamorfni i manjim dijelom sedimentni kompleks stijena paleozojske i mezozojske starosti (predtercijarna podloga) te sedimentni kompleks kojeg čine stijene tercijara i kvartara (VRBANAC, 1996; VELIĆ, 2007).

3.1.1 Taložni megaciklusi

Tercijarne (pretežno neogenske) naslage dosežu značajne debljine u području Savske depresije. Debljina neogenskih naslaga uz rub depresije iznosi oko 1000 m, dok u središnjem dijelu dosežu debljinu od 5500 m (SAFTIĆ et al., 2003). Najstarije naslage pripadaju egenburškim paraličkim i marinskim sedimentima koji se nalaze samo u zapadnim graničnim dijelovima Panonskog bazena (LUČIĆ et al., 2001).

Naslage tercijarnog sustava taložene su u tri megaciklusa. Svaki megaciklus obuhvaća stijene istaložene tijekom jednog transgresivno-regresivnog ciklusa uvjetovanog tektonskom aktivnošću.

Prvi megaciklus je donjomiocenske do srednjemiocenske starosti. Značajke prvog megaciklusa su heterogenost naslaga i velike promjene debljina slojeva. U Savskoj depresiji na udaljenosti od 3 do 4 km debljina tih naslaga od svega nekoliko metara dostiže iznose i od 2000 m (VELIĆ, 2007). Litološki sastav obuhvaća krupne klastite (breče, konglomerate, pješčenjake), sitne klastite (gline, lapore, kalcitične lapore, pjeskovite i glinovite lapore s interkalacijama tufova, tankoslojevite kalcitične lapore i pješčenjake tzv. „Tripoli naslage“) i karbonate (vapnence, biogene litotamnijske vapnence, kalkarenitne biogene pješčenjake) kao i njihove česte međusobne izmjene, uz mjestimične pojave ugljena (VELIĆ, 2007). Unutar sedimenata prisutni su tufovi i efuzivne stijene (andeziti, daciti, rioliti, bazalti) za koje se smatra da su nastale vulkanskom aktivnošću tijekom egera i egenburga (PAMIĆ, 1997).

Prvim početkom sedimentacije, prvog megaciklusa taloženja, smatra se otnang. Tijekom egera i egenburga taloženje se odvijalo samo na malim, prostorno ograničenim dijelovima – u Murskoj depresiji i u najzapadnijim zonama Dravske depresije, a tek u otnangu su stvoreni uvjeti koji su rezultirali sedimentima rasprostranjenim na gotovo cijelom promatranom području.

U karpatu dolazi do transgresije i taloženju marinskih lapora, siltita, pješčenjaka, a mjestimice ima i trahiandezita i tufova.

Badenske naslage su široko rasprostranjene zbog uznapredovale transgresije. Donjobadenske naslage uglavnom se sastoje od baznih konglomerata, krupnozrnatih pješčenjaka i litotamnijskih vapnenaca, dok u vršnom dijelu pretežu vapnenci i kalcitni lapori proslojeni pjeskovitim laporima i vapnenačkim pješčenjacima (SAFTIĆ, 1998). U gornjem badenu u plitkomorskom facijesu uz litotamnijske vapnence ima konglomerata i pješčenjaka (BUCKOVIĆ, 2006). U dubljim dijelovima bazena dolazi do taloženja pjeskovitih i glinovitih lapora (LUČIĆ et al., 2001).

Sarmatske naslage leže konkordantno na badenskim, a taložene su u uvjetima opće regresije započete još krajem badena (PAVELIĆ, 2001). Dolazi i do smanjenja saliniteta, zbog pucanja veze s južnim krajem Tethysa. Naslage se sastoje od dva facijesa: plitkomorskog (brakične gline, pješčenjaci i vapnenci) i dubokomorskog (lapori, laporoviti vapnenci i turbiditi).

Drugi megaciklus je gornjomiocenske starosti. Naslage taložene u ovom megaciklusu predstavljaju jednoličnu izmjenu pješčenjačkih, siltnih i laporovitih tijela. Maksimalne debljine utvrđene su u profilima bušotina u središnjim područjima depresija za koje je vezana i najveća količina pješčenjaka koji postupno uklinjavaju prema rubovima i bočno prelaze u lapore (VELIĆ, 2007).

U panonu dolazi do oslađivanja te se talože pretežito brakične i slatkovodne naslage. Na temelju sadržaja endemskih mekušaca gornjomiocenske i pliocenske naslage Paratethysa u Hrvatskoj dijele se u pet akrozona (SAFTIĆ, 1998). Prema tome, naslage donjeg panona još se nazivaju i Croatica naslage prema pužu *Radix croatica* GORJANOVIĆ – KRAMBERGER. Croatica naslage se sastoje od vapnenaca, laporovitih vapnenaca, vapnenačkih lapora i od pješčenjaka (SAFTIĆ, 1998; LUČIĆ et al. 2001).

Naslage gornjeg panona nazivaju se i Banatica naslage prema školjci *Congeria Banatica* R:HOERNES, a čine ih lapori u izmjeni s pješčenjacima.

Donjopontske naslage se prema školjci *Paradacna abichi* R. HOERNES nazivaju i Abichi naslagama. Izgrađene su od sivih sitnozrnatih pješčenjaka i glinovitih i siltnih lapora (SAFTIĆ, 1998).

Naslage gornjeg pontsa se prema školjci *Congeria Rhomboidea* M. HOERNES nazivaju Rhomboidea naslagama. Sastoje se od pješčenjaka i pijesaka, te pjeskovitih i glinovitih lapora sa slojevima ugljena (SAFTIĆ, 1998).

Treći megaciklus je pliocensko – kvartarne starosti. Naslage trećeg megaciklusa obuhvaćaju slabo konsolidirane ili nekonsolidirane naslage pliocena, pleistocena i holocena. Litološki sastav stijena je raznolik, a sastoji se od glina, pijesaka širokog granulometrijskog

raspona, šljunaka te ugljena vezanog za močvarišta (CVETKOVIĆ, 2013). Bogatstvo pliocenske faune i njezina raznolikost, posebice faune puževa, omogućili su razradbu na tri nivoa – donje, srednje i gornje paludinske naslage prema filogenetskom razvoju puževa roda *Viviparus* (CVETKOVIĆ, 2013).

3.2 Strukturna obilježja

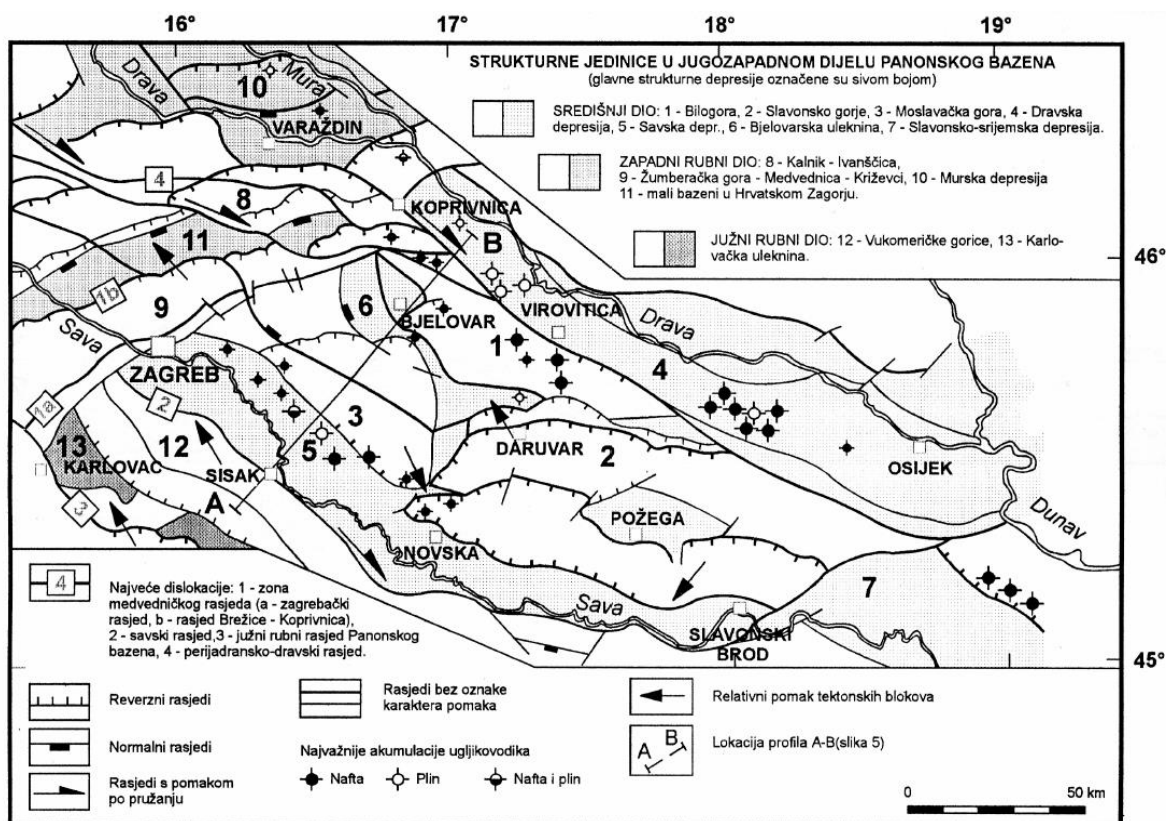
Panonski bazen se, kao što je već spomenuto, sastoji od četiri depresije te je postankom vezan uz alpsku orogenezu. Prema VELIĆ (2007), neki taložni bazeni su u određenim razdobljima geološke prošlosti imali zajednički razvoj, a neki individualni pa se prema tome razlikuju tri veće strukturne zone: zapadni rubni dio, južni rubni dio i središnji rubni dio kojemu pripada i Savska depresija. Strukturni odnosi unutar Savske depresije, mogu se promatrati u sklopu razvoja struktura u jugozapadnom dijelu Panonskog bazena pri čemu se izdvajaju tri faze razvoja struktura.

Prva, ekstenzijska faza počela je u razdoblju oligocen – donji miocen. Prema PAMIĆU (1997), početak ekstenzije je obilježen andenzitnim vulkanizmom u području sjevernije od Zagreba. Glavno taložno područje tijekom ove faze razvoja stvarano je između Zagreba, Varaždina i Ljubljane i označava početak razvoja Murske depresije. Također, aktivni su bili i desni transkurentni rasjedi.

Druga faza je zapravo glavna ekstenzijska faza za vrijeme ranog i srednjeg miocena (od egenburga do badena). Dolazi do promjene orijentacije regionalnog stresa na SSI-JJZ, što uzrokuje pokretanje lijevih transkurentnih rasjeda (PRELOGOVIĆ et al., 1998; SAFTIĆ, 1998; LUČIĆ et al., 2001). Pomicanjem tektonskih blokova prema sjeveroistoku, duž novonastalih lijevih transkurentnih rasjeda, dolazi do otvaranja strukturnih depresija (Savske i zapadnog dijela Dravske depresije).

Završetak glavne ekstenzije, u jugozapadnom dijelu Panonskog bazena, traje od sarmata do pontu. U panonu dolazi do prestanka subdukcije u vanjskim Karpatima i počinje termalno spuštanje kore u Panonskom bazenu (PRELOGOVIĆ et al., 1998). Upravo su zbog toga panonski i pontski sedimenti taloženi na širokom području. Orijentacija regionalnog stresa koji se koncem panona zaokrenuo na ISI – ZJZ pogodovala je aktiviranju rasjeda po sjevernom rubu Slavenskog gorja, po južnom rubu Dravske depresije i u istočnoj Slavoniji, a također i rasjeda po južnom rubu Panonskog bazena (VELIĆ, 2007).

Treća faza deformacije se u potpunosti razlikuje od prethodnih zbog značajne promjene orijentacije stresa na smjer sjever – jug. Ova faza počela je u pliocenu i traje sve do danas. Novi strukturni odnosi, uvjetovani podvlačenjem Jadranske karbonatne platforme pod Alpe i Dinaride su prikazani na slici (3.3). Izraženi su desni transkurentni pomaci. Brojne dionice rasjeda reaktivirane su reversnim karakterom pomaka (SAFTIĆ, 1998; VELIĆ, 2007).



Slika 3.3 Recentni strukturni odnosi u jugozapadnom dijelu Panonskog bazena (LUČIĆ *et al.*, 2001.)

4. Metode regionalne procjene kapaciteta skladištenja CO₂ u dubokim slanim vodonosnicima

Metodologija koja se koristi u procjeni kapaciteta podzemnog skladišta se razlikuje s obzirom na cilj istraživanja i veličinu istražnog područja. Kapacitet može biti procijenjen na globalnoj, regionalnoj ili lokalnoj razini. Općenito, procjene su opterećene brojnim nesigurnostima zbog toga što zahtijevaju veliki broj podataka prikupljen različitim istraživanjima. Globalne i regionalne procjene su izrazito nesigurne, što zbog dostupnosti podataka, što zbog načina njihove interpretacije čemu svjedoči i veliko razilaženje u procjenama na ovim dvjema razinama. Procjene kapaciteta skladištenja na razini cijelog svijeta često se nazivaju „vrlo velikima“, a variraju u širokom rasponu između 100 i 200 000 Gt CO₂ (BRADSHAW et al., 2007). Procjene na lokalnoj razini su puno detaljnije, uzimaju u obzir heterogenost i složenost geološke građe. Takve procjene obično prethode izboru podzemnog skladišta, a provode se za jedno ili više potencijalnih podzemnih skladišta, pri čemu se utvrđuje kapacitet, injektivnost i postojanje zadovoljavajućih pokrovnih stijena (BACHU et al., 2007). Najtočniji način procjene kapaciteta skladištenja na lokalnoj razini je kroz konstrukciju geološkog modela i korištenje podataka iz modela u simulacijama ležišta (BRADSHAW et al., 2007).

4.1 Kapacitet skladišta

Raspoloživost kapaciteta skladištenja CO₂ se može izraziti slično kao rezerve energetske i mineralnih sirovina. Na temelju takve pretpostavke istraživači Radne skupine za provjeru i identifikaciju standarda za procjenu kapaciteta skladištenja CO₂ (*Task Force for Review and Identification of Standards for CO₂ Storage Capacity Estimation*) Foruma za vođenje sekvenciranja ugljika (*Carbon Sequestration Leadership Forum - CSLF*) su definirali tehnno-ekonomsku piramidu pomoću koje su izdvojili više kategorija kapaciteta (slika 4.1).



Slika 4.1 Tehno-ekonomska piramida kapaciteta (CSLF, 2007)

U donjem dijelu piramide nalazi se teoretski kapacitet. Ovaj kapacitet zauzima cijeli volumen piramide i predstavlja najgrublju procjenu kapaciteta zbog toga što ne uzima u obzir nikakva ograničenja (tehnička ili ekonomska) već se temelji na pretpostavci da je sav porni prostor ležišta dostupan za ispunjavanje s CO₂, odnosno u slučaju slanog vodonosnika da je sva slojna voda dostupna za otapanje CO₂ uz maksimalno zasićenje. Prema tome, ovakva procjena kapaciteta je višestruko precijenjena.

Efektivni kapacitet zauzima nešto manji volumen piramide od teoretskog te predstavlja realističniju procjenu zbog toga što uzima u obzir određena tehnička (geološka i inženjerska) ograničenja i ograničenja uslijed drugih mogućnosti korištenja (ležišta nafte, plina, mineralnih sirovina, zaštićena prirodna područja na površini i dr.).

Zatim slijedi praktični ili stvarni kapacitet prilikom čije procjene se uzimaju u obzir i ekonomske, pravne i regulatorne barijere za skladištenje CO₂. Zbog promjenjivosti ovih zadanih uvjeta praktični kapacitet je podložan promjenama.

U samom vrhu piramide, nalazi se povezani kapacitet koji predstavlja kapacitet podzemnog skladišta nakon povezivanja izvora CO₂ i skladišnih objekata uzimajući u obzir ne samo geološke i inženjerske aspekte, nego i socijalne i okolišne (CSLF, 2007).

Idući od dna prema vrhu piramide, odnosno od teoretskog prema povezanom kapacitetu, prostor dostupan za skladištenja CO₂ se sve više smanjuje, ali isto tako postaje sve realističniji zbog mnogobrojnih ograničenja koja utječu na smanjenje raspoloživog kapaciteta skladištenja pa ih prema tome treba uključiti u procjenu.

4.2 Metoda procjene kapaciteta skladištenja CO₂ u regionalnim dubokim slanim vodonosnicima prema US Department of Energy (US DOE)

Razvijene su različite metodologije za procjenu kapaciteta podzemnih skladišta CO₂ prilikom izrade atlasa podzemnih skladišta za Queensland, Sjevernu Ameriku i Norvešku. Istraživači Nacionalnog energetskog tehnološkog laboratorija Ureda za fosilnu energiju Odjela za energiju Sjedinjenih država (US Department of Energy – US DOE, 2007, 2010) razvili su razmjerno jednostavnu formulu za izračun kapaciteta skladištenja CO₂:

$$M_{CO_2} = A \cdot h \cdot \Phi \cdot \rho_{CO_2} \cdot S_{eff}, \quad (4-1)$$

gdje je A (km²) površina regionalnog vodonosnika, h (m) je njegova prosječna debljina, Φ (%) predstavlja prosječnu poroznost, ρ_{CO_2} (kg/m³) je gustoća CO₂ u ležišnim uvjetima i S_{eff} je koeficijent učinkovitosti skladištenja koji označava veličinu pornog obujma vodonosnika kojega je moguće ispuniti sa CO₂. Na ovaj način su procijenjeni kapaciteti skladištenja u regionalnim dubokim slanim vodonosnicima većine europskih zemalja (EU GEOCAPACITY, 2009). Međutim, ova metoda je razvijena za potrebe istraživanja kapaciteta skladištenja dubokih slanih vodonosnika na području SAD-a i Kanade pa se javljaju teškoće prilikom primjene koeficijenta učinkovitosti skladištenja. Naime S_{eff} je izračunat samo za sedimentne bazene na području Kanade i SAD-a pa njegova primjena u ostatku svijeta nije pouzdana. Prema rezultatima statističke obrade podataka (Monte Carlo simulacije) za sedimentne bazene na području SAD-a i Kanade vrijednosti koeficijenta učinkovitosti skladištenja između 1 i 4% imaju pouzdanost u rasponu od 15 do 85%, dok vrijednosti između 1,8 i 2,7% imaju pouzdanost P_{50} (US DOE, 2007, 2010). Što znači da se vrijednosti između 1,8 i 2,7% mogu smatrati srednjim vrijednostima procjene jer je u 50% slučajeva dobivena veća vrijednost od navedene, a u 50% slučajeva manja. U okviru FP6 projekta EUGeocapacity (2009) najprije je korišten koeficijent skladištenja od 3%, no kasnije je ipak uzeta vrijednost od 2% kako bi se izbjeglo precjenjivanje kapaciteta skladištenja.

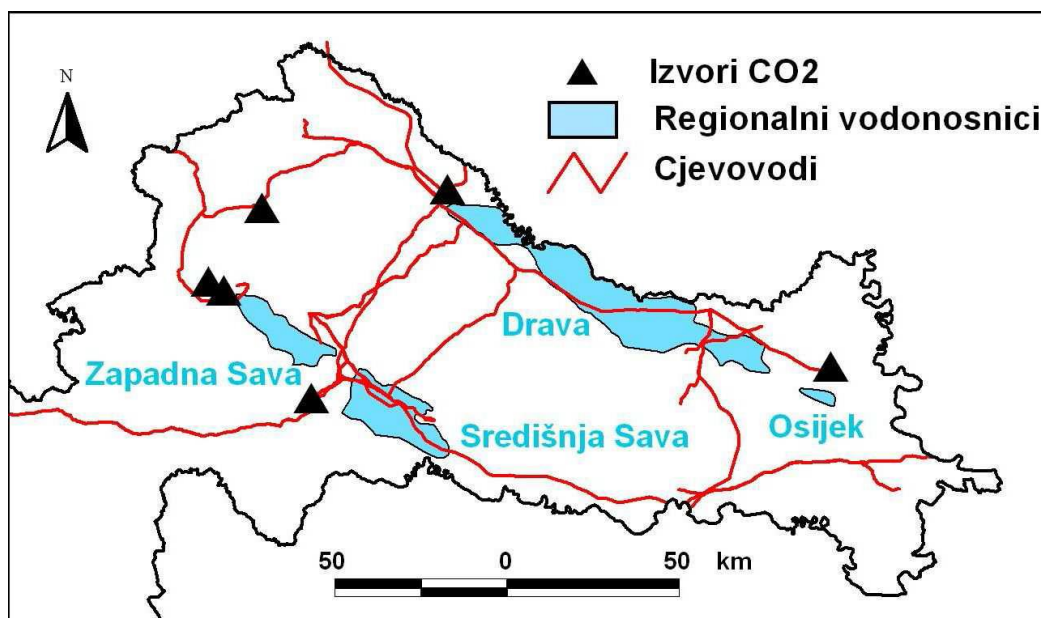
Glavna prednost ove metodologije je njezina jednostavnost, no dobiveni rezultati su uglavnom orijentacijskog karaktera i ne mogu se koristiti za odabir lokacija skladištenja.

Kapacitet podzemnog skladišta u dubokom slanom vodonosniku Poljana je u okviru doktorske disertacije KOLENKOVIĆ (2012), izračunat na temelju izraza 4-1, ali s tim da je

konstruirana karta specifičnog kapaciteta skladištenja, odnosno vodonosnik je razdijeljen na segmente s različitim kapacitetom.

4.3 Procjena kapaciteta skladištenja u regionalnim dubokim slanim vodonosnicima u Republici Hrvatskoj

Područje Republike Hrvatske je podjeljeno na tri velike jedinice: Panonski bazen, Dinaridi i Jadransko podmorje. Jedinice se međusobno razlikuju prema građi i litološkom sastavu stijena. Kao povoljna područja za skladištenja CO₂ izdvojeni su Panonski bazen i Jadransko podmorje. Dinaridi se zbog složene geološke građe i velike okršenosti ne smatraju potencijalnim za skladištenje CO₂. U Panonskom bazenu su izdvojena 4 regionalna vodonosnika: Drava, Osijek, Središnja i Zapadna Sava (slika 4.2). Pješčenjaci Poljana su smješteni u vodonosniku Zapadna Sava. U tablici 4.1 su prikazani procijenjeni kapaciteti skladištenja sva četiri regionalna vodonosnika, s ulaznim parametrima. Izračuni su se vršili u okviru FP6 projekta EU GeoCapacity, a kapaciteti skladištenja su izračunati prema izrazu 4-1.



Slika 4.2 Regionalni duboki slani vodonosnici u hrvatskom dijelu Panonskog bazena
(KOLENKOVIĆ, 2012, modificirano prema SAFTIĆ, et al., 2008)

Tablica 4.1 - Ulazni parametri i rezultati procjene kapaciteta skladištenja za duboke slane vodonosnike u hrvatskom dijelu Panonskog bazena (GEOCAPACITY, 2009; KOLENKOVIĆ, 2012)

Duboki slani vodonosnik	Površina (m ²)	Srednja debljina (m)	Udio propusnih slojeva	Prosječna poroznost (%)	Prosječna gustoća CO ₂ (t/m ³)	Koeficijent učinkovitosti skladištenja (%)	Ukupno procijenjeni kapacitet (Mt)
Drava	1353234016	1000	0,60	25	0,373	3	2271,403
Osijek	41085959	2500	0,70	20	0,418	3	180,326
Zapadna Sava	314735506	1500	0,33	17	0,401	3	318,614
Središnja Sava	517134191	1700	0,32	18	0,450	3	683,610

Najpovoljnija formacija za skladištenje CO₂ u Panonskom bazenu se sastoji od izmjene pješčenjaka i lapora pri čemu pješčenjaci predstavljaju kolektore za CO₂, a lapori izolatore koji bi onemogućavali njegovo istjecanje u pliće slojeve. Ovi slojevi odlikuju se povoljnim petrofizikalnim svojstvima. U središnjim dijelovima depresija nalaze se u odgovarajućem dubinskom intervalu (750-2500 m) i mogu se pouzdano korelirati na temelju bušotinskih podataka (SAFTIĆ, et al., 2008).

Dalje u poglavlju će detaljnije biti opisani parametri potrebni za procjenu kapaciteta skladištenja s naglaskom na utjecaj poroznosti, diskretizacije prostora i očitavanje podataka na samu procjenu za duboki slani vodonosnik Poljana, no najprije će biti opisan postupak ograničavanja regionalnog vodonosnika.

4.4 Utvrđivanje područja istraživanja i granica regionalnog vodonosnika

U prijašnjim radovima (PEREŠIN, 2011; KOLENKOVIĆ, 2012), pješčenjaci Poljana su zbog povoljnih petrofizikalnih svojstava te zbog toga što se nalaze u podini regionalnog izolatora, odabrani kao potencijalni objekt u koji bi se mogao skladištiti CO₂. U litostratigrafskom smislu pješčenjaci Poljana pripadaju formaciji Kloštar Ivanić grupe Sava, a kronostratigrafski pripadaju donjem pontu.

S obzirom na prirodne uvjete, granice regionalnog dubokog slanog vodonosnika određene su graničnom dubinom skladištenja CO₂ u nadkritičnom stanju (linija 800 m) i linijom isklinjenja pješčenjaka Poljana, dok je granica prema jugu i jugoistoku postavljena

proizvoljno zbog potrebe za ograničavanjem područja istraživanja, međutim pješčenjaci Poljana se pružaju i dalje prema jugoistoku.

4.5 Parametri za procjenu kapaciteta skladištenja i diskretizacija prostora dubokog slanog vodonosnika Poljana

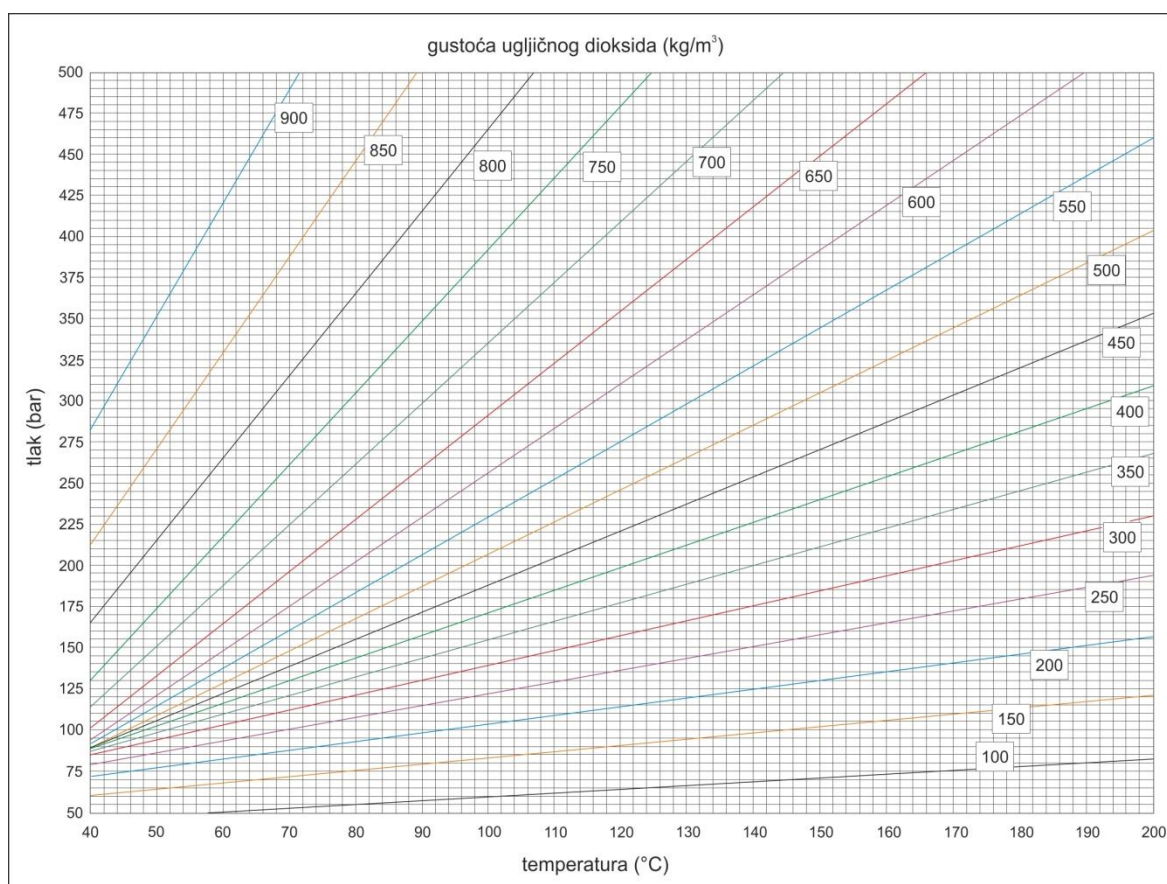
Nakon ograničavanja područja istraživanja, konstruirane su karte efektivne debljine, gustoće i poroznosti te je izvršena diskretizacija prostora na način da je konstruirana mreža od 178 blokova površine 4 km². Diskretizacija je bila potrebna kako bi se mogle očitati vrijednosti parametara potrebnih za procjenu kapaciteta skladištenja. Dobivene karte su prekrivene mrežom blokova te su iz središta svakog bloka očitavane njihove vrijednosti i potom je prema izrazu 4-1 izračunat kapacitet skladištenja za svaki blok. Zbrojem kapaciteta skladištenja svih blokova dobiven je ukupni kapacitet skladištenja izražen u tonama. Međutim, postavlja se pitanje je li potrebno vršiti diskretizaciju prostora na takav detaljan način s obzirom da očitavanje podataka iz središta blokova za sve parametre potrebne za procjenu iziskuje puno vremena? Također, treba uzeti u obzir da je ovim istraživanjem obuhvaćen samo jedan dio potencijalnih regionalnih vodonosnika za skladištenje CO₂. U slučaju istraživanja većih područja broj blokova bio bi daleko veći što bi iziskivalo još više vremena. Stoga se u ovom diplomskom radu pokušao naći način na koji bi se izbjegla diskretizacija prostora pomoću blokova, a da kvaliteta procjene ukupnog kapaciteta skladištenja i dalje ostane zadovoljavajuća. Kako bi se izbjegla diskretizacija, površina područja istraživanja je izračunata u računalnom programu AutoCAD pomoću naredbe *Area* koja računa površine nepravilnih tijela.

4.6 Određivanje efektivne debljine pješčenjaka Poljana, gustoće CO₂ i koeficijenta učinkovitosti skladištenja

Efektivna debljina je jedan od najvažnijih parametara prilikom izračuna kapaciteta skladištenja, a određena je na temelju elektrokarotažnih dijagrama. Granice slojeva postavljene su prema krivulji spontanog potencijala, čiji otklon u lijevu stranu, odnosno

prema negativnom potencijalu ukazuje na propusne naslage (slojna voda je većeg saliniteta od isplake).

Gustoća CO_2 predstavlja funkciju tlaka i temperature, pa su za njezin izračun potrebni podatci o termičkim gradijentima i o tlaku na srednjoj dubini dubokog slanog vodonosnika. Vrijednosti gustoća dobivene su iz dijagrama ovisnosti gustoće o tlaku i temperaturi (slika 4.3, VULIN, 2010). Potom je konstruirana karta gustoće CO_2 te su na ranije opisani način, iz blokova očitavane njezine vrijednosti.



Slika 4.3 - Dijagram gustoće CO_2 (VULIN 2010, korištenjem jednadžbe SPAN & WAGNER, 1996)

Koeficijent učinkovitosti skladištenja je već ranije opisan kao problematičan zbog toga što je procijenjen samo za vodonosnike SAD-a i Kanade pa je njegova primjena u Hrvatskom dijelu Panonskog bazena vrlo upitna. Međutim, u nedostatku boljeg rješenja u ovom radu je preuzet koeficijent učinkovitosti skladištenja iz doktorske disertacije KOLENKOVIĆ (2012) od 2% gdje se naglašava činjenica da je ta vrijednost za područje pješčenjaka Poljana možda precijenjena no njegova upotreba se opravdava činjenicom da se predložena metoda ionako

koristi za procjenu razlike u teoretskom kapacitetu skladištenja ugljičnoga dioksida u pojedinim područjima unutar regionalnog dubokog slanog vodonosnika pa je u tom smislu i svejedno jer je za usporedbe važnija ispravno procijenjena razlika nego apsolutna vrijednost.

4.7 Određivanje poroznosti pješčenjaka Poljana

Poroznost predstavlja problematičniji faktor za procjenu od efektivne debljine, iako ima manji utjecaj na samu procjenu. Pješčenjaci Poljana su, poput ostalih gornjomiocenskih pješčenjaka u Savskoj depresiji, heterogeni pa im se poroznost značajno mijenja u prostoru unutar jednog ležišta, čak i unutar jednog sloja. Tijekom procjene kapaciteta skladištenja CO₂ bilo bi bolje raspolagati podacima o efektivnoj poroznosti, nego o ukupnoj. Međutim, za dobivanje podataka o efektivnoj poroznosti potrebno je provesti laboratorijska mjerenja na jezgrama koja se uobičajeno provode na malom broju uzoraka, pa nije moguća kontinuirana procjena poroznosti. Radi toga se na temelju podataka geofizičkih mjerenja vrši procjena ukupne poroznosti te se kasnije eventualno mogu izračunati odstupanja u odnosu na izmjerenu efektivnu poroznost i provesti potrebne korekcije.

U doktorskoj disertaciji I. KOLENKOVIĆ (2012) interpretirani podatci poroznosti su dobiveni analizom rezultata geofizičkih mjerenja u bušotinama. Iz vrijednosti dobivenih analizom karotažnih krivulja izračunate su vrijednosti prosječne poroznosti za svaku od dvadeset bušotina i na temelju tih vrijednosti konstruirana je karta prosječne poroznosti Poljana pješčenjaka. U rubnim dijelovima vodonosnika pretpostavljena je vrijednost poroznosti od 0% s pretpostavkom da na tim mjestima pješčenjaci prelaze u lapor koji ima poroznost, ali ne efektivnu. Na konstruiranu kartu poroznosti je postavljena mreža blokova iz čijih su središta ponovno kao i kod efektivne debljine i gustoće CO₂, očitavane vrijednosti.

S obzirom na nedostatak podataka postavlja se pitanje je li ovakav pristup procjeni poroznosti ispravan? Je li moguće procijeniti poroznost pješčenjaka pomoću karte konstruirane na temelju samo dvadeset vrijednosti? Ovim radom se htio pronaći način kojim bi se mogla procijeniti poroznost, uz uvjet da se izbjegne ranije opisana nesigurna konstrukcija karte. Također, postavlja se i pitanje treba li poroznost iz svake bušotine podjednako utjecati na ukupnu procjenu? S obzirom da poroznost ovisi o mnogo faktora, između ostalog i efektivnoj debljini, bilo bi logično veći utjecaj na procjenu poroznosti dati bušotinama s većom efektivnom debljinom od onih s manjom.

Dalje u tekstu će biti prikazano pet novih pristupa vrednovanja podataka poroznosti i ostalih parametara te njihov utjecaj na ukupni kapacitet skladištenja CO₂.

4.7.1 Određivanje poroznosti i kapaciteta skladištenja pješčenjaka Poljana pomoću aritmetičke sredine

Prva mogućnost izračuna je vrlo jednostavna, ali kasnije u razmatranju će biti vrlo zanimljivo vidjeti koliko će se rezultati razlikovati u odnosu na ostale, zahtjevnije metode. Svi parametri potrebni za izračun ukupnog kapaciteta skladištenja su procijenjeni na način da je izračunata aritmetička sredina iz dostupnih bušotinskih podataka te su dobivene vrijednosti primijenjene na cijelo područje pješčenjaka Poljana. Podatci o poroznosti su bili dostupni za samo 20 bušotina, o efektivnoj debljini za 84 bušotine, dok je gustoća na srednjoj dubini određena na temelju 65 bušotina. Ukupna površina područja istraživanja je izračunata u računalnom programu AutoCAD. Dobivene vrijednosti svih parametara su uvrštene u izraz 4-1 te je dobiven ukupni kapacitet skladištenja. U prilogu 1 je prikazana karta efektivne debljine dubokog slanog vodonosnika Poljana preuzeta iz KOLENKOVIĆ (2012).

4.7.2 Određivanje poroznosti pješčenjaka Poljana pomoću težinskih prosjeka

Preostala četiri načina izračuna poroznosti za duboki slani vodonosnik Poljana temelje se na računanju težinskih prosjeka, odnosno ponderirane srednje vrijednosti. Ponderirana srednja vrijednost omogućuje da određene bušotine tj. njihove vrijednosti poroznosti više utječu na ukupnu procjenu, a neke manje. Koje bušotine će više utjecati na samu procjenu, ovisi o tome koje ćemo težinske parametre odabrati. U ovom slučaju kao težinski parametar uz poroznost odabrana je efektivna debljina pješčenjaka, što znači da će bušotine s većom efektivnom debljinom imati veći utjecaj na procjenu poroznosti od onih s manjom.

Efektivna debljina je najvažniji parametar pri procjeni kapaciteta skladištenja ugljičnog dioksida za jedinice koje karakterizira značajna promjenjivost debljine, kao što je slučaj s pješčenjacima Poljana pa je prema tome logično da poroznost iz bušotina s većom efektivnom debljinom više utječe na samu procjenu ukupne poroznosti vodonosnika, dok bušotine s manjom efektivnom debljinom utječu manje. Prema tome željelo se ispitati hoće li se i koliko kapacitet skladištenja razlikovati, ukoliko se poroznost procijeni na temelju

ponderirane srednje vrijednosti. Kako bi se odijelilo područje s većim i manjim efektivnim debljinama, područje istraživanja je potom podijeljeno na 4 ili 5 razreda te je za svaki razred izračunata ponderirana srednja vrijednost poroznosti i aritmetička sredina ostalih podataka (gustoće i efektivne debljine). Pri čemu je prilikom izračuna poroznosti bilo dostupno 20, efektivne debljine 84 i gustoće CO₂ 65 bušotinskih podataka. Površina svakog razreda je izračunata u računalnom programu AutoCAD, a za koeficijent učinkovitosti skladištenja je uzeta vrijednost od 2%. Svi parametri su uvršteni u izraz 4-1 te je izračunat ukupni kapacitet skladištenja za duboki slani vodonosnik Poljana.

Dalje u tekstu će biti opisan postupak podjele područja istraživanja na razrede, a bit će prikazane i karte efektivnih debljina te tablični izračuni kapaciteta skladištenja.

4.7.2.1 Određivanje kapaciteta skladištenja pješčenjaka Poljana podjelom područja na 4 razreda jednake širine (e=50 m)

Drugim načinom izračuna ukupnog kapaciteta skladištenja, područje pješčenjaka Poljana je podijeljeno na četiri razreda s obzirom na efektivnu debljinu, s time da je širina svih razreda jednaka i iznosi 50 m. Prema tome, prvi razred uključuje područje s efektivnom debljinom 0-50 m, drugi razred 50-100 m, treći razred 100-150 m te četvrti razred 150-200 m. Ovisno o vrijednosti efektivne debljine, bušotine su svrstavane u pojedine razrede. Za svaki razred je izračunata ponderirana srednja vrijednosti poroznosti te aritmetička sredina gustoće CO₂ i efektivne debljine pješčenjaka. Dodatkom površine i koeficijenta učinkovitosti dobiven je kapacitet skladištenja za svaki razred, a njihovim zbrojem i za cijelo područje regionalnog vodonosnika. Konstruirana je i karta efektivne debljine s ekvidistancom 50 m koja dijeli područje istraživanja na 4 razreda (prilog 2). U prilogu 6 je tablični prikaz raspodjele podataka na 4 razreda.

4.7.2.2 Određivanje kapaciteta skladištenja pješčenjaka Poljana podjelom područja na 5 razreda jednake širine ($e=40$ m)

Treći način izračuna je vrlo sličan drugom. Razlika je u tome što je ovoga puta područje pješčenjaka Poljana podijeljeno na 5 razreda s tim da je širina razreda ponovno jednaka, ali iznosi 40 m. Prema tome, prvi razred uključuje područje s efektivnom debljinom 0-40 m, drugi razred 40-80 m, treći razred 80-120 m, četvrti razred 120-160 m te peti razred 160-200 m. Ovakvom podjelom se htjelo ispitati hoće li i kako povećanje broja razreda, odnosno detaljnija podjela područja istraživanja utjecati na krajnji rezultat. Svi parametri potrebni za procjenu kapaciteta skladištenja su izračunati kao i u prethodnom slučaju. Također, konstruirana je karta efektivne debljine s ekvidistancom od 40 m koja dijeli područje istraživanja na 5 razreda (prilog 3), dok je u prilogu 7 tablični prikaz raspodjele podataka na 5 razreda.

4.7.2.3 Određivanje kapaciteta skladištenja pješčenjaka Poljana podjelom područja na 4 razreda prema vrijednosti medijana

Četvrti način izračuna dijeli područje istraživanja ponovno na 4 razreda međutim, ne uzima se ista širina razreda već se vodi računa o tome da u svakom razredu bude podjednak broj podataka. Prema tome svi podatci o efektivnoj debljini su najprije prema vrijednosti medijana podijeljeni na dva razreda. Medijan je vrijednost za koju vrijedi da je 50% podataka manje ili jednako toj vrijednosti, a 50% podataka veće ili jednako. Potom je svaki od dobivenih razreda ponovno pomoću medijana podijeljen na još dva razreda, čime su dobivena ukupno četiri razreda. Prema tome prvi razred uključuje bušotine s efektivom debljinom 0-40 m, drugi razred 40-60 m, treći razred 60-80 m i četvrti razred 80-200 m. Postupak izračuna parametara potrebnih za procjenu kapaciteta skladištenja je jednak kao i u prethodnim slučajevima. I u ovom slučaju je konstruirana karta efektivne debljine na temelju ovakve podjele podataka (prilog 4), a u prilogu 8 je tablični prikaz raspodjele podataka.

4.7.2.4 Određivanje kapaciteta skladištenja pješčenjaka Poljana podjelom područja na 5 razreda prema vrijednosti medijana

Posljednji, peti način izračuna je pak sličan prethodnom, četvrtom. Postupak podjele podataka o efektivnoj debljini u razrede je jednak kao i u prethodnom slučaju samo što je posljednji (četvrti) razred podijeljen pomoću vrijednosti medijana na još pola kako bi se smanjila širina razreda i dobila detaljnija podjela područja što pretpostavlja i kvalitetniju procjenu parametara potrebnih za izračun kapaciteta skladištenja. Prema tome prvi razred uključuje bušotine s efektivnom debljinom 0-40 m, drugi razred 40-60 m, treći razred 60-80 m, četvrti razred 80-120 m i peti razred 120-200 m. Kao i u prethodnim slučajevima konstruirana je karta efektivne debljine u skladu s ovakvom podjelom podataka (prilog 5) te tablični prikaz podataka (prilog 9).

5. Rezultati

U ovom poglavlju bit će prikazani i objašnjeni rezultati kapaciteta skladištenja izračunatih na, u prethodnom poglavlju objašnjenih, pet načina. Sve karte, osim karte efektivne debljine koja je preuzeta iz KOLENKOVIĆ (2012), su izrađene u programu CorelDraw™, a tablični prilozi i izračuni u računalnom programu Excel™. Na svakoj karti je različitim nijansama označen kapacitet skladištenja pa je tako područje najmanjeg kapaciteta označeno najsvjetlijom nijansom, a područje najvećeg kapaciteta skladištenja najtamnijom. Parametri potrebni za izračun kapaciteta skladištenja su računati na temelju dostupnih bušotinskih podataka.

5.1 Karta efektivne debljine, tablica poroznosti pješčenjaka Poljana i izračun kapaciteta skladištenja pomoću aritmetičke sredine

Karta efektivne debljine dubokog slanog vodonosnika Poljana preuzeta iz KOLENKOVIĆ (2012) prikazana je u prilogu 1. Ekvidistanca na karti je 20 m. Najveće debljine pješčenjaci Poljana dosežu u središnjem, najdubljem dijelu depresije. Debljina se smanjuje prema rubnim dijelovima, a do isklinjavaja dolazi u smjeru jugozapada i sjeveroistoka. Debljina pješčenjaka Poljana varira u širokom rasponu, od svega 20-ak m u sjevernom dijelu istraživanog područja do približno 180 m u središnjem dijelu depresije (KOLENKOVIĆ, 2012). Aritmetička sredina efektivne debljine koja je korištena u ovom načinu izračuna ukupnog kapaciteta skladištenja iznosi 68,05 m.

Bušotinski podatci poroznosti prikazani su u tablici 5.1. Aritmetička sredina poroznosti koja je potom primijenjena na cijeli regionalni vodonosnik iznosi 15,55%.

Tablica 5.1 – Bušotinski podatci poroznosti za duboki slani vodonosnik Poljana

Bušotina	Φ (%)
An-1	15
BS-1	21
D-2	21
Gos-3	14
Je-1DU	16
Lup-8	17
Obo-1	17
Od-1	14
Ok-1DU	12
PB-3 Alfa	14
Pč-2	14
Pre-2	19
Ru-3	15
Rv-1	18
Št-1JU	13
Vel-1	12
Vl-2	13
Žu-72	14
Žu-164	16
Žu-249DU	16

Za izračun kapaciteta skladištenja prema izrazu 4-1 potrebni su još podatci o gustoći CO₂ čija aritmetička sredina iznosi 466,23 kg/m³ i ukupna površina dubokog slanog vodonosnika Poljana koja iznosi 719,57 km². Uvrštavanjem navedenih podataka u izraz 4-1 dobivena je vrijednost ukupnog kapaciteta skladištenja od 71 000 561 t (tablica 5.2).

Tablica 5.2 - 1.način izračuna kapaciteta skladištenja prema srednjoj vrijednosti

1. način izračuna					
A (km ²)	h_{eff} (m)	ϕ (%)	ρ_{CO_2} (kg/m ³)	Seff	KS (t)
719,57	68,05	15,55	466,23	0,02	71.000.561

5.2 Karta efektivne debljine, tablica poroznosti pješčenjaka Poljana i izračun kapaciteta skladištenja podjelom područja na 4 razreda jednake širine (e=50 m)

Podjela područja istraživanja na 4 razreda jednake širine od 50 m prikazana je kartom efektivne debljine u prilogu 2, a dobiveni rezultati su prikazani u tablici 5.3. Razvidno je da su površine razreda različite pa tako najveću površinu ima drugi razred (291,18 km²), a najmanju površinu ima posljednji (četvrti) razred (45,57 km²). Ponderirana srednja vrijednost poroznosti je najmanja u prvom razredu (14,41%), a najveća u četvrtom (16,05%). Vrijednost gustoće CO₂ je također najmanja u prvom razredu te iznosi 428,1 kg/m³, a najveća u posljednjem razredu i iznosi 529,44 kg/m³. Kada se svakom razredu doda i koeficijent učinkovitosti skladištenja od 2% dobije se kapacitet skladištenja za svaki razred. Najmanji kapacitet skladištenja dobiven je za prvi razred koji ima i najmanju efektivnu debljinu (0-50 m) i iznosi 9 331 414 t. Međutim, najveći kapacitet skladištenja nije dobiven za razred s najvećom efektivnom debljinom već za drugi razred (efektivna debljina 50-100 m) i iznosi 27 392 182 t. Iako drugi razred nema najveću vrijednost efektivne debljine, ima najveću površinu što je rezultiralo najvećim kapacitetom skladištenja. U trećem razredu procijenjeni kapacitet iznosi 18 603 811 t, a u četvrtom razredu 13 045 059 t. Zbrojem kapaciteta skladištenja svih razreda dobiven je ukupni kapacitet za cijelo područje dubokog slanog vodonosnika Poljana koji iznosi 68 372 467 t.

Tablica 5.3 - 2.način izračuna kapaciteta skladištenja podjelom područja istraživanja na 4 razreda prema jednakoj širini

2. način izračuna						
razred	A (km ²)	h _{eff} (m)	Φ (%)	ρ _{CO2} (kg/m ³)	Seff	KS (t)
1 (0-50 m)	274,13	27,59	14,41	428,1	0,02	9.331.414
2 (50-100 m)	291,18	62,24	15,85	476,8	0,02	27.392.182
3 (100-150 m)	108,69	117,29	15,92	458,33	0,02	18.603.811
4 (150-200 m)	45,57	168,44	16,05	529,44	0,02	13.045.059
		AVG:	15,56		Σ:	68.372.467

5.3 Karta efektivne debljine, tablica poroznosti pješčenjaka Poljana i izračun kapaciteta skladištenja podjelom područja na 5 razreda jednake širine ($e=40$ m)

Ovaj način izračuna je ponudio nešto detaljniju podjelu područja istraživanja u odnosu na prethodni slučaj. Površine pojedinih razreda su dosta neujednačene pa tako najveću površinu ima drugi razred (273,57 km²), a najmanju peti razred (31,79 km²). Podjela područja istraživanja prikazana je kartom efektivne debljine u prilogu 3. Srednja ponderirana vrijednost poroznosti u prvom razredu iznosi 13,69%, drugom 15,99 %, trećem 15,53 %, četvrtom razredu 15,7%, a posljednji, peti razred ima najvećih 17%. Vrijednosti gustoće variraju od najmanjih 436 kg/m³ u trećem razredu, do najvećih 525,71 kg/m³ u petom razredu. Najmanja vrijednost kapaciteta skladištenja je ponovno dobivena za razred s najmanjim vrijednostima efektivne debljine (0-40 m) i iznosi 5 754 133 t, dok je najveća vrijednost od 24 489 576 t ponovno dobivena za razred s najvećom površinom, ali ne i najvećom efektivnom debljinom, a to je u ovom slučaju drugi razred. U trećem razredu kapacitet skladištenja iznosi 18 675 574 t, u četvrtom 13 978 212 t, a u petom 10 017 131 t. Prema tome, ukupni kapacitet skladištenja za duboki slani vodonosnik Poljana, izračunat ovim načinom, iznosi 72 914 626 t, što je više nego u prethodna dva načina izračuna. Vrijednosti parametara po razredima i kapacitet skladištenja je prikazan u tablici 5.4.

Tablica 5.4 - 3. način izračuna kapaciteta skladištenja podjelom područja istraživanja na 5 razreda prema jednakoj širini

3. način izračuna						
razred	A (km ²)	h_{eff} (m)	ϕ (%)	ρ_{CO_2} (kg/m ³)	Seff	KS (t)
1 (0-40 m)	198,24	24,17	13,69	438,61	0,02	5.754.133
2 (40-80 m)	273,57	59,03	15,99	474,2	0,02	24.489.576
3 (80-120 m)	148,08	93,13	15,53	436	0,02	18.675.574
4 (120-160 m)	67,89	131,67	15,7	498	0,02	13.978.212
5 (160-200 m)	31,79	176,29	17	525,71	0,02	10.017.131
		AVG:	15,58		Σ :	72.914.626

5.4 Karta efektivne debljine, tablica poroznosti pješčenjaka Poljana i izračun kapaciteta skladištenja podjelom područja na 4 razreda prema vrijednosti medijana

Četvrti način izračuna ukupnog kapaciteta skladištenja je ponudio veće rezultate od svih do sada prikazanih. U ovom slučaju najveću površinu ima četvrti razred (247,76 km²), a najmanju drugi razred (127,67 km²). Podjela područja istraživanja je i u ovom slučaju prikazana kartom efektivne debljine u prilogu 4. Također i vrijednosti poroznosti više variraju nego u prethodnim načinima izračuna pa tako najmanju poroznost ima prvi razred (13,69%), a najveću treći (17,63 %). Vrijednosti gustoće su ujednačene, najujednačenije u odnosu na ostale metode izračuna pa tako najmanju vrijednost ima prvi razred (438,61 kg/m³), a najveću drugi razred (483,93 kg/m³). Najmanju vrijednost kapaciteta skladištenja, kao i u prethodnom slučaju, ima prvi razred i ponovno iznosi 5 754 133 t zbog toga što su širine razreda u oba slučaja jednake (0-40 m). Vrijednost kapaciteta je očekivano najveća u posljednjem (četvrtom) razredu zbog najveće površine i najveće efektivne debljine te iznosi 52 368 386 t. Ukupni kapacitet skladištenja iznosi 83 020 087 t. Ovaj način izračuna je ponudio dosta veći kapacitet skladištenja u odnosu na ostale slučajeve, a razlog tomu treba svakako tražiti u velikoj širini i površini posljednjeg razreda koji obuhvaća područje s efektivnim debljinama od 80 do čak 200 m. U tablici 5.5 prikazane su vrijednosti parametara potrebnih za izračun kapaciteta skladištenja te kapacitet skladištenja.

Tablica 5.5 - 4. način izračuna kapaciteta skladištenja podjelom područja istraživanja na 4 razreda prema vrijednosti medijana

4. način izračuna						
razred	A (km ²)	h _{eff} (m)	ϕ (%)	ρ _{CO2} (kg/m ³)	Seff	KS (t)
1 (0-40 m)	198,24	24,17	13,69	438,61	0,02	5.754.133
2 (40-60 m)	127,67	49,4	13,87	483,93	0,02	8.466.517
3 (60-80 m)	145,9	69,16	17,63	461,82	0,02	16.431.050
4 (80-200 m)	247,76	129,91	16,88	481,94	0,02	52.368.386
		AVG:	15,52		Σ:	83.020.087

5.5 Karta efektivne debljine, tablica poroznosti pješčenjaka Poljana i izračun kapaciteta skladištenja podjelom područja na 5 razreda prema vrijednosti medijana

Posljednji način izračuna napravljen je uz detaljniju podjelu područja, na pet razreda. Ovaj način se zapravo od prethodnog razlikuje samo po tome što je posljednji razred čiji je raspon efektivnih debljina iznosio 80-200 m, podijeljen prema vrijednosti medijana na dva razreda: 80-120 m i 120-200m, što se može vidjeti na karti efektivne debljine u prilogu 5. Prva tri razreda su u potpunosti jednaka. Radi toga, posljednji razred više nema najveću površinu već najmanju (100 km^2), a prvi razred ima najveću (198 km^2). Poroznost je ponovno najmanja u prvom razredu (13,69%), a najveća u trećem razredu (17,63%). Vrijednosti gustoće variraju od najmanjih $417,5 \text{ kg/m}^3$ u četvrtom razredu do najvećih $514,17 \text{ kg/m}^3$ u petom razredu. Kapacitet skladištenja je kao i u svim prethodnim načinima izračuna najmanji u prvom razredu (5 754 133 t), a unatoč najmanjoj površini, ali zahvaljujući najvećoj efektivnoj debljini najveći u petom razredu (25 486 511 t). Ukupni kapacitet skladištenja iznosi 73 933 028 t. Izračun s parametrima po razredima je prikazan u tablici 5.6.

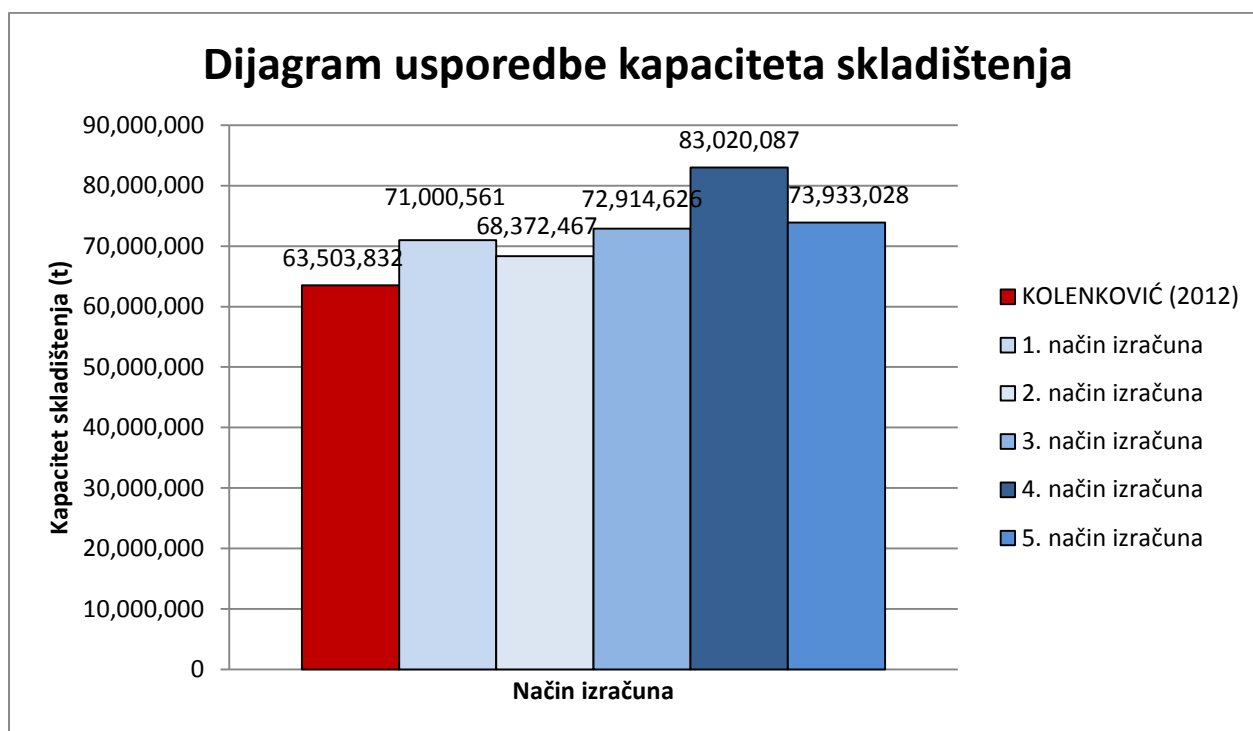
Tablica 5.6- 5. način izračuna kapaciteta skladištenja podjelom područja istraživanja na 5 razreda prema vrijednosti medijana

5. način izračuna						
razred	A (km^2)	h_{eff} (m)	ϕ (%)	ρ_{CO_2} (kg/m^3)	Seff	KS (t)
1 (0-40 m)	198,24	24,17	13,69	438,61	0,02	5.754.133
2 (40-60 m)	127,67	49,4	13,87	483,93	0,02	8.466.517
3 (60-80 m)	145,9	69,16	17,63	461,82	0,02	16.431.050
4 (80-120 m)	148,08	92,67	15,53	417,5	0,02	17.794.816
5 (120-200 m)	99,68	155,69	15,97	514,17	0,02	25.486.511
		AVG:	15,34		Σ	73.933.028

6. Diskusija

Prilikom procjene kapaciteta skladištenja ugljičnog dioksida javljaju se brojne teškoće, uglavnom vezane uz nedostatak podataka. Što se brojnosti podataka tiče, najkritičnija je poroznost. Prema tome ovim radom se ispitao drugačiji pristup vrednovanju podataka o poroznosti kako bi se izbjeglo nesigurno konstruiranje karte poroznosti na temelju samo dvadeset bušotina. Zbog toga su računati težinski postotci kako bi se bušotinama s većom efektivnom debljinom dao veći utjecaj na procjenu, od onih s manjom. Također, htjela se pojednostaviti sama procjena kapaciteta skladištenja kako bi se uštedjelo vrijeme potrebno za očitavanje parametara iz središta blokova kako je to učinjeno u prijašnjim radovima PEREŠIN (2011); KOLENKOVIĆ (2012). S time da je trebalo voditi računa i o kvaliteti rezultata, odnosno o tome da pojednostavnjenje ne uzrokuje precjenjivanje kapaciteta skladištenja. Treba imati na umu da je procjena kapaciteta skladištenja na ovoj razini samo orijentacijskog karaktera zbog prevelikih nesigurnosti podataka pa se i tako dobivene vrijednosti kapaciteta skladištenja mogu koristiti samo u smislu usmjeravanja istraživanja od regionalnih k lokalnim.

Prema tome na slici 6.1, konstruiran je dijagram kapaciteta skladištenja u kojemu su prikazane ukupne vrijednosti kapaciteta skladištenja u Dubokom slanom vodonosniku Poljana dobivenih u ovom radu (za svih pet načina izračuna označenih u nijansama plave boje pri čemu je najmanji kapacitet označen najsvjetlijom nijansom, a najveći najtamnijom), a posebno (crvenom bojom) je istaknuta vrijednost kapaciteta iz doktorske disertacije I. KOLENKOVIĆ (2012) koja iznosi 63 503 832 t. Naime ta vrijednost se uzima kao referentna zbog toga što je način procjene vrlo detaljan i uključuje ranije objašnjenu diskretizaciju područja pomoću blokova pa je cilj ovog rada bio dobiti što bližu vrijednost kapaciteta skladištenja toj vrijednosti.



Slika 6.1 Dijagram usporedbe kapaciteta skladištenja

Dijagram na slici 6.1 pokazuje da je referentna vrijednost od 63 503 832 t najmanja u odnosu na ostale. Ostali rezultati ukazuju na odstupanja od 10-14 %. Najveća odstupanja su zabilježena u četvrtom i petom slučaju u kojima je područje istraživanja podijeljeno prema vrijednosti medijana na četiri, odnosno pet razreda. Prema tome u podjeli na četiri razreda odstupanje iznosi 13,09 %, a u podjeli na pet razreda 11,64 %. Valja uočiti da unatoč precijenjenim kapacitetima skladištenja u oba slučaja ipak je detaljnija podjela (na pet razreda) rezultirala boljom procjenom. Nadalje, drugi i treći način izračuna su uključivali podjelu područja regionalnog vodonosnika prema istoj širini razreda pri čemu se dobio pomalo neočekivan rezultat. Naime očekivano je da će detaljnija podjela s većim brojem razreda dati manje vrijednosti kapaciteta skladištenja, ali to se nije dogodilo. U podjeli na pet razreda rezultat je precijenjen za 11,48 % u odnosu na referentnu vrijednost, dok je podjela na četiri razreda precijenjena za najmanjih 10,77 %. Treba napomenuti da je prilikom podjele na pet razreda nezgodno to što je u posljednjem, petom razredu samo jedna bušotina s vrijednosti poroznosti. U prilogima 6, 7, 8 i 9 je prikazana distribucija bušotinskih podataka prema razredima s vrijednostima efektivnih debljina i gustoće, a u prilogu 10 je prikazana distribucija podataka poroznosti po razredima s pripadajućim efektivnim debljinama i ponderiranom srednjom vrijednosti poroznosti za svaki razred. U prilogu 10 razredi efektivnih debljina prema kojima je podijeljeno područje istraživanja su obojani svjetlijim ili tamnijim

nijansama ovisno o kapacitetu skladištenja pa najsvjetlija nijansa označava najmanji kapacitet skladištenja, a najtamnija najveći. U svim načinima izračuna, najmanji kapacitet skladištenja je dobiven u razredu s najmanjom efektivnom debljinom u kojima su ujedno i ponderirane srednje vrijednosti poroznosti najmanje. Međutim najveći kapaciteti nisu uvijek dobiveni u razredima s najvećom efektivnom debljinom što se osim u prilogu 10 može vidjeti i na kartama efektivnih debljina u prilogima 2, 3, 4 i 5. Razlog tomu je u površini razreda. Ukoliko je površina razreda veća od najveće vrijednosti efektivne debljine, tada ona ima veći utjecaj na procjenu.

Vrlo zanimljiv rezultat dobiven je prvim načinom izračuna koji je ujedno bio i najjednostavniji zbog toga što područje regionalnog vodonosnika nije dijeljeno u razrede već je razmatrano kao cjelina. Dobiveni rezultat od 71 000 561 t je precijenjen za samo 11,18 % u odnosu na referentnu vrijednost.

7. Zaključak

Pristup procjeni kapaciteta primijenjen u ovom radu može se, s obzirom na dobivene rezultate, smatrati zadovoljavajućim. Područje istraživanja je dijeljeno u razrede prema približno jednakom broju podataka u svakom razredu te prema jednakoj širini razreda. Unatoč precjenjivanju kapaciteta skladištenja u svim slučajevima, prednost prilikom podjele područja istraživanja može se dati podjeli prema jednakoj širini razreda zbog toga što su u tom slučaju dobiveni manje precijenjeni rezultati. Najveći kapacitet skladištenja (precijenjen za 13,07 %) je dobiven podjelom područja na 4 razreda prema vrijednosti medijana što se može pripisati preširokom posljednjem, četvrtom razredu koji je uključivao područje efektivne debljine od 80 do 200 m. Budući da je namjera ovog rada bila pronaći najjednostavniji način procjene s prihvatljivim odstupanjem krajnjeg rezultata kapaciteta skladištenja, kao najbolju mogućnost izračuna treba izdvojiti prvi način u kojemu se područje istraživanja nije dijelilo na razrede i u kojemu je računata samo aritmetička sredina, a ne ponderirana vrijednost srednje poroznosti, a odstupanje je u konačnici iznosilo 11,18 %.

Prikazani pojednostavljeni načini izračuna uvelike pridonose uštedi vremena potrebnog za izračun ukupnog kapaciteta skladištenja, što je od velikog značaja ukoliko se želi obraditi veći broj jedinica, a ipak ne odstupaju previše te daju zadovoljavajuće procjene ukupnog teoretskog kapaciteta skladištenja.

8. Literatura

8.1 Objavljeni radovi

- BACHU, S. (2000): Sequestration of CO₂ in geological media: criteria and approach for site selection in response to climate change. *Energy Conversion and Management*, 41, 953-970.
- BACHU, S., BONIJOLY, D., BRADSHAW, J., BURRUSS, R., HOLLOWAY, S., CHRISTENSEN, N. P., MATHIASSEN, O. M., (2007): CO₂ storage capacity estimation: Methodology and gaps. *International journal of greenhouse gas control*, 1, 2007, str. 430-443.
- BRADSHAW, J., BACHU, S., BONIJOLY, D., BURRUSS, R., HOLLOWAY, S., CHRISTENSEN, N.P. & MATHIASSEN, O.M. (2007): CO₂ storage capacity estimation: Issues and development of standards. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, I, 62-68.
- BUCKOVIĆ, D. (2006): Historijska geologija II. E-knjiga, Sveučilište u Zagrebu Prirodoslovno-matematički fakultet, 96-101.
- CSLF, Carbon Sequestration Leadership Forum , 2007. Phase II Final Report from the Task Force for Review and Identification of Standards for CO₂ Storage Capacity Estimation (<http://www.cslforum.org/publications/documents/PhaseIIReportStorageCapacityMeasurementTaskForce.pdf>)
- CVETKOVIĆ, M. (2013): Naftogeološki potencijal i litostratigrafska razradba trećega neogensko-kvartarnoga megaciklusa u Savskoj depresiji. Disertacija, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 175 str.
- DOMITROVIĆ, D., ŠUNJERGA, S., GORIČNIK, B. & VULIN, D (2005): Simulation Study of CO₂ Retention During Tertiary EOR Flood in Ivanić Oilfield, EAGE 67th Conference & Exhibition — Madrid, Spain, 13 - 16 June 2005.
- EKONERG – Institut za energetiku i zaštitu okoliša (2007): Prijedlog Nacionalne strategije za provedbu Okvirne konvencije Ujedinjenih Naroda o promjeni klime (UNFCCC) i Kyotskog protokola u Republici Hrvatskoj s planom djelovanja, 90 str., Zagreb.
- EU GEOCAPACITY (2009): Assessing European Capacity for Geological Storage of Carbon Dioxide, Final Report, Geological Survey of Denmark and Greenland.

- IPCC (2005): IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Metz, B., Davidson, O. de Coninck, H.C., Loos, M. & Meyer, L.A. (ur.). CambridgeUniversity Press, Cambridge, UK.
- KOLENKOVIĆ, I. (2012): Mogućnosti za geološko skladištenje ugljičnoga dioksida u gornjomiocenskim pješčenjacima zapadnog dijela Savske depresije. Disertacija, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 130 str.
- LUČIĆ, D., SAFTIĆ, B., KRIZMANIĆ, K., PRELOGOVIĆ, E., BRITVIĆ, V., MESIĆ, I., TADEJ, J. (2001): The Neogene evolution and hydrocarbon potential of the Pannonian Basin in Croatia, *Marine and Petroleum Geology*, 18, 133-147.
- PAMIĆ, J. (1997): Vulkanske stijene Savsko-dravskog međuriječja i Baranje (Hrvatska). Nafta, posebno izdanje, Zagreb.
- PAVELIĆ, D. (2001): Tectonostratigraphic model for the North Croatian and North Bosnian sector of the Miocene Pannonian Basin System. *Basin Research*, 12, 359-376.
- PEREŠIN, D. (2011): Regionalna procjena kapaciteta skladištenja ugljičnog dioksida u gornjomiocenskim pješčenjacima zapadnog dijela Savske depresije. Diplomski rad, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 34. str.
- PRELOGOVIĆ, E., SAFTIĆ, B., KUK, V., VELIĆ, J., DRAGAŠ, M. & LUČIĆ, D. (1998): Tectonic activity in the Croatian part of the Pannonian basin. *Tectonophysics*, 297, 283-293.
- SAFTIĆ, B. (1998): Genetska stratigrafska sekvencijska snaliza pontskih naslaga u zapadnom dijelu Savske depresije. Disertacija, RGN fakultet i PMF Sveučilišta u Zagrebu, 136 str.
- SAFTIĆ, B., VELIĆ, J., SZTANÓ, O., JUHÁSZ, GY. & IVKOVIĆ, Ž. (2003): Tertiary subsurface facies, source rocks and hydrocarbon reservoirs in the SW part of the Pannonian Basin (northern Croatia and south-western Hungary). *Geologia Croatica*, 56/1, 102-122.
- SAFTIĆ, B., KOLENKOVIĆ, I., VULIN, D. (2008): Putting carbon dioxide back in the subsurface - possibilities in Croatia.- U: Franković, B. (ur.): *Energija i okoliš 2008/*Energy and Environment 2008., Hrvatski savez za sunčevu energiju, 79-88.
- SAFTIĆ, B., KOLENKOVIĆ, I. (2008): Zaštita atmosfere geološkim skladištenjem ugljikovog dioksida. *Znanstveno-stručni skup "Tehnologije zaštite zraka"*, *Zbornik radova*, Vasić-Rački, Đ. (ur.), Akademija tehničkih znanosti Hrvatske, Zagreb, 103-107.

- STEVENS, S.H., PERCE, J.M. ,& RIGG, A.A.J. (2001): Natural Analogs for Geologic Storage of CO₂: An Integrated Research Program. Proceedings of First National Conference on Carbon Sequestration, 12 str., Alexandria.
- ŠIMON, J. (1980): Prilog stratigrafiji u taložnom sustavu pješčanih rezervoara Sava-grupe naslaga mlađeg tercijara u Panonskom bazenu sjeverne Hrvatske. Disertacija, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 66 str.
- U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy (2007): Sequestration Atlas of the United States and Canada, 86 str.
- U.S. Department of Energy, Office of Fossil Energy (2010): Sequestration Atlas of the United States and Canada, 3rd edition, 160 str.

8.2 Web izvori

www.co2crc.com.au/ - 26.5.2015., 14:00 h

www.co2geonet.com - 15.5.2015., 10:00 h

<http://earthobservatory.nasa.gov/> - 17.5.2015., 11:00 h

PRILOZI