



Serfőző Kálmán

A SZÉN-DIOXID GEOLÓGIAI TÁROLÁS KÖRNYEZETBIZTONSÁGI KOCKÁZATAI

Absztrakt

A föld klímaváltozása vitathatatlan. Az ipari tevékenységből fakadó üvegház hatású gázok kibocsátásának mértéke az elmúlt évszázadban bizonyítottan megnőtt, a kutatások szerint ez nagymértékben hozzájárul a légkör hőmérséklet emelkedéséhez. A szerző ebben a cikkben a szén-dioxid kibocsátás csökkentésének lehetőségeit vizsgálja, különös tekintettel az úgynevezett szén-dioxid lánc (CO₂ leválasztás és tárolás) magyarországi alkalmazhatóságának lehetőségeire. Korábban bekövetkezett nemzetközi és hazai káresemények segítségével világít rá a szén-dioxid gáz geológiai tárolásának környezetbiztonsági kockázataira.

Kulcsszavak: Klímaváltozás, szén-dioxid kibocsátás, CCS technológia, környezetbiztonság

ENVIRONMENTAL RISKS OF GEOLOGICAL STORAGE OF CARBON DIOXIDE

Abstract

Earth's climate change is indisputable. Greenhouse gas emissions from industrial activities have been shown to increase in the last century, with research showing that this contributes greatly to rising atmospheric temperatures. In this article, the author examines the possibilities of reducing carbon dioxide emissions, with special regard to the possibilities of applying the so-called carbon dioxide chain (CO₂ capture and storage) in Hungary. It sheds light on the environmental safety risks of the geological storage of carbon dioxide through past international and domestic damage events.

Keywords: Climate change, carbon emission, CCS technology, environmental safety



1. BEVEZETÉS

Bolygónk éghajlata a földtörténet során már többször változott, ezt az Antarktisz jegéből vett minták is igazolják. Azonban itt nem csak az emberi mértékkel beláthatatlannak tűnő évmilliókkal ezelőtt bekövetkezett jégkorszakokra, vagy az éghajlati övek elmozdulására kell gondolnunk. Még néhány ezer évvel ezelőtt, sőt napjainkhoz képest néhány száz évvel korábban is bekövetkeztek olyan időjárásváltozások a Földön, amelyek jelentős befolyással bírtak az emberiségre. [1]

Az éghajlatváltozás okait és hatásait kutató tudósok, valamint szervezetek eredményei alapján megállapíthatjuk, hogy a Föld hőmérsékletének változása az emberiség nélkül is bekövetkezne. Kétségtelen azonban, hogy az elmúlt évtizedek hőmérsékletnövekedéséhez a XX. század ipari tevékenységéből fakadó levegőszennyezés jelentős mértékben hozzájárult. Ennek fő okát az üvegházhatású gázok fokozottabb kibocsátásának tudhatjuk be, különös tekintettel a légköri szén-dioxid (CO₂) koncentráció növekedésének. Ezen összefüggés arra ösztönözte a világ politikai vezetőit, kutatóit és civil szervezeteit, hogy hatékony eszközöket keressenek a levegőszennyezés csökkentése céljából.

Jelen kézirat célja a rendelkezésre álló szakirodalmak segítségével elemezni a szén-dioxid hatását a klímaváltozásra, az Európai Unió és hazai jogalkotási lépéseket ismertetni. A CO₂ kibocsátás csökkentési lehetőségeinek elemzése után részletesen bemutatni a „szén-dioxid lánc” hazai alkalmazhatóságát, kulcsfontosságú kérdésként taglalom a geológiai tárolás környezetbiztonsági kockázatait.

2. A SZÉN-DIOXID LEVÁLASZTÁSÁNAK ÉS TÁROLÁSÁNAK KÖRNYEZETVÉDELMI JELENTŐSÉGE

Levegőszennyezésről abban az esetben beszélhetünk, ha a légtérben a természetes alkotóelemektől eltérő egyéb vegyületek (szennyező anyagok) is jelen vannak, vagy a levegőt alkotó természetes elemek aránya eltér a megszokottól. [2]



Az ipari forradalom óta a szén-dioxid légköri koncentrációja majdnem az 1,40 szeresére emelkedett. [3] Amennyiben az előző évtizedekhez hasonló mértékű szén-dioxid kibocsátást fog eredményezni az emberiség ipari tevékenysége a következő években, úgy az akár egyes becslések szerint 5 °C átlaghőmérséklet növekedést is eredményezhet. [4]

Szén-dioxid egyrészt természetes okokból az óceánokból, vulkáni tevékenységekből, erdőtüzekből, valamint a széntartalmú szerves anyagok bomlásából szabadul fel. Másrészt elmondhatjuk, hogy az emberi tevékenységből fakadó CO₂ kibocsátás fő oka a népességnövekedés mellett a termelési és fogyasztási teljesítmény emelkedése. [5] Így antropogén okból főként a fosszilis üzemanyagok felhasználása, valamint a mezőgazdasági tevékenységünk miatt kerül szén-dioxid a légkörbe. A kibocsátás okából adódóan a fő források a gazdaságilag fejlett térségekben (Ázsia csendes-óceáni térségében, az Egyesült Államokban, Nyugat-Európában) találhatóak meg. [2] Talán érdemes megemlítenünk, hogy Magyarország a 2007. évi adatok alapján nem részese az ötven legnagyobb szén-dioxid kibocsátó országnak. [6] Szükséges ehhez az információhoz azonban egyből hozzátennünk, hogy a klímaváltozás olyan globális jellegű probléma, amely a Föld minden országát, annak minden lakóját érinti. Különösen igaznak érezhetjük az előbbi kijelentést, ha megvizsgáljuk az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület (IPPC) 2007-ben kiadott jelentését. A tanulmány szerint az éghajlatváltozás miatt mediterrán éghajlati hatás léphet fel Magyarországon, amely okán rendszeres aszály alakulhat ki az ország egyes részein, ugyanakkor az egyenlőtlen csapadékeloszlás miatt nagyobb eséllyel alakulhatnak ki árvizek is. [7]

2.1. Jogszabályi törekvések a szén-dioxid kibocsátás káros hatásainak csökkentésére

A klímaváltozás negatív hatásait a nemzetközi és hazai jogalkotó szervek is felismerték. Ennek hatására születtek meg a különböző irányelvek, ajánlások és jogszabályok, melyek célja a környezetkárosítás megelőzése, a klímasemleges gazdaság megteremtésének elősegítése. Az Európai Parlament és a Tanács 2008-ban adott ki irányelvét a Környezetszennyezés integrált megelőzéséről és csökkentéséről, amelynek célja a lehető legnagyobb mértékben megelőzni a levegőbe, vízbe vagy a talajba történő anyag, rezgés, hő, zaj közvetlen vagy közvetett kibocsátását. Az irányelv többek között az energiaipari, a fémipari, a vegyipari, és az ásványipari technológiákat üzemeltetők számára határoz meg előírásokat. Alapvető elvárás az



üzemeltetőktől a környezetvédelmi szempontok figyelembevétele, az elérhető legjobb technikák alkalmazása, a jelentős mértékű környezetszennyezés, illetve balesetek elkerülése, azok következményeinek korlátozása. Az irányelv rendelkezik az előbb említett létesítmények működésének engedélyeztetési kérdéseiről, a határokon áttérjedő hatások kezeléséről. [8]

2010-ben kiadásra került az Európai Parlament és a Tanács ipari kibocsátásokról szóló irányelve, mivel több környezetvédelmi előírás – többek között az előbbieken említett integrált megelőzésről és csökkentésről szóló irányelvi is – alapvető módosításokra szorult.

A szabályozás a „szennyező fizet” elvével, illetve a megelőzés fontosságával összhangban kívánja a főbb ipari tevékenységek általános kereteit szabályozni. Így a dokumentumban még nagyobb hangsúlyt kapnak az engedélyeztetési kérdések, az elérhető legjobb technikák alkalmazása, valamint a hatósági ellenőrzések fontossága. Kiemelten kerül említésre még az energiahatékonyság és a balesetmegelőzés. [9]

Az éghajlatváltozás kérdésére cselekvési prioritásként tekint az EU, *„ezen a területen a cél az üvegházhatást okozó gázok kibocsátásának olyan szintre történő csökkentése, amely mesterségesen nem befolyásolja a Föld éghajlatát”*. [10] A szén-dioxid kibocsátás szabályozásával kapcsolatban az egyik legfontosabb jogforrás Az Európai Parlament és a Tanács 2008/87EK Irányelve az üvegházhatást okozó gázok kibocsátási egységei Közösségen belüli kereskedelmi rendszerének létrehozásáról. Az eljárás célja a kibocsátás csökkentésének érdekében az üvegházhatású gázok kibocsátási egységeinek kereskedelmének szabályozása. A tagállamok feladata annak biztosítása, hogy az egyes tevékenységeket végző üzemeltetők rendelkezzenek üvegházhatású gáz kibocsátására vonatkozó engedéllyel, illetve nyomon kövessék és jelentsék az e tevékenységek esetében megjelölt üvegházhatású gázok kibocsátását. Az irányelv kiemelten foglalkozik a nagyobb energiahatékonyságú technológiák alkalmazásának támogatásával, ösztönzi a kapcsolt hő- és villamosenergia-termelési technológia alkalmazását.[11]

A harmadik legnagyobb szén-dioxid-kibocsátóként a világon az EU a károsanyagkibocsátás csökkentése céljából 2005-ben létrehozta a kibocsátás-kereskedelmi (ETS) rendszert, amely meghatároz egy szén-dioxid kibocsátási küszöböt, amely segítségével a kibocsátó gazdálkodó szervezetek csak szén-dioxid kvóta ellenében végezhetik szennyező tevékenységüket. Az EU



fokozatosan fogja csökkenteni a vásárolható kvótákat is, valamint lejjebb kívánja szállítani a CO₂ kibocsátási küszöböt is. [12]

Az Európai Parlament és a Tanács irányelve kimondja, hogy a környezet egészének védelme érdekében különösen fontos, hogy a kibocsátás elleni küzdelem a szennyezés forrásánál valósuljon meg. Mindemellett előírás, hogy már tagállami szinten szükséges azonosítani és végrehajtani a levegőt szennyező források kibocsátás csökkentését célzó intézkedéseket. [13]

Ezen szabályozással is összhangban Hazánkban megszületett a 2020. évi XLIV. törvény a Klímavédelemről, melyben a Kormány felkérést kap klímavédelmi és klímaalkalmazkodási intézkedések megvalósítására, valamint a törvény kimondja, hogy az 1990. évhez képest Magyarország az üvegházhatású gázok kibocsátását legalább 40%-kal csökkenti 2030-ig. [14] Szükséges megemlítenünk a Környezet védelmének általános szabályairól szóló 1995. évi LIII. törvényt is, amely jogszabály kimondja, hogy a levegőt védeni szükséges minden olyan mesterséges hatástól, amely azt veszélyezteti, vagy egészségkárosító módon terheli, illetve a tevékenységek tervezésekor törekedni kell a légszennyező anyagok kibocsátásának lehető legkisebb mértékére. [15]

3. A SZÉN-DIOXID LEVÁLASZTÁSÁNAK ÉS TÁROLÁSÁNAK LEHETŐSÉGEI MAGYARORSZÁGON

3.1. A szén-dioxid kibocsátás csökkentésének lehetőségei

Mint ahogy azt már korábban is megállapítottuk, az üvegházhatású gázok antropogén kibocsátásának módja a fosszilis energiahordozók felhasználása: villamosenergia-, és hőtermelés (erőművek), ipari tevékenység (vegyipar, üzemanyaggyártás stb.), a közlekedési szektor (szállítás), valamint a lakossági energiafelhasználás. Mint vonali kibocsátás, a közlekedési szektorból származó levegőszennyezés jelentős mértékű. A kibocsátás csökkentését szolgáló megoldások lehetnek a különböző hibrid, elektromos, esetleg hidrogén meghajtású szállító eszközök használata. Pontszerű kibocsátóknak tekinthetjük az ipari és lakossági (elsősorban a lakóházak fűtése) kibocsátókat. A lakossági fűtésből származó CO₂ kibocsátás csökkentésélsősorban takarékossgal, illetve fűtési rendszer korszerűsítéssel,



hatékonyságfokozással érhetjük el. Jelen kézirat témájából adódóan a legfontosabb szennyezők az erőművek és az egyéb ipari tevékenységet végző üzemek, melyek CO₂ kibocsátásának mértéke elsősorban a felhasznált tüzelőanyag minőségével függ össze. A földgázt felhasználó erőművek emisszióját tekinthetjük a legkedvezőbbnek, a fűtőolaj alapú már kedvezőtlenebb. A legnagyobb CO₂ kibocsátónak pedig a hagyományos széntüzelésű erőművek tekinthetők. Ezek száma napjainkban a világon jelentősen lecsökkent. [16]

A klímaváltozás elleni harc a jövő egyik legnagyobb kihívása. Ebben a harcban az egyik leghatékonyabb eszközünk az energiafelhasználás olyan módja, amely a lehető legkisebb szén-dioxid kibocsátással jár. [17]

A szén-dioxid kibocsátás mértéke alapvetően hatékonyabb energiafelhasználás segítségével, megújuló alapú energiaforrások felhasználásával, illetve csővégi hulladékkezelési technikák alkalmazásával csökkenthető [18]. Valamint szükséges megemlítenünk a nukleáris energia felhasználási lehetőségét is.

Megállapíthatjuk, hogy mind a közlekedésből, mind pedig a lakosság tevékenységéből származó szén-dioxid kibocsátás csökkentésére bizonyos mértékben alkalmas lehet a hatékonyabb energiafelhasználás, illetve a megújuló energiaforrások alkalmazása. Az úgynevezett csővégi hulladékkezelési technika azonban csak az ipari kibocsátók esetén értelmezhető. Ezen technológiák esetén szintén hatékony kibocsátás csökkentő módszerek lehetnek:

- „a szén-dioxidmentes (nukleáris és megújuló) primerenergia részarányának növelése,
- a fosszilis tüzelőanyagú erőműveken belül a tüzelőanyag-szerkezet eltolása a kisebb fajlagos szén-dioxid termelésű tüzelőanyagok felé,
- fosszilis tüzelőanyagú erőművek hatásfokának javítása”. [17]

Az üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésének céljából megkülönböztethetünk olyan rövidtávon bevezethető lehetőségeket, amelyek technológia feltételei napjainkban is adottak, alkalmazásuk elhatározás és anyagi ráfordítás kérdése. Az egyik ilyen legalapvetőbb módszer az erőművi hatásfokjavítás, ahol a ma üzemelő technológiáknál korszerűbb blokkok alkalmazásával jelentős emissziócsökkentés lenne elérhető. Ehhez azonban szinte az összes hazai erőművi technológiát le kellene cserélni, amely könnyen beláthatóan irreális költséget



jelentene. Szintén rendelkezésre álló technológiai megoldás a szén vagy lignit üzemanyag helyett a földgáz alkalmazása. Ez szintén jobb hatásfokot eredményezne, azonban ez sem tekinthető a legjobb megoldásnak mivel a világ (és köztük Magyarország) szénhidrogén készletei végesek, illetve jelentős az iparon kívüli igény ezen energiahordozókra a közlekedés és a kifizasztók terén is. [17] Napjainkban kézenfekvő lehet a nukleáris energia melynek használata estén a szén-dioxid kibocsátás gyakorlatilag nulla, viszont a politikai, társadalmi elfogadottsága már több kérdést vet fel, talán nem teljes mértékben megalapozottan. Szintén elérhetőek napjainkban már további megújuló energiaforrások úgy, mint a vízenergia, a geotermikus energia, a napenergia vagy a biomasszából származó energia használata. Ezen energiaforrások használat minden előnyükkel és hátrányukkal együtt akár lehetséges alternatívák lehetnek az üvegházhatású gázok csökkentése céljából, terjedelmi korlátok miatt azonban ezekre részletesen nem kívánok kitérni.

Hosszú távú károsanyag kibocsátás csökkentési lehetőségek lehetnek az atomerőművi blokkok jelenleginél jobb anyaghasznosítással, a fúziós nukleáris energia használata, vagy a napenergia hatékonyabb felhasználása. A fosszilis tüzelőanyagok felhasználása után történő szén-dioxid leválasztás és geológiai tárolás szintén ebbe a kategóriába tartozhat. Az eljárás egyes elemei rendelkezésre állnak, azonban még több részletkérdés tervezők, kutatók általi megválaszolása szükséges. Ezt a lehetőséget inkább középtávon alkalmazhatónak tekinthetjük és elmondhatjuk, hogy reális hosszútávú lehetőségként a nukleáris, a megújuló energiák, valamint a fosszilis üzemanyagok közös használatát tekinthetjük ésszerű megoldásnak, természetesen az utóbbiak esetén a megfelelő CO₂ leválasztási technológia alkalmazása mellett. [17]

3.2. Szén-dioxid leválasztási technológiák ismertetése

Az úgynevezett CCS lánc (Carbon Capture, transport and Storage) a szén-dioxid leválasztását, szállítását majd végleges tárolását foglalja magába. A mai technológiai ismereteinek alapján megállapíthatjuk, hogy csak nagy mennyiségben jelenlévő szén-dioxid esetén elfogadható mértékű a technológia alkalmazásának költsége, így főként az erőművi kibocsátások esetén lehet igazán hatékony ezen technológia használata. Első lépésként az erőművi folyamatok során a szén-dioxid gáz kibocsátásának csökkentése céljából már a tüzelőanyagból, vagy a felhasználás után keletkező füstgázból kivonják a CO₂-t. Ezután a nagynyomásra felkomprimált gázt a kiválasztott szállítási módon a végleges tárolási helyére juttatják, ahol a földalatti tároló



rétegekbe beszajtolják. A CCS technológiáról elmondható, hogy a leválasztási folyamat, majd a gáz nagynyomásra történő komprimálása jelentősen növelheti az adott technológiai rendszer fajlagos költségeit, az erőmű hatásfoka csökkenhet. Azonban károsanyag kibocsátás szempontjából igen kedvező eljárás, további fejlesztések, illetve alkalmazásának nagyobb elterjedése esetén a világ villamosenergia termelés miatti szén-dioxid kibocsátása jelentősen csökkenhet. [16] Napjainkban alapvetően három különböző leválasztási technológiát különböztetünk meg, melyeket az alábbiakban kívánok ismertetni.

A tüzelés utáni („post-combustion”) leválasztási technológia előnye, hogy alkalmazható a már üzemelő erőművi technológiák, illetve újonnan épített erőművek esetén is. Ennek megfelelően ezen eljárás elterjedésére van a legnagyobb esély. A technológia alkalmazásakor a kazántüzelés után a kilépő füstgázból történik meg a szén-dioxid kivonása, majd pedig leválasztása. A szeparálás történhet kémiai oldószerekkel (jelenleg főleg aminok vagy ammónia alkalmazásával), ahol hűtés után a füstgázt folyékony abszorbenssel ellenáramban érintkeztetik. A reaktorban az oldószer megköti a füstgáz szén-dioxid tartalmának jelentős részét, majd immár a CO₂ szegény füstgáz és a szén-dioxid dús oldószer külön-külön távozik. Az oldószer melegítés után regenerátorba kerül, ahol gőz segítségével megtörténik a szén-dioxid és az oldószer kötésének felbontása. A folyamatban szilárd halmazállapotú anyagok (aktív szén, kristályos zeolitok) is alkalmasak a CO₂ leválasztására, a folyamat lépései megegyeznek a kémiai oldószeres eljárással. A megkötési kapacitásuk és szelektivitásuk miatt azonban nem versenyképesek a kémiai oldószerekkel szemben ebben az eljárásban. A szétválasztás történhet úgynevezett kriogén desztillációval is, amely esetben a gázok többlépcsős komprimálása, hűtése majd expandálása után van lehetőség a szeparálásra. Felmerülhet még a vegyiparban általánosan használt membrános szétválasztási eljárás is, azonban erőművi használata esetén hatásfoka nem éri el az előzőekben ismertetett technológiai folyamatok eredményességét. [17]

A tüzelés előtti („pre-combustion”) leválasztási technológia esetén a tüzelőanyag átalakításával, például szénelgázosítás után képződött CO₂ leválasztás már a tüzelőanyag felhasználása előtt megtörténik. [17]

Az úgynevezett „oxyfuel tüzelés” eljárás esetén a tüzelőanyagot nagyon magas hőmérsékleten tiszta oxigén vagy levegő segítségével égetik el. A kilépő füstgáz főleg szén-dioxidot, oxigént és vízgőzt tartalmaz. Az eljárás nagy előnye, hogy CO₂ egyszerűen és hatékonyan kivonható, mivel a leválasztás gyakorlatilag a füstgáz vízgőztartalmának kondenzálása. Ennek leválasztási



foka 100%, berendezési igény és költség tekintetében pedig rendkívül kedvező. Az eljárás előnye, még, hogy az SO_2 és az NO_x kibocsátás is óriási mértékben csökken. Az erőművi hatásfokra gyakorolt hatás szempontjából viszont a technológia nagy hátránya, hogy a magas hőmérséklet miatt teljesen új kazánkonstrukciót igényel az eljárás, valamint, hogy a többlet energiaigény nagyon magas a levegő szeparátor egység energiafelhasználása miatt. [17]

3.3. Szén-dioxid geológiai tárolásának lehetőségei Magyarországon

A leválasztás után eltárolni kívánt szén-dioxid gázt el kell juttatnunk a végleges besajtolás helyére. A szállítás módjára több lehetőség is rendelkezésre áll, ezek mindegyike különböző előnyökkel és hátrányokkal bír. A szállított közeg nyomásának és hőmérsékletének függvényében alapvetően gáz vagy folyadék halmazállapotban van lehetőség a szállításra. Ez pedig csővezetéken, közúti tartálykocsikkal vagy pedig hajóval történhet meg. Hazánkban a szén-dioxid tartályhajón történő szállításáról értelemszerűen nem szükséges beszélnünk, költséghatékonysági okokból a közúti tartálykocsis szállítás szintén nem ésszerű alternatíva a CCS lánc esetén. Más technológiák üzemeltetési tapasztalataira alapozva azonban egyértelműen kijelenthetjük, hogy a csővezetéki szállítás lehet a CO_2 végleges elhelyezésének leghatékonyabb módja. A szállítás ezen módja alapjaiban hasonló a cseppfolyós anyagokéhoz (szénhidrogének, egyéb veszélyes anyagok), azonban talán még nagyobb jelentőséggel bír a csővezeték korrózióállósága, valamint a szállított közeg nedvességmentesítése. Csővezetéki szállítás esetén lényeges energia-, és így költség igényű folyamat a gáz megfelelő magas nyomásra történő komprimálása, melyet célszerű a leválasztás helyén megtenni. Elengedhetetlen feltétel a megfelelő csővezetéki infrastruktúra kiépítése, melynek költségei a tervezett nyomvonalától nagyban függenek.

A terepviszonyok, a lakott és védett területeken kiépítendő nyomvonalak jelentős többletköltségeket okozhatnak a szigorúbb műszaki biztonsági előírások miatt. [17]

Az ipari tevékenység során képződő szén-dioxid nagy mennyisége miatt a más ipari szektoroknak (vegyipar, élelmiszeripar) történő további értékesítése nem reális lehetőség, így a valós alternatíva a végleges elhelyezés. Ez történhet egyrészt az óceánokba, illetve további lehetőségként földalatti rétegekbe, úgy, mint például letermelt olaj- és gázmezőkbe, művelésre alkalmatlan széntelepekbe, valamint ún. sósvízes rezervoárokba. [16]



A nagy tárolókapacitás, illetve a hosszú visszatartási idő miatt az óceánok mélyére történő CO₂ tárolás reális lehetőséget jelenthet, azonban ezen eljárás megítélése nem egységes, mivel nem tisztázott a víz kémhatás-változásának életformákra gyakorolt hatása. Ennek ellenére a nemzetközi jog engedélyezi ezen lehetőséget, sőt az Északi-tengerbe már helyeznek el ilyen módon földgázfeldolgozás során keletkező szén-dioxidot. [17] Hazánk földrajzi elhelyezkedése miatt, illetve a módszer hosszú távú hatásainak bizonytalansága okán kijelenthetjük, hogy a közeli jövőben nem jelenthet reális alternatívát Magyarország karbon semlegességének elősegítésében.

Hazánkban 2001 óta folynak kutatások a szén-dioxid végleges tárolási lehetőségeinek felmérése céljából, melyek egyszer kiterjedtek a számításba vehető geológiai formációk megtalálására, illetve a tárolókapacitások meghatározására. Magyarországon a korábban említett lehetőségek elméletileg rendelkezésre állnak. Hazánk geológiai adottságai, valamint a szénhidrogén-tárolók üzemeltetéséből származó tapasztalataink egyértelműen alkalmassá teszik arra, hogy sikeresen alkalmazzuk a szén-dioxid földalatti tárolásának technológiáját. Mindhárom szárazföldi elhelyezési módról elmondható azonban, hogy a környezetbiztonsági kockázataik a tárolás hosszú távú biztonságából, valamint az alkalmazott technológia környezetre gyakorolt hatásából adódnak. Magyarországon három s kőszén előfordulás lehetne alkalmas a CO₂ tárolására. Az ideális kőszéntelepi tároló szerkezete homogén, a körülvevő fedő és fekü képződményektől jól elhatárolódó, a kőszéntelep nagy vastagságú és nem zavarják törések, gyűrődések. Ezen telepek esetén azonban a szén-dioxid tárolás szempontjából fontos adatok felmérése nem történt meg, valamint a viszonylag kis tárolási kapacitás miatt nem jelentenek napjainkban potenciális alternatívát. [19]

A már leművelt szénhidrogén-rezervoárookban történő szén-dioxid tárolás mellett több érv is szól. Ezen formációkról biztosan tudhatjuk, hogy képesek földtani idővel mérve is a tárolásra, ezen képződmények szerkezeti felépítése pontosan ismert a szakemberek számára. A kitermelés miatt már létezik olyan technológiai infrastruktúra, amely részben, vagy teljes egészében használható a szén-dioxid csővezeteki szállítására, besajtolására és a monitoring tevékenységek elvégzésére. Szintén megtörtént hazánkban a szénhidrogéntelepek gazdasági szempontú (tárolókapacitás), valamint földtani, biztonsági (fedőréteg átjárhatósága, lakott terület közelsége) szempontú értékelése is. Ezek alapján megállapították, hogy a leművelt szénhidrogén-tároló telepek tároló kapacitása korlátozott, gyakran távol található a



kibocsátóktól, valamint problémát jelenthet a rétegekbe már korábban létesített szénhidrogén kutak a szén-dioxid és víz keverékének nem teljes ellenállósága. [19] Azonban ki kell emelnünk, hogy a szén-dioxid geológiai tárolásának kezdeti szakaszában reális alternatívát mutatnak ezen rezervoárok, az eljárás technikailag megoldottnak tekinthető. A tevékenység megkezdése előtt azonban elengedhetetlen feltétel a tárolórétegről részletes rezervoárgeológiai modell készítése az elhelyezhető gázmennyiség és a nyomásviszonyok meghatározása a telep megbízható szén-dioxid zárásának érdekében. [21]

Az előbbi formációknál lényegesebben elterjedtek az úgynevezett sós vizű rezervoárok, melyek pórusaikban sós vizet tartalmazó kőzetek. Ezen előfordulások általában a szokásos ivóvíztárolóknál mélyebben helyezkednek el, rendkívüli tárolási kapacitásuk miatt a leghatékonyabb megoldás lehet a szén-dioxid geológiai elhelyezésére az alábbi feltételek teljesülése esetén: porozitásuk és kiterjedésük elegendő a nagy mennyiségű gáztárolásra, megfelelően elkülönülnek az ivóvízként vagy termásvízként használható vízbázistól, jól záró fedőkőzetük van a szén-dioxid felfelé történő szivárgásának megakadályozására. Szükséges azonban a további általános földtani megismerése ezen rétegeknek, hiszen a szénhidrogén tároló formációkhoz képest kevesebb információval rendelkezünk mind a tárolókapacitásukat, mind pedig alkalmazhatóságuk tekintetében. [19]

4. A SZÉN-DIOXID GEOLÓGIAI TÁROLÁSÁNAK KÖRNYEZETBIZTONSÁGI VONATKOZÁSAI

4.1. Szén-dioxid kontrollálatlan kiáramlásából eredő balesetek tanulságainak elemzése

1986. augusztusában a Kameruni Köztársaságban található Nyos-tóból kiáramló szén-dioxid fojtó hatása következtében több, mint ezerhatszáz ember halt meg, valamint a tó környékén élő, illetve a közeli faluban tartott haszonállat állomány jelentős része elpusztult. A szén-dioxid kitörés természetes okokra vezethető vissza. A tó vizében hosszú idő alatt nagy mennyiségű CO₂ gáz halmozódott fel, amely valószínűleg földmozgás következtében kitört a tó felszínének környezetébe. A tómeder hegyvidéki övezetben vulkáni tevékenység során alakult ki pár száz évvel ezelőtt.



A ma már inaktív vulkán oldalában a meder alján lévő kürtőszerű csatornán át a tómeder nagy valószínűséggel szén-dioxid dús (illetve kén-hidrogén tartalmú) vízzel töltődött fel, majd a gázutánpótlás szinte folyamatos volt. Az eseményt túlélő kevés áldozatok szinte kivétel nélkül nehézlégzésről, eszméletvesztésről számoltak be, egy részük pedig a kén-hidrogénre jellemző záptojás szagot írt le. A halálos áldozatokon végzett vizsgálatok az esetek többségében fulladást, az eszméletvesztés miatt bekövetkezett traumás sérüléseket, kisebb részben tüdőödémát állapítottak meg. A katasztrófa utáni vizsgálatokból egyértelműen kijelenthető, hogy az emberi és állati áldozatok többségének halálát a szén-dioxid gáz fojtó hatása okozta. [21]

1998. novemberében a Zala megyében található nagylengyeli olajmező egyik termelő kútján karbantartási tevékenység közben gázkitörés következett be. A kontrollálatlanul kiáramló szén-dioxid veszélyeit még tovább növelte a gázelegy kénhidrogén tartalma, a káresemény következtében három település teljes lakosságát kellett kitelepíteni. Magyarországon korábban ilyen mértékű szén-dioxid kitörés nem történt, így az elhárítás munkálatai az állami szervek erői mellett az üzemeltető tevékenységet végző vállalat részéről is nagy erőforrásokat igényeltek. Az esemény utólagos értékeléséből kiderül, hogy az eredményes kárfelszámolóhoz szükséges speciális munkagépek megléte elengedhetetlen. Ilyen például az ún. turbófúvó (1.sz. kép), amely tulajdonképpen egy tehergépjármű alvázára szerelt repülőgép sugárhajtómű, amely segítségével a gázkutak tüze eredményesen eloltható. Jelen káresemény esetén pedig ezzel az eszközzel volt lehetőség a gázkitörésben érintett kút környezetéből a mérgező és fojtó hatású gázelegy eltávolítására, a kútszerkezetre rakódó szénsavhó elolvasztására. A kitörés leküzdésében résztvevő szakértők szerint nélkülözhetetlenek még továbbá speciális földmunkagépek, nagy teherbírású emelőgépek, amelyek rossz útviszonyok esetén is képesek megközelíteni a helyszínt. Fontos átgondolni ezen különleges kialakítású gépek országon belüli készenlétben tartásának helyét annak érdekében, hogy az ország bármely pontján rövid időn belül bevethetőek legyenek. Mivel ezen eszközök készenlétben tartása, szállítása és működtetése jelentős anyagi ráfordítást igényel, elengedhetetlen a megfelelően előkészített logisztikai folyamat kidolgozása. A beavatkozó tűzoltói és/vagy műszaki állomány számára olyan munkaeszközök biztosítása, amely a kútkörzetben kialakuló extrém hideg, valamint korlátozott látási viszonyok mellett is használhatók. Különös tekintettel az olyan izolációs



légzésvédő eszközökre, amelyek könnyített kialakítása és mérete lehetőséget biztosít a szűk helyeken (kútkörzet, munkagépek vezetőfülkéje) történő munkavégzésre. [22]



1. sz. kép: turboreaktív oltógép (turbófuvo) beavatkozása az NL -282/a kútnál (kép forrása: Védelem katasztrófa és tűzvédelmi szemle 2000. 7. évfolyam 5. szám)

4.2. A széndioxid geológiai tárolásának biztonságtechnikai kérdései

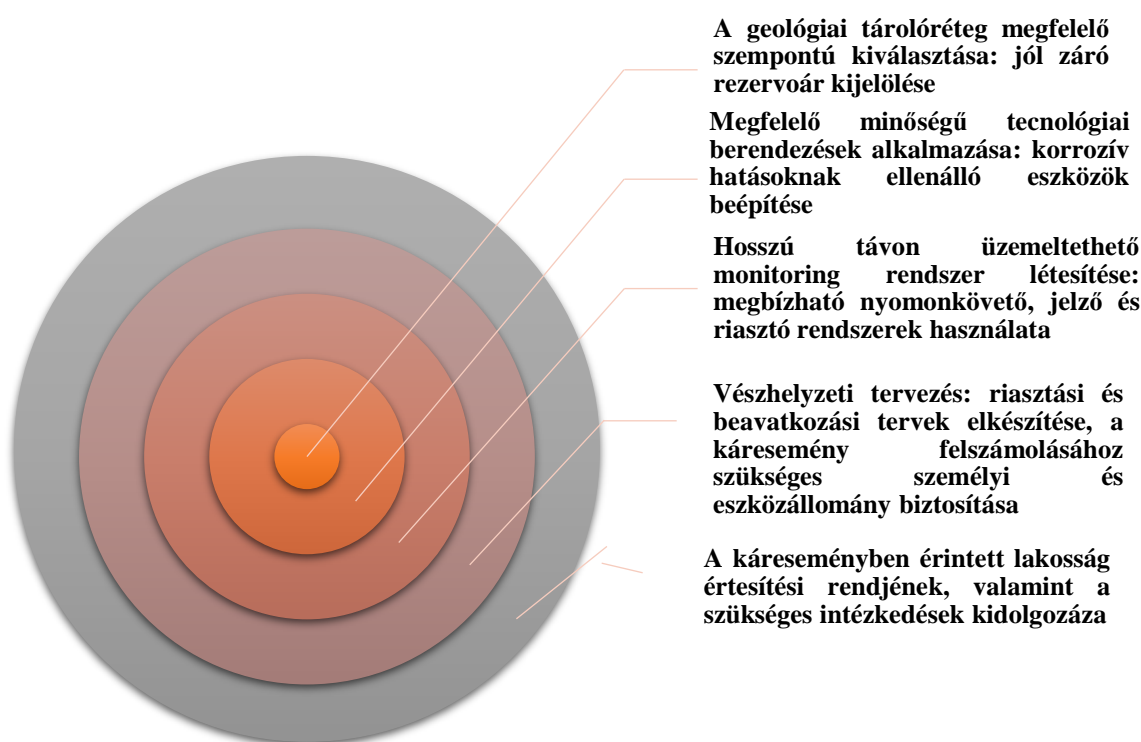
Az előző fejezetben leírt káresemények is megmutatják számunkra, hogy a szén-dioxid szállítása és végleges földkéregben történő elhelyezése potenciális veszélyforrást jelenthet a szállítóvezetékek vagy a tároló egység környezetében élő emberekre és állatokra egyaránt. A technológia fő veszélyforrásai a gáz szivárgása a tároló feletti rétegek, valamint a földfelszín és az atmoszféra felé, a tároló rétegben bekövetkező nyomásváltozások pedig feszültségváltozásokat, kisebb földrengéseket idézhetnek elő. Szintén reális veszélynek tekinthető a gáz tároló rétegből egy másik rezervoárba történő átfejtődése, amely akár ivóvízbázist is érinthet. Az ilyen geológiai tároló egységek létesítése előtt részletes biztonsági kockázatelemzést szükséges elvégezni, amelynek ki kell terjednie a korábban leírtak vizsgálatára, a lakot területek szállítóvezetékek körüli, valamint a tárolóréteg feletti elhelyezkedésére, a védett környezeti elemek meghatározására. A Nyos-tónál bekövetkezett katasztrófa igen jól szemléltetheti számunkra, hogy milyen következményei lehetnek a nagy mennyiségű szén-dioxid kontrollálatlan kiáramlásának.

Megállapíthatjuk, hogy a fő feltétel földtani szempontból a telepet jól záró, vastag, gázt át nem eresztő fedőrétege annak érdekében, hogy a gázt biztonságosan, földtani szempontból is hosszú ideig tárolni tudja. A kapcsolódó technológiai berendezéseket (csővezeték hálózat,



szivattyúállomások, nyomástartó berendezések, besajtoló kutatok) úgy kell kialakítani, hogy ellenálljanak a szállított gáz korróziós tevékenységének, illetve a szállítás és besajtolás során fellépő magas (akár több száz bar-os) üzemi nyomásoknak.

Az adott rezervoárban korábban kialakított mélyfúrások kútszerkezetei nem minden esetben lehetnek alkalmasak a gáz besajtolására, cementpalástjukat a szén-dioxid degradálhatja, így azok átképzése, újracementezése válhat szükségessé. [23]



2. ábra: A szén-dioxid geológiai tárolása vonatkozó legfontosabb biztonságtechnikai kritériumok (készítette: a szerző)

A hazai kőolaj és földgázbányászat (beleértve a földalatti gáztárolást is) több évtizedes tapasztalattal bír, amely megfelelő szakmai tudást biztosít a CCS technológia alkalmazására. Az országban régóta alkalmazzák az úgynevezett „Enhanced Oil Recovery- EOR” technológiát, ahol szén-dioxid visszasajtolásával segítik elő a szénhidrogént tartalmazó réteg termelésnövekedését. [24] A nagylengyeli mezőben bekövetkezett kitörés is egy EOR-os termeltetési módon üzemeltetett kúton következett be. Ez az esemény is jól mutatja számunkra, hogy fontos a megfelelő veszélyhelyzeti tervezés, pontosan szükséges meghatározni a hasonló



műszaki balesetek során az értesítendő körét, a kárelhárításba bevonandó szakember- és eszközállomány felkészítését, valamint bevethetőségük folyamatos biztosítását. A szén-dioxid tároló létesítményben bekövetkezett balesetben érintett településeknek is olyan védelmi tervekkel szükséges rendelkezniük, amelyek segítségével a lehető legrövidebb időn belül sor kerülhet a veszélyeztetett lakosság értesítésére, az esetlegesen szükségessé váló kitelepítés lebonyolítására.

A megfelelő geológiai egység kiválasztása és a besajtoló technológiai berendezések mellett szintén kiemelt fontosságú a tároló monitoring rendszerének kialakítása. Ennek fő célja a betárolt CO₂ mennyiségének nyomon követésével és a tároló réteg, és annak berendezéseinek (főként a besajtoló kutak) meghibásodásának, sérülésének jelzése az emberi élet védelme érdekében. Ezen rendszer eszköze kell, hogy legyen a szokásos jelző és elemző eszközök mellett a 3 vagy 4 dimenziós szeizmikus modellek elkészítése és összevetése, műholdas helymeghatározás alkalmazása a betárolt gáz elhelyezkedésének és a felszínen esetlegesen bekövetkező morfológiaváltozások ellenőrzésére. [23] A monitoring tevékenységet hosszú távon, akár több száz éven át szükséges végezni, ennek jogszabályi háttérét még nem teremtették meg. [20]

A szén-dioxid geológiai tárolása vonatkozó legfontosabb biztonságtechnikai kritériumai a 2. sz. ábrán kerültek összefoglalásra.

A szén-dioxid szállítás és tárolás, mint bányászati tevékenység potenciális iparbiztonsági kockázatokat jelent az adott technológiai létesítmény környezetében elhelyezkedő településekre, az ott élő emberekre. Legfőbb veszélyforrásnak a betárolt gázt tekinthetjük, amely kontrollálatlan kiáramlása esetén akár több napon át veszélyeztethet több települést az adott földrajzi terület domborzati és időjárási viszonyaitól függően. [25]

5. KÖVETKEZTETÉSEK

A klímaváltozás kérdése olyan ügy, amely Földünk minden lakóját érinti. Habár bolygónk éghajlata emberi tevékenység nélkül is változna, ez elmúlt évszázad károsanyag kibocsátása felgyorsította ezt a folyamatot.



Ezt felismerve az Európai Unió egyre szigorodó szabályozási környezetet kezdett el kialakítani a szén-dioxid kibocsátás jelentős mérséklésének elősegítésének céljából. A kibocsátási engedélyek és kvóták megszerzése egyre nehezebbé válik, a „szennyező fizet elv”, illetve az elérhető legjobb technológiák alkalmazásának előírása folyamatosan alternatív megoldások keresésére ösztönzi a nagy ipari CO₂ kibocsátókat.

Ilyen potenciális lehetőség a hatékonyabb energiafelhasználás mellett a megújuló energiaforrások használata, amelyek elérhetők akár a lakosság és az ipari szektor számára is. A csővégi hulladékkezelési technológiák azonban csak az ipari méretű szén-dioxid kibocsátás esetén jelenthetnek reális alternatívát. A tüzelés előtti, a tüzelés utáni, valamint az „oxyfuel” eljárások megismerése után kijelenthetjük, hogy mindhárom technológia alkalmazása potenciális lehetőséget jelent az erőművek és más ipari CO₂ kibocsátók számára.

A leválasztott szén-dioxid szállítása és geológiai tárolása nagy anyagi erőforrást igényel, azonban kijelenthetjük, hogy Magyarország a meglévő tárolókapacitások és az üzemeltetésben szerzett tapasztalatok birtokában potenciális lehetőségekkel bír a geológiai szén-dioxid tárolásban. Nem felejthetjük el azonban, hogy az elmúlt évtizedekben több olyan esemény is történt világszerte, valamint Magyarországon is, amelyekből megfelelő tanulságok vonhatók le az ilyen geológiai tárolók működésére vonatkozóan.

Az első ilyen végleges tárolók létesítése előtt elengedhetetlen a megfelelő környezet-, és iparbiztonsági szempontú kockázatértékelések elvégzése a létesítmény legelőnyösebb helyének kiválasztásához, a biztonságos üzemeltetés műszaki feltételeinek meghatározásához.

HIVATKOZÁSOK

[1] HANKÓ Márta – FÖLDI László: *“Divatos” Gondolatok a Klímaváltozásáról*; Hadmérnök Online, III. évfolyam 1. szám – 2008 március pp. 20-26

[2] PÁTZAY György, DOBOR József: *Ipari Tevékenységekből Eredő Veszélyforrások és Elhárításuk*; Nemzeti Közszolgálati Egyetem Katasztrófavédelmi Intézet, Budapest, 2016, ISBN 978-5527-91-3, pp. 118.



- [3] SZABÓ Márta (Szerk.), ANGYAL Zsuzsanna (Szerk.): *A Környezetvédelem Alapjai*; Eötvös Lóránt Tudományegyetem Természetvédelmi Kar; 2012, ISBN 978-963-279-547-8, pp. 202.
- [4] FÖLDI László: *A klímaváltozás Következményeként Megváltozó Katasztrófa-Veszélyeztetettség*; Repüléstudományi Közvélemények, XXIV évfolyam 2012. 2. szám pp. 242-252.
- [5] FARAGÓ Tibor: *Környezettudomány és Szkepticizmus: környezeti kibocsátások káros hatásainak felismerése és elismerése*; Magyar Tudomány 179. évfolyam 9. szám (2018) pp. 1289-1303.
- [6] UNITED NATIONS STATISTICS DIVISION: *Environmental Indicators: CO2 emissions in 2007*; forrás: https://unstats.un.org/unsd/environment/air_co2_emissions.htm (letöltés ideje: 2021.03.06.)
- [7] HALÁSZ László – FÖLDI László: *Környezetbiztonság*; Nemzeti Közszerológati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar, Budapest, 2014, ISBN 978-615-5305-97-9, pp. 34.
- [8] AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS 2008/1/EK IRÁNYELVE *a környezetszennyezés integrált megelőzéséről és csökkentéséről* (2008. január 15.); forrás: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0001&from=hu> (letöltés ideje: 2021.03.05.)
- [9] AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS 2010/75/EU IRÁNYELVE *az ipari kibocsátásokról (a környezetszennyezés integrált megelőzése és csökkentése)* (2010. november 24.); forrás: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0075&from=HU> (letöltés ideje: 2021.03.05.)
- [10] EURÓPAI UNIÓ: *Hatodik környezetvédelmi cselekvési program*; forrás: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/HTML/?uri=LEGISSUM:l28027&from=HU>, (letöltés ideje: 2021.03.05.)
- [11] AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS 2003/87/EK IRÁNYELVE *az üvegház hatást okozó gázok kibocsátási egységei Közösségen belüli kereskedelmi rendszerének létrehozásáról és a 96/61/EK tanácsi irányelv módosításáról* (2003. október 23.); forrás:



<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32003L0087&from=HU>

(letöltés ideje: 2021.03.06.)

[12] EURÓPAI PARLEMENT HÍREK: *Amit érdemes tudni az EU kibocsátás-kereskedelmi rendszeréről és reformjáról;* forrás:

<https://www.europarl.europa.eu/news/hu/headlines/society/20170213STO62208/amit-erdemes-tudni-az-eu-kibocsatas-kereskedelmi-rendszererol-es-reformjarol>

(letöltés ideje: 2021.03.06.)

[13] AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS 2008/50/EK IRÁNYELVE *a környezeti levegő minőségéről és a Tisztább levegőt Európának elnevezésű programról* (2008. május 21.); forrás:

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32008L0050&from=hu> (letöltés ideje: 2021.03.05.)

[14] 2020. évi XLIV. törvény a Klímavédelemről

[15] 1995. évi LIII. törvény a környezet védelmének általános szabályairól

[16] TIHANYI László, CSETE Jenő: *A CO₂ lánc – CO₂ leválasztása, szállítása és tárolása;* Műszaki Földtudományi Közlemények, 83. kötet, 1. szám (2012), pp. 221–235.;

[17] GÁCS István (szerk.): *Szén-dioxid leválasztás és eltárolás,* BME Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék, BME Kutatóegyetemi Kiadvány, pp. 1-134. (2013)

[18] MIZSEY Péter, NAGY Tibor: *A szén-dioxid megkötése ipari gázokból;* Magyar Kémiai Folyóirat, 120. évfolyam, 1. szám (2014), pp. 17-22.;

[19] FALUS György, VIDÓ Mária, JENCSEL Henrietta, SZAMOSFALVI Ágnes, TÖRÖK Kálmán: *A Hazai Földtani szerkezetek felmérése a Szén-dioxid-visszasajtolás szempontjából,* Magyar Tudomány, 2011. 4. szám pp. 50-58,

[20] TÓTH János, BÓDI Tibor: *Földgázok és Szén-dioxid földalatti tárolása,* Miskolci Egyetem, 2012; ISBN 978-963-358-008-0, pp. 1-138.

[21] DEPARTMENT OF THE INTERIOR: *Final Report of the United States Scientific Team to the Office of U.S. Foreign Disaster Assistance of the Agency for International Development 1987;* Forrás: <https://pubs.usgs.gov/of/1987/0097/report.pdf>, (letöltés ideje: 2021.03.10.)



- [22] BENCSIK István, DERCSÉNYI László: *Szén-dioxid gáz kitörésének és elhárításának tapasztalatai*; Kőolaj és Földgáz 33. (133.) évfolyam 5-6. szám, 2000. május-június, pp. 49-54.
- [23] KUBUS Péter: *A CCS-projekt realitása a hazai olajipar szempontjából*, Magyar Tudomány, 2011. 4. szám pp. 459-464.
- [24] PÁPAY József: *A szén-dioxid visszasajtolásának tapasztalatai az olajipar területén*, Magyar Tudomány, 2011. 4. szám pp. 444-449.
- [25] KÁTAI-URBÁN Lajos; VASS Gyula: *Kézikönyv: Veszélyes üzemek, tevékenységek és technológiák az iparban*. Budapest: Nemzeti Közsolgálati Egyetem, 2014. 119 p. (ISBN 978-615-5491-74-0) URL.: http://m.ludita.uni-nke.hu/repozitorium/bitstream/handle/11410/8473/kezikonyv_vesz_tech.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [26] KÁTAI-URBÁN Lajos, VASS Gyula. *Safety of Hungarian Dangerous Establishments - Review of the Industrial Safety's Authority*. (2014) *HADMÉRNÖK* 1788-1919 IX. 1 88-95.

Serfőző Kálmán doktorandusz hallgató

Nemzeti Közsolgálati Egyetem, Katonai Műszaki Doktori Iskola

PhD. student

National University of Public Service, Doctoral School of Military Sciences

Email: serfozokalman.nke@gmail.com

Orcid: 0000-0002-7614-1139