BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

Mérnökgeológia és Geotechnika Tanszék
Vásárhelyi Pál Építőmérnöki és Földtudományi Doktori Iskola
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Különböző állapotú üledékes kőzetek mechanikai tulajdonságainak meghatározása paraméteres vizsgálatokkal és laboratóriumi tesztekkel

Ph.D. tézisfüzet

készítette:

Lógó Benedek András

Témavezető:: Dr. habil. Vásárhelyi Balázs

egyetemi docens

BUDAPEST, 2025.

Tartalomjegyzék

1 Bevezetés és célkitűzések 3

2 Parametrikus vizsgálatokok a kőzetek Poisson-tényezőjéről 4

2.1 A Mohr-Coulomb-paraméterek és a Poisson-tényező közötti összefüggések 4

2.2 A Poisson-tényező, a GSI és a környezeti feszültség közötti kapcsolat 6

2.3 A Poisson-tényező, a GSI és a környezeti feszültség közötti kapcsolat eredményei 7

3 Laboratóriumi munka a Charpy ütési teszt alapján 8

3.1 Próbatestek 9

3.2 A kísérletek eredményei 9

3.2.1 Elliptikus tervezési tartomány 12

4 Összefoglalás, új tudományos eredmények, tézisek 14

5 Saját publikációk a disszertáció témájában 18

5.1 Folyóirat cikkek 18

5.2 Konferencia kiadványok 18

1 Bevezetés és célkitűzések

A geológia elsődleges fontosságú az építőmérnöki tudományokban. A talajok és kőzetek típusa és mechanikai tulajdonságai alapvető hatással vannak mind a mérnöki tervezés, mind az elemzések elvégzésére. A kidolgozott, megfelelő és költséghatékony tervezéshez és/vagy elemzéshez a mérnököknek alapvető és jól definiált anyagállandókra/változókra van szükségük a konstitutív egyenletek felállításához. A különböző típusú kőzetekkel való tervezési és/vagy elemzési helyzetek meglehetősen nehezek, mivel a kövek/sziklák kettős szerepet töltenek be az építőmérnöki tudományokban: építőanyagként is használhatók, de a földmunkák révén mérnöki objektumokat is kialakíthatnak (pl. alagutak).

Amikor a mérnöki objektumok határaként szolgáló kőzettömegben vagy annak határán tervezést/elemzést végeznek, ismerni kell mind az ép (nem szegmentált) kőzet mechanikai paramétereit, mind a szegmensek helyzetét, képződését és állapotát. A töredezettség mértékét nagymértékben befolyásolja az építés során keletkező másodlagos repedések és törések megjelenése is, amelyek oka egyrészt az építési technika eredménye (pl. új repedések jelennek meg robbantás következtében), másrészt a kialakult üreg feszültség átrendeződése hozza létre (a szakirodalom alapján: földmunkánál károsodási zónáról és környezeti károsodási zónáról beszélünk). Ez azt jelenti, hogy a deformációval kapcsolatos anyagparaméterek/változók alapvetőek a kövek/kőzetek mechanikai viselkedésének leírásához a mérnöki problémák alapján. Ezek pontos ismerete elengedhetetlen, különösen a radioaktív hulladéktárolók tervezésénél. Az eredeti és a mérnöki beavatkozások eredményeként létrejövő repedésrendszerek, új felosztások és folytonossági hiányok jelentősen befolyásolják a kőzettömeg mechanikai tulajdonságait, így ez jelenleg a kőzetmechanika egyik legújabb kutatási területe. A doktori kutatás fő kutatási területe a deformációelméleten alapuló kőzetmechanikai problémák vizsgálata. Konkrétabban a Poisson-tényező változását vizsgáltam a kőzet töredezettségének és a környezeti nyomásnak a függvényében virtuális tesztekkel (parametrikus vizsgálatokkal). Valós laboratóriumi kísérletek elvégzésével megvizsgáltam a zöld homokkő ütésállósága és egytengelyű nyomószilárdsága közötti összefüggést.

Kutatásom célja, hogy egyértelmű összefüggést találjak a klasszikus kőzetosztályozási módszerekkel, amivel az empirikus tapasztalatok és az elméleti módszerek összekapcsolhatók. A kapott eredmények segítségével lehetőség nyílik az alagutak környezetének pontosabb modellezésére is.

A kapott virtuális és laboratóriumi kőzetmechanikai vizsgálati eredmények felhasználásával

és a nemzetközi szakirodalmi adatokkal való összevetésével lehetőség nyílik a meglévő hatások összehasonlítására szolgáló képletek ellenőrzésére, pontosítására. A kísérletek alapján várhatóan újabb összefüggések feltárása - az adott kőzetekre -, új egyenletek írhatók fel, amelyek pontosabban jellemzik a kőzetek viselkedését. Az elméleti és empirikus összefüggések, valamint a kőzettestek tagolódásának ismeretében lehetőség nyílik a víz és a hőmérséklet kőzetre gyakorolt hatásának modellezésére is. A kapott eredmények közvetlenül hasznosak mind a mérnöki (geotechnikai) tervezésben, mind a földtani folyamatok megértésében. Kutatásomban volt egy másodlagos cél is, nevezetesen egy viszonylag egyszerű ütési energia alapú in situ tesztet javasol, amellyel szükség esetén becsülhetőek a tervezési paraméterek a fejtések során.

2 Parametrikus vizsgálatokok a kőzetek Poisson-tényezőjéről

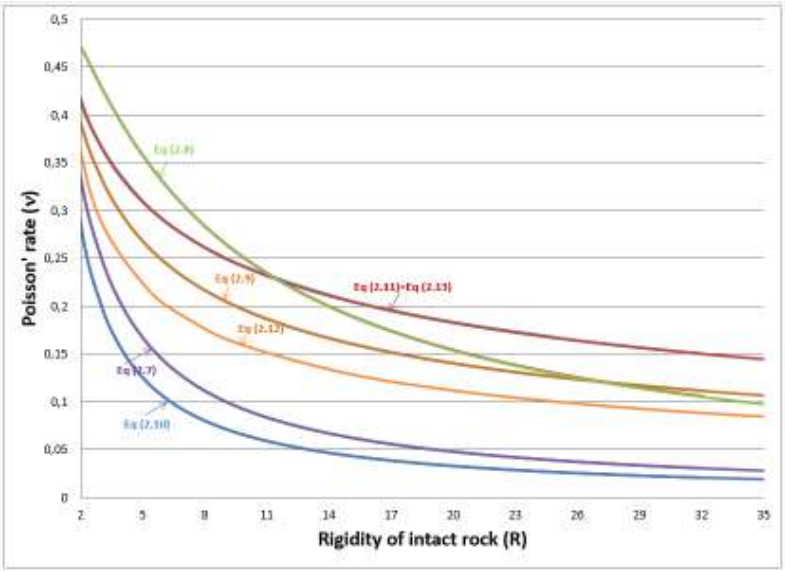
Ahogy fentebb olvasható, virtuális teszteket (paraméteres vizsgálatokat) végeztem az ép kőzetek Poisson-tényezőjének tulajdonságaival kapcsolatban. Először egy parametrikus vizsgálatot dolgoznak ki arra vonatkozóan, hogy az ép kőzet Poisson-tényezője hogyan függ az anyag merevségétől. Emellett vizsgáltam a Poisson-tényező és a Geological Strength Index (GSI) összefüggését, a Poisson-tényező, a GSI és a határolófeszültség közötti kapcsolatot. A szakaszt az ép kőzet határoló nyomása és Poisson-tényező közötti elméleti összefüggés kutatása zárja.

2.1 A Mohr-Coulomb-paraméterek és a Poisson-tényező közötti összefüggések

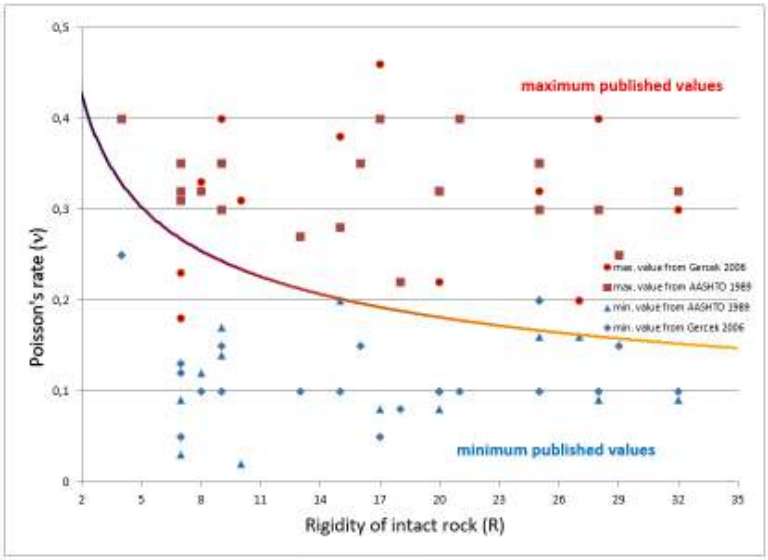
Meglévő egyenletek felhasználásával összefüggéseket lehetett ábrázolni a Mohr-Coulomb paraméterek és a Poisson-tényező között (1. ábra). Látható, hogy az alkalmazott egyenletek segítségével a Poisson-tényező nagymértékben függ a kőzetanyag merevségétől. Ez a nemlineáris viselkedés azt mutatja, hogy a változás nagyon érzékeny körülbelül $R \approx 10$-ig. Törékeny kőzetek esetén ($R > 10$) a merevség hatása nem olyan jelentős. Mindezen összefüggések miatt a Poisson-tényező 0,5 $R = 1$ (azaz műanyag) esetén. A kőzet maximális merevségét (azaz $R = 35$) elérve a minimális Poisson-tényező 0,02 között van. A közzétett adatok szerint a legalacsonyabb Poisson-tényező 0,1 körül van.

A 2. ábrán a minimális és maximális Poisson-tényezőt (ν) ábrázoltam a kőzet Hoek-Brown állandójának (m_i) függvényében. Csak két pont van a soron kívül: a pala és az aleurolit az AASHTO (1989) listájáról. Megjegyzés: az ilyen típusú kőzetek Hoek-Brown állandója általában nagyon érzékeny.

A különböző összefüggéseket összevetve felírható a legjobb illeszkedési görbe a kőzet merevségének (R) függvényében (ez megegyezik a Hoek-Brown anyagállandóval (mi), így $R \approx m_i$,), azaz.: $\nu = \frac{1}{\sqrt{m_i}+1}$. (1)



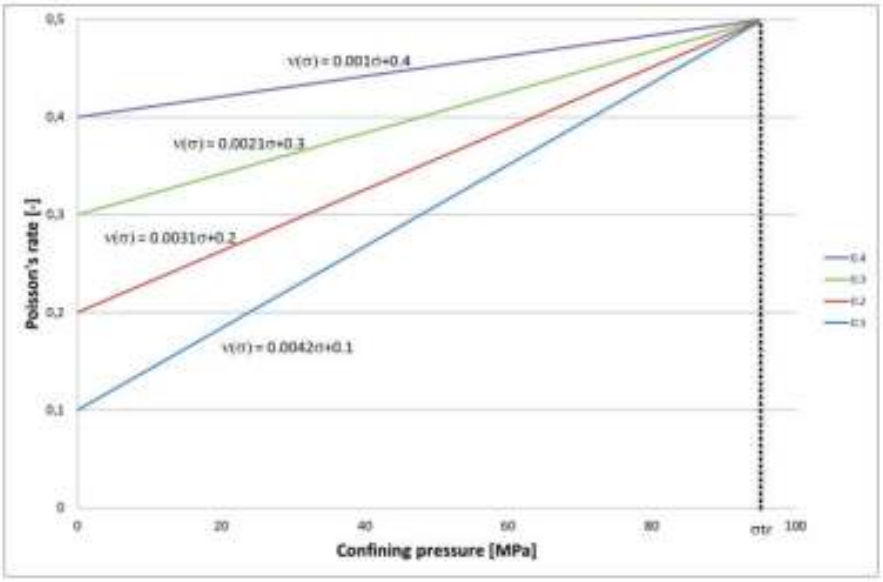
1. ábra: A Poisson-tényező előrejelzése az ép kőzet merevségének függvényében – egyenletek Zhang et al (2011) szerint.



2. ábra Ábrázoltam az ép kőzet maximális és minimális Poisson-tényezőjét (ν) a merevség (R) függvényében – (Gercek 2006) és (AASHTO 1989) publikált értékeinek felhasználásával, valamint a 2.11 és 2.13 egyenletekkel

2.2 A Poisson-tényező, a GSI és a környezeti feszültség közötti kapcsolat

Ennek az elméleti kutatásnak a célja egy egyszerű kapcsolat meghatározása az ép kőzet határolófeszültsége és a Poisson-tényező értéke között. Ez az egyszerű lineáris összefüggés könnyen létrehozható, és nem igényel más információt, mint az ép kőzet környezeti nyomás nélküli Poisson-tényezője (ν = νi) és a tranziens feszültségérték. Meg kell említeni, hogy a Poisson-tényező többféleképpen is kezelhető. Pontosabban úgy írható le, mint egy rugalmas alakváltozási paraméter, amely a nyomási folyamatok során monoton módon növekszik az igénybevétellel. A nemzetközi kutatás kísérleti eredményei szerint a különböző kőzetek eltérő viselkedést mutatnak Poisson-tényezőben. A kemény kőzetekben a szekáns és az átlagos Poisson-tényező körülbelül lineárisan nő a feszültséggel a terhelési folyamat fő szakaszaiban. A lágy kőzetekben azonban ezek az arányok a kezdeti terhelési szakaszban gyorsan meghaladják a 0,5 elméleti maximumot. Ebben az esetben létrehozható egy bilineáris kifejezés, de ebben a közelítésben a közbülső pont meghatározása kritikus. A közbenső pont az az eset, amikor az axiális feszültség eléri az átmeneti feszültség 20-30%-át. Ha ez a közbülső pont ismert, akkor Lagrange vagy Hermit-féle polinomiális közelítés is alkalmazható. Ez utóbbi esetekben a lineáris közelítések helyett nemlineáris közelítéseket használunk.



3. ábra: A Poisson-tényező megváltoztatása σc=100 MPa és mi=10 esetén ((2.38) egyenlet felhasználásával)

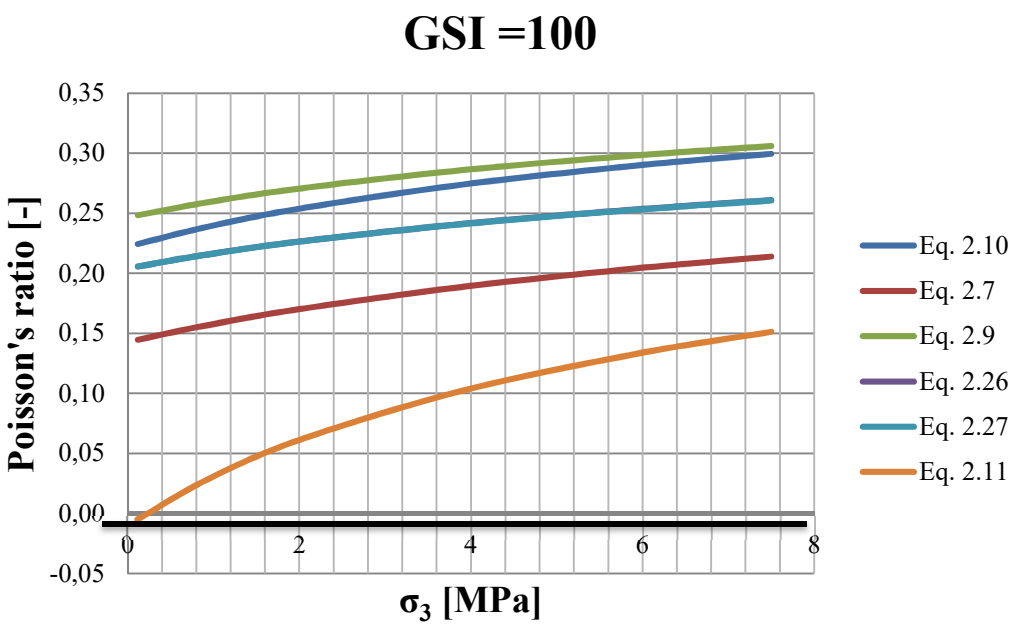
A határoló nyomás hatását a Poisson-tényező értékére a 3. ábra ábrázolja: az egyirányú nyomószilárdság (σ_c)= 100 MPa és a Hoek-Brown állandó (m_i) = 10 ebben a példában. A Poisson-tényezőket a határnyomás függvényében ábrázoltuk az ép kőzet ν_i = 0,1, 0,2, 0,3 és 0,4 értékeihez nulla környezeti nyomás mellett.

Hangsúlyozni kell, hogy ez a kapcsolat ép kőzetre vonatkozik. A kőzetmérnöki gyakorlatban fontos a kőzettömeg mechanikai paramétereinek ismerete (Poisson-tényező is). A Poisson-tényező értéke a kőzettömeg minőségétől függ. A kőzettömeg minőségének növelésével a Poisson-tényező csökken. A Poisson-tényező a víztartalomtól is függ.

2.3 A Poisson-tényező, a GSI és a környezeti feszültség közötti kapcsolat eredményei

Az egyes egyenletek eredményeit többféleképpen hasonlítottam össze. A vizsgálat egyik célja annak megállapítása volt, hogy van-e összefüggés a Poisson-tényező és a környezeti nyomás nagysága között, és hogy a GSI változása hogyan befolyásolja a Poisson-tényezőt. Paraméteres számításokat végeztem, hogy lássam a fenti paraméterek egymástól való függőségét.

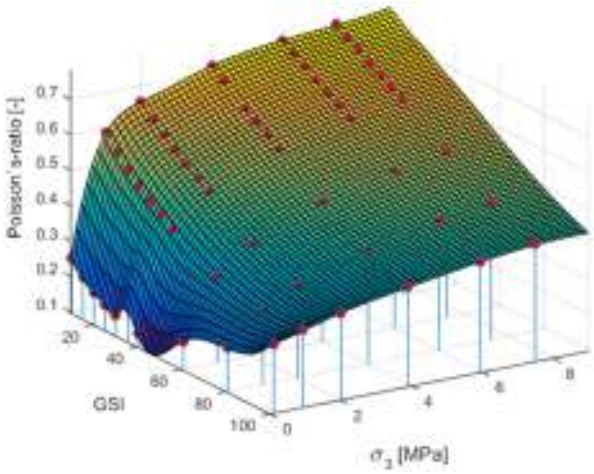
A 4. ábra az ép kőzetre vonatkozó Poisson-tényező értékeket mutatja σ3 függvényében. Megfigyelhető, hogy az egyes egyenletek által adott eredmények bár eltérő értékűek, de természetükben ugyanúgy viselkednek. Látható, hogy bár nincs megkötés az adaptált megfogalmazásra vonatkozóan, nem használható minden tartományban, mivel nem ad érdemi eredményt.



4. ábra: Az ép kőzet eredményei

A következő ábra (5. ábra) azt mutatja, hogy a Poisson-tényező értéke nemcsak a környezeti nyomás nagyságától függ, hanem jelentősen befolyásolja a kőzet töredezettsége is. Látható, hogy minél nagyobb egy adott minta GSI értéke, annál nagyobb lesz a Poisson-tényező. A piros

pontok az egyes egyenletek alapján számított értékeket jelölik. Ezekkel az eredményekkel van ellátva egy felület, amely jó közelítést tud adni a számított eredmények közötti területekről.



5. ábra: A 2.10-es egyenlet eredményei

A fent bemutatott eredmények alapján érdekes összefüggés mutatható ki a Poisson-tényező eddig állandónak tekintett környezeti terhelésen alapuló értékének változásai és a GSI-érték között. Nyilvánvaló, hogy a GSI-érték csökkentése a Poisson-tényező értékét is csökkenti, míg ha a σ_3 értéke nő, akkor a Poisson-tényező is nő.

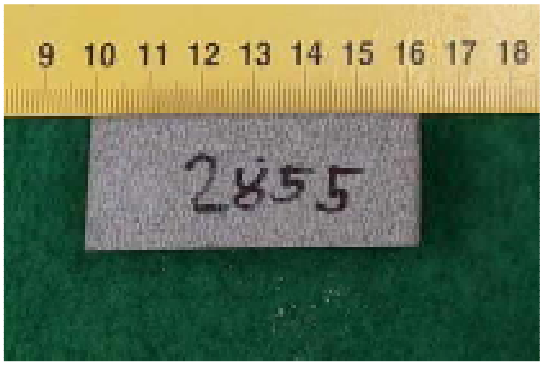
3 Laboratóri□mi m□nka a Charpy ütési teszt alapján

Laboratóriumi ütési vizsgálataim során zöld homokkövet (glaukonitos homokkő) vizsgáltam. A zöld homokkő egy üledékes kőzet, amely jellemzően tengerparti, sekély tengeri környezetben képződik. Fő jellemzője a zöldes árnyalat, amelyet a glaukonit nevű ásvány ad. A glaukonit egy vasban gazdag filoszilikát ásvány, amely gyakran kis mennyiségben fordul elő a tengeri homokkőben, de jelentős mennyiségben van jelen a zöld homokkőben, uralva a kőzet színét és jellemzőit. A zöld homokkő képződése lassú üledékes, oxigénszegény tengeri környezetben, általában kontinentális talapzatokon vagy szubtrópusi-trópusi tengerek sekélyebb részein megy végbe. A glaukonit általában alacsony energiájú, stabil tengeri környezetben képződik, ahol a szerves anyagok lebomlanak az üledékben gazdag rétegek között, és hozzájárulnak a glaukonitkristályok növekedéséhez. A zöld homokkő finomszemcsés, de tartalmazhat durvább szemcséket is. Ásványi összetételében a glaukoniton kívül gyakori a kvarc, a földpát és a mészcement. A glaukonit gyakran zöldes, zöldesszürke vagy olívazöld színű, ami könnyen felismerhetővé teszi a kőzetet. Az üledékes szövet

jellemzően réteges, és a rétegek közötti cementáció erőssége változó lehet, ami befolyásolja a kőzet porozitását és szilárdságát.

3.1 Próbatestek

A próbatestek méreteinek meghatározásakor elsősorban a homokkő tulajdonságait vettem figyelembe. A cél az volt, hogy a próbadarab méretei úgy legyenek minél kisebbek, hogy a homokkövet alkotó szemcsék mérete lehetőleg ne befolyásolja nagymértékben a törést, és a mintát kvázi homogénnek lehessen tekinteni. Az így meghatározott méret lehetővé teszi az anyag tulajdonságainak a vizsgálat során történő vizsgálatát úgy, hogy az alkotó részecskék esetlegesen eltérő szilárdsági tulajdonságai ne befolyásolják az eredményt. A próbatestek 25x25x60 mm méretűek, a geometriai eltérések bármely méretnél kisebbek, mint 1 mm. Az egyes oldalak méreteinek szórása a következő képen látható: a két rövidebb oldalnál 0,4 mm és 0,5 mm, míg a 60 mm hosszú oldalnál 0,6 mm.



6. ábra: Zöld homokkő próbatest

7. ábra: Próbatest a törés után

Mivel a kőzetek és általában minden természetes építőanyag teherbíró képességének ismérve az anyag hőmérséklete és víztelítettségi állapota, ezért a vizsgálatok során a próbatesteket különböző telítettségi és hőmérsékleti állapotban teszteltem. Vagyis légszáraz normál hőmérsékleten (22°C), telített normál hőmérsékleten, légszáraz fagyasztott és telített fagyasztott állapotban. Ezzel a négy állapottal a természetben előforduló állapotok jelentős része lefedhető, így a teszt ezekről az állapotokról is ad információt.

3.2 A kísérletek eredményei

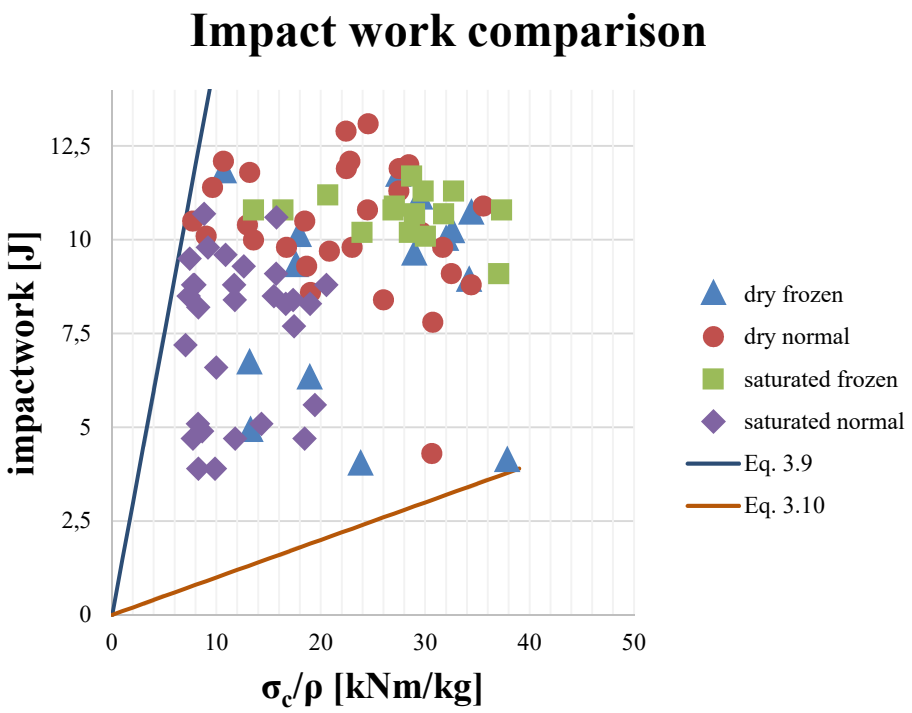
A kapott mérési eredményeket több különböző szempont szerint hasonlítottam össze egymással. Célom, hogy minél szélesebb körben tudjak összefüggést találni a becsapódási energia és a minta valamely tulajdonsága vagy tulajdonságai között. Ezenkívül a másodlagos cél volt olyan fizikai mennyiségek megtalálása, amelyek alapvetőek a kőzethasználat napi gyakorlatában. Ezen fizikai mennyiségek kiválasztásakor igyekeztem előnyben részesíteni a

könnyen meghatározható adatokat, hogy a kapott összefüggés alkalmazhatóságához ne legyen szükség sem speciális műszerekre, sem bonyolult eljárásokra.

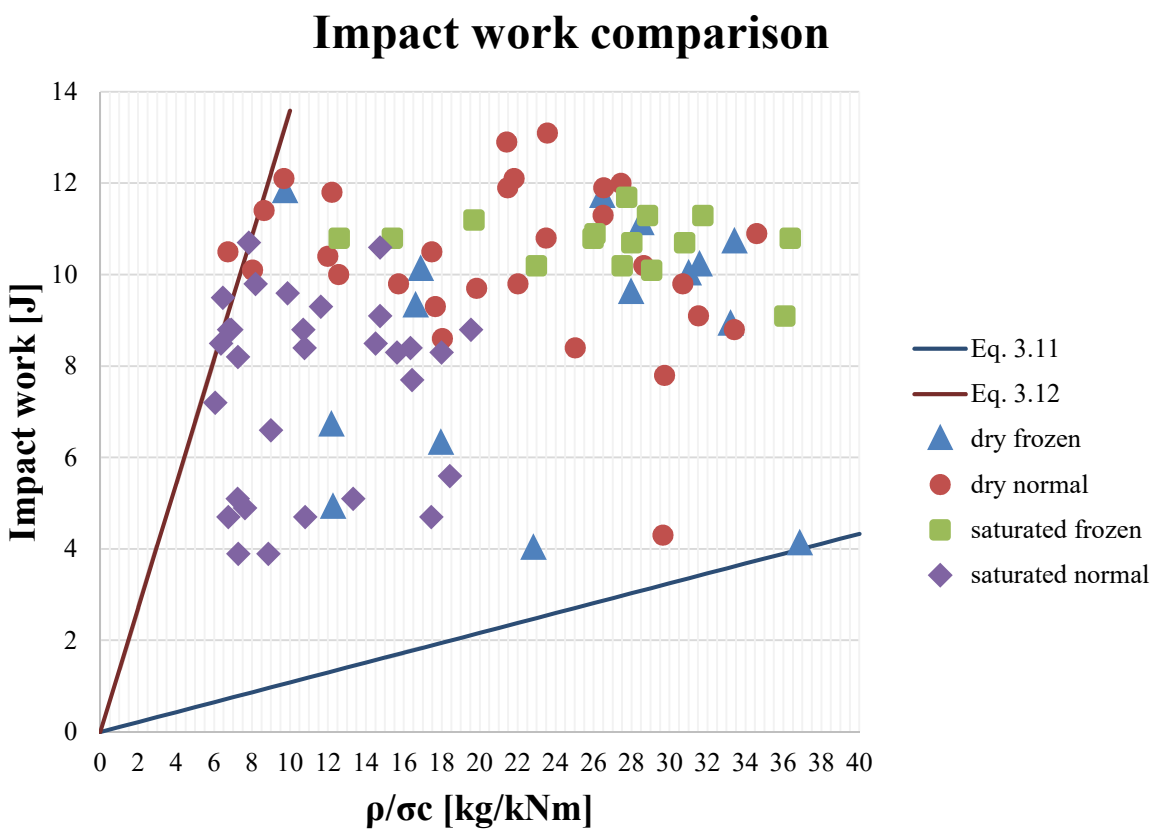
1. táblázat: Átlagsűrűség és ütési munkaértékek különböző körülmények között

		légszáraz fagyasztott	légszáraz normál	telített fagyasztott	telített normál
Sűrűség (g/cm^3)	átlag	2,42	2,41	2,41	2,41
	szórás	0,03	0,03	0,03	0,02
Ütő munka (J)	átlag	8,63	10,22	10,71	7,55
	szórás	2,71	1,84	0,63	2,07

A vizsgált homokkő (8-9. ábra) finomszemcsés, a mérés szempontjából homogénnek tekinthető, ezt bizonyítja, hogy a sűrűségmérésben a legnagyobb eltérés mindössze 0,03 g/dm^3. (1. táblázat) Ütőmunka esetén a szórás már nagyobb, ez részben a zöld homokkő anyagának köszönhető. Tekintettel arra, hogy üledékes kőről van szó, a mérések során az egyes rétegek megtelepedési iránya kimutatható volt, annak ellenére, hogy szabad szemmel egyáltalán nem volt észrevehető. Normál hőmérsékletű minták esetén körülbelül 35%-os különbség van a telített és a levegőn szárított minták ütési munkája között. Ebben az esetben a magasabb értékeket a levegőn szárított próbatestek mérése során kapam. A fagyasztott minták esetében ez a különbség 24% körüli volt. Itt viszont a telített minták vizsgálata során kaptam a nagyobb ütőmunka értékeket.



8. ábra: Ütőmunka eredmények összehasonlítása



9. ábra: Ütőmunka eredmények összehasonlítása

A mérési eredmények értékelése során azt az eredményt kaptam, hogy a vizsgált minták esetében az ütési energia, a sűrűség és a nyomószilárdság hányadosával meghatározott érték matematikailag jól leírható kapcsolatban áll egymással.

A minták esetében a hőmérséklettől és telítettségi állapottól függetlenül az ütési munkaértékek két egyenes által határolt tartományba estek (8., 9. ábra). Ez csak a sűrűség és az ütési munka meghatározásával teszi lehetővé az így végzett vizsgálatok segítségével becsült szilárdsági érték megszerzését. Az egyes határértékek meghatározása előtt statisztikai módszerekkel ellenőriztem, hogy az egyes értékek nagyobbak-e, mint az átlag mínusz a szórás háromszorosa, vagy kisebbek-e az átlag és a szórás háromszorosának összege. Ha egy minta nem fér bele ebbe a tartományba, az nem vehető figyelembe a határértékek megállapításakor. A vizsgált zöld homokkő esetében minden mért érték a megfelelő tartományban volt, így a határgörbék felállításakor csak azt az egyenest kellett megtalálni, amely az origóból indul és a ponthalmaz két legkülső elemén halad át.

Ennek alapján, ha a sűrűséget osztjuk σ_c-vel (8. ábra), az értékek felső határát az egyenlet írja le. (2), míg az alsó határt a (3) egyenlet adja meg.

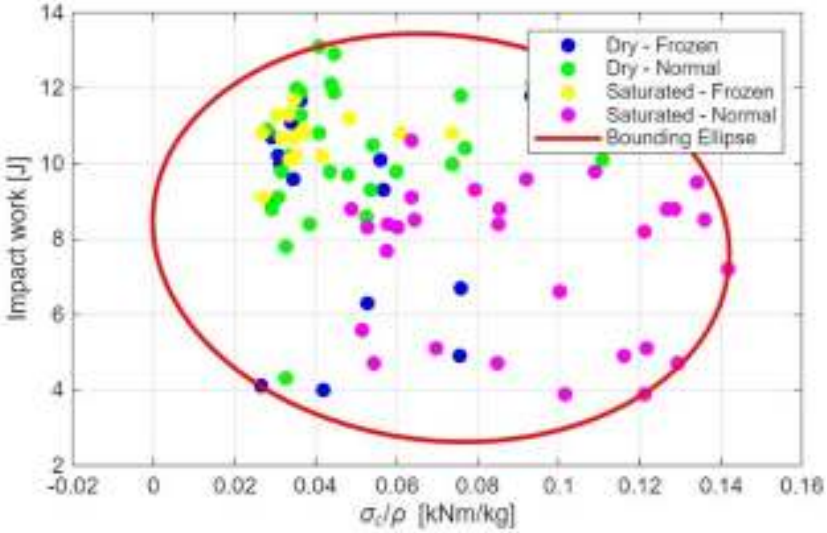
$$\sigma_c = 425 \cdot \rho / W; \tag{2}$$

$$\sigma_c = 32 \cdot \rho / W; \tag{3}$$

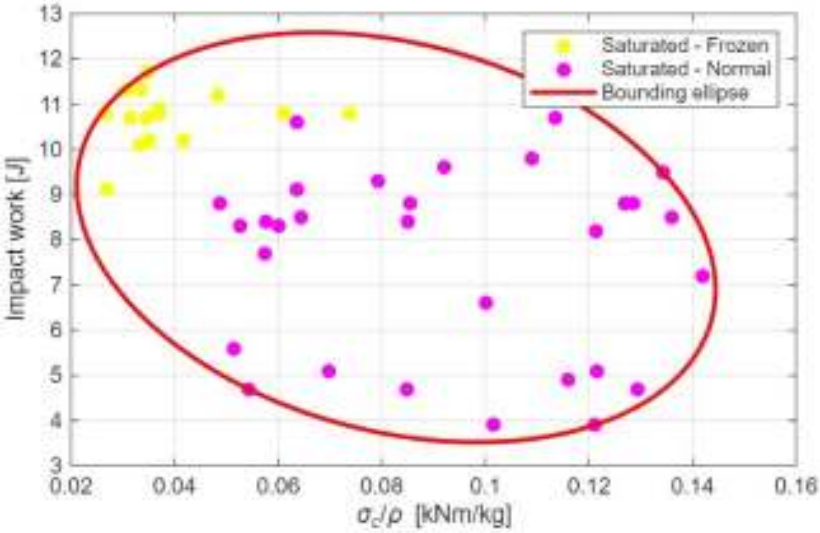
ahol W ütési munka, ρ a próbatest sűrűsége, σc a próbatest nyomószilárdsága.

3.2.1 Elliptikus tervezési tartomány

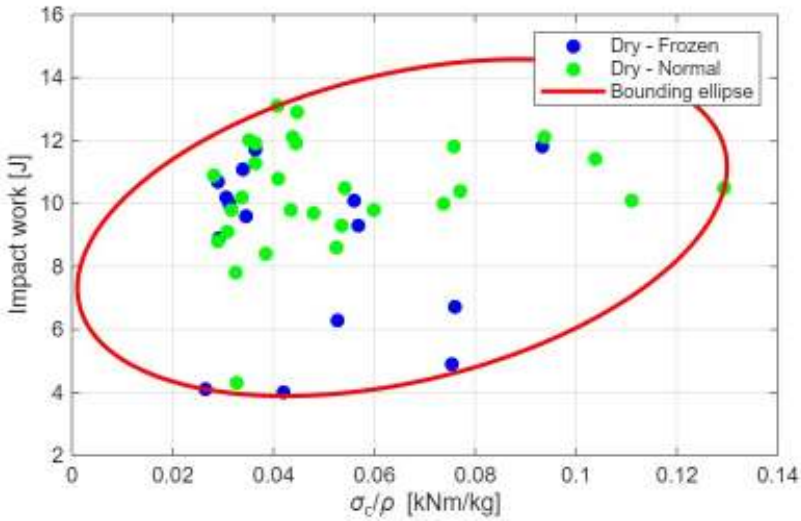
Az optimális tervezési eljárások során szükség van az adathalmaz elliptikus tervezési tartományára, hogy a megvalósítható megoldások konvexitása biztosítható legyen. Ez is demonstrálni tudja az adatkészlet bizonytalanságát ezzel az alkalmazással. Ily módon a különböző ütőmunka -UCS adatkészletet használták a tartomány meghatározásához. Egy MATLAB kódot írtam az optimalizálás elve alapján, hogy a fedett elliptikus terület minimális legyen, míg a mért pontok bármelyikének a tartományon belül (az ellipszis alatt) kell lennie. A következő elliptikus görbéket határoztam meg: 10. ábra az összes mért próbatest, 11. ábra telített próbatest és 12. ábra száraz próbatest.



10. ábra: Elliptikus tervezési tartomány minden ponthoz



11. ábra: Elliptikus tervezési tartomány telített mintákhoz



12. ábra: Elliptikus tervezési tartomány légszáraz mintákhoz

4 Összefoglalás, új tudományos eredmények, tézisek

Kutatási munkáimat két fő irányvonalra osztottam. Az első a kőzetek Poisson-tényezőjének virtuális teszt alapú vizsgálataihoz, a másik pedig a különböző környezeti feltételek melletti üledékes kőzetek ütésállóságának és nyomószilárdságának függésének laboratóriumi vizsgálatokon alapuló kutatásaihoz kapcsolódik.

A virtuális teszteken alapuló elméleti kutatás első részének célja az volt, hogy megvizsgálja a lehetőséget: hogyan függ az ép kőzet Poisson-tényezője az anyag merevségétől. A különböző elméletek szerint a Poisson-tényező csökkenő merevség esetén. Vizsgáltam továbbá az ép kőzet határolófeszültsége és a Poisson-tényező értéke közötti összefüggést, valamint a Poisson-tényező és a Geological Strength Index (GSI) összefüggését. A határoló feszültség és a Poisson-tényező közötti kapcsolat, mint egyszerű lineáris összefüggés, könnyen létrehozható, és nem igényel más információt, mint az ép kőzet korlátozó nyomás nélküli Poisson-tényező ($\nu = \nu_i$) és a tranziens feszültségérték. Meg kell említeni, hogy a Poisson-tényező többféleképpen is kezelhető. Amint jeleztük, pontosabban leírható rugalmas alakváltozási paraméterként, amely monoton módon növekszik a feszültség hatására a nyomófolyamatok során. Mint az irodalomból ismert, kísérletileg igazolták Dong és tsai. (Dong 2021) szerint a különböző kőzetek eltérő viselkedést mutatnak Poisson-tényezőben. A kemény kőzetekben a szekáns és az átlagos Poisson-tényező körülbelül lineárisan nő a feszültséggel a terhelési folyamat fő szakaszaiban. A lágy kőzetekben azonban ezek az arányok a kezdeti terhelési szakaszban gyorsan meghaladják a 0,5 elméleti maximumot. Ebben az esetben létrehozható egy bilineáris kifejezés, de ebben a közelítésben a közbülső pont meghatározása kritikus. A közbenső pont az az eset, amikor az axiális feszültség eléri az átmeneti feszültség 20-30%-át. Ha ez a közbülső pont ismert, akkor Lagrange vagy Hermite-féle polinomiális közelítés is alkalmazható. Ez utóbbi esetekben a lineáris közelítések helyett nemlineáris közelítéseket használható.

I.a tézis:
Paraméteres vizsgálat segítségével megállapítottam, hogy a Poisson-tényező csökken a merevség növekedése esetén. A legjobb eredmény a következő képlet:

$$\boldsymbol{\nu = \frac{1}{\sqrt{m_i}+1}}$$

I.b tézis:
Paraméteres vizsgálataim alapján összefüggést találtam a környezeti nyomás alapján (0 és 8 MPa között) a Poisson-tényező eddig állandónak tekintett értékének változása és a GSI érték között. Nyilvánvaló, hogy a GSI-érték csökkentése a Poisson-tényező értékét is csökkenti, míg ha a σ_3 értéke nő, akkor a Poisson-tényező is nő.

I.c tézis:
Paraméteres vizsgálattal megállapítottam, hogy a Poisson-tényező értéke a környezeti nyomás (0 és 8 MPa között) növekedésével hirtelen és gyorsan változik (növekszik), majd lelassul, de nem tűnik el.
Kapcsolódó publikációk:

Lógó, B. A., Vásárhelyi, B. (2019) "Estimation of the Poisson's Rate of the Intact Rock in the Function of the Rigidity", Periodica Polytechnica Civil Engineering, 63(4), pp. 1030–1037, 2019. https://doi.org/10.3311/PPci.14946

Lógó, B. A., Vásárhelyi, B. (2020) "Parametric Study on the Connection Between Poisson's Ratio, GSI and Environmental Stress", Computer Assisted Methods in Engineering and Science, 27(2–3), pp. 205–217, 2020. https://doi.org/10.24423/cames.287

Lógó, B. A., Vásárhelyi, B. (2022). Theoretical Relationship between the Confining Pressure and Poisson's Ratio of Intact Rock. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, *66*(4), 1114-1121.

A laboratóriumban végzett vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a Charpy ütőpróba homokköveken is alkalmazható, a mérési eredmények alapján értelmes és egyértelműen meghatározott összefüggések láthatók. A mérési eredmények tartományának alsó és felső határa a telítettségi állapottól és hőmérséklettől függetlenül meghatározható. Ezen összefüggések használatával könnyen meghatározható az üledékes kőzetek nyomószilárdsága az ütési munka ismeretében, vagy az ütközési munka a nyomószilárdság ismeretében. Ez utóbbi eset robbanásoknál hasznos lehet, hiszen egy egyszerű összefüggéssel megbecsülhető a maximális és minimális becsapódási energia.

A különböző hőmérsékleteken és telítettségi állapotokon végzett mérések azt mutatták, hogy a minta hőmérséklete -12°C és 22°C közötti hőmérsékleten csak minimálisan befolyásolja az eredményt. A minta víztelítettsége sokkal nagyobb hatással van az ütésállóságra. A mintákban lévő jég miatt a fagyott, telített minta ütésállósága vagy nem változik a légszáraz minta ütési energiájához képest, vagy enyhén növekszik.

II. tézis

Kísérleti programot dolgoztam ki a zöld homokkő ütési energiájának mérésére. A Charpy ütőpróba segítségével megbecsülhető a zöld homokkő nyomószilárdsága.

Kapcsolódó publikációk:

Lógó, B. A., Vásárhelyi, B. (2025). Estimation of the constitutive relationship between impact resistance and compressive strength in sandstones, *Periodica Polytechnica Civil Engineering 69(3), pp. 944–953, https://doi.org/10.3311/PPci.40270*

Lógó, B. A., Vásárhelyi, B. (2021). Charpy impact test to sedimentary rocks. *In: B. Blachowski and P. Tauzowski (eds.) Book of Abstracts-2nd Workshop on Engineering Optimization, Warsaw* (pp. 89-97).

Lógó, B. ; Vásárhelyi, B. (2022) Charpy impact test to sedimentary rocks, In: Coric, Slobodan; Papic, Jovan (eds.) Engineering problems in soft rocks, Skopje, North-Macedonia: Macedonian Association for Geotechnics pp. 839-844. , 6 p. ISBN 978-9989-2053-4-7

Fontos a tudományos eredmények hasznosítása. Amint azt a 4. részben bemutattuk, ezeket az eredményeket alkalmazásokban használták fel. Ezenkívül megvizsgáltuk, hogy a változó Poisson-tényező milyen hatással van az optimális topológiára.

Kapcsolódó publikációk:

Lógó, B.A. ; Lógó, J.; Tauzowski P., Blachowski B., (2019) Rugalmas képlékeny anyagú topológia optimálás változó Poisson tényező felhasználásával, In: Baksa, Attila; Bertóti, Edgár; Kiss, László; Szirbik, Sándor (szerk.) XIII. Magyar Mechanikai Konferencia, Miskolc-Egyetemváros, Magyarország: Miskolci Egyetem, Műszaki Mechanikai Intézet pp. 1-1. Paper: 468 , 1 p.

Lógó, B. A.; Bruggi, M.; Lógó, J. (2022) Computational aspect of a reconstruction of heritage structure built as ribbed masonry vaults, In: Ivica, Skozrit; Jurica, Soric; Zdenko, Tomkovic (eds.) 10th ICCSM International Congress of Croatian Society of Mechanics : Book of Abstracts, pp. 189-190.

III. tézis

Zöld homokkő esetén a mérési eredmények alapján meghatározható az ütési munka nagysága és a nyomószilárdság közötti alsó és felső határ, függetlenül a telítettségi állapottól és a hőmérséklettől.

III.a tézis

Meghatároztam a burkológörbe határait, 0 és 14 J ütési munka közötti, ami a különböző telítettségi állapotokhoz és hőmérsékletekhez tartozik.

III.b tézis

Zöld homokkövek esetében a -12°C és +22°C tartományban a fémekkel ellentétben az ütési munka értékét nagymértékben nem a hőmérséklet, hanem a telítettségi állapot befolyásolja.

III.c tézis

Meghatároztam a különböző telítettségi állapotokhoz és hőmérsékletekhez tartozó elliptikus tervezési tartományt.

Kapcsolódó publikációk:

Lógó, B. A., Vásárhelyi, B. (2025). Estimation of the constitutive relationship between impact resistance and compressive strength in sandstones, *Periodica Polytechnica Civil Engineering 69(3), pp. 944–953, https://doi.org/10.3311/PPci.40270.*

Lógó, B. A., Vásárhelyi, B. (2021). Charpy impact test to sedimentary rocks. *In: B. Blachowski and P. Tauzowski (eds.) Book of Abstracts-2nd Workshop on Engineering Optimization, Warsaw* (pp. 89-97).

Lógó, B. ; Vásárhelyi, B. (2022) Charpy impact test to sedimentary rocks, *In: Coric, Slobodan; Papic, Jovan (eds.) Engineering problems in soft rocks, Skopje, North-Macedonia: Macedonian Association for Geotechnics pp. 839-844. , ISBN 978-9989-2053-4-7*

Fontos a tudományos eredmények hasznosítása. Amint azt a 4. részben bemutattuk, ezeket az eredményeket alkalmazásokban használták fel. Ezenkívül megvizsgáltuk, hogy a változó Poisson-tényező milyen hatással van az optimális topológiára.

Kapcsolódó publikációk:

Lógó, B.A.; Lógó J.; Tauzowski P., Blachowski B., (2019) Rugalmas képlékeny anyagú topológia optimálás változó Poisson tényező felhasználásával, *In: Baksa, Attila; Bertóti, Edgár; Kiss, László; Szirbik, Sándor (szerk.) XIII. Magyar Mechanikai Konferencia, Miskolc-Egyetemváros, Magyarország: Miskolci Egyetem, Műszaki Mechanikai Intézet. Paper: 468*

Lógó, B. A.; Bruggi, M.; Lógó, J. (2022) Computational aspect of a reconstruction of heritage structure built as ribbed masonry vaults, *In: Ivica, Skozrit; Jurica, Soric; Zdenko, Tomkovic (eds.) 10th ICCSM International Congress of Croatian Society of Mechanics: Book of Abstracts, pp. 189-190.*

5 Saját p blikációk a disszertáció témájában

5.1 Folyóirat cikkek

Lógó, B. A., Vásárhelyi, B. (2019a): Estimation of the Poisson's Rate of the Intact Rock in the Function of the Rigidity, Periodica Polytechnica Civil Engng, 63(4): 1030–1037 https://doi.org/10.3311/PPci.14946

Lógó, B. A., Vásárhelyi, B. (2020): Parametric Study on the Connection Between Poisson's Ratio, GSI and Environmental Stress, Computer Assisted Methods in Engineering and Science, 27(2–3): 205–217, 2020. https://doi.org/10.24423/cames.287

Lógó, B. A., Vásárhelyi, B. (2022a). Theoretical Relationship between the Confining Pressure and Poisson's Ratio of Intact Rock. *Periodica Polytechnica Civil Engng*, *66*(4), 1114-1121.

Bruggi, M., Lógó, B. A., Deák, Z. (2022). Funicular analysis of ribbed masonry vaults: A case study. *Int. J. Archit. Herit.*, *16*(12), 1809-1823.

Lógó, B. A., Vásárhelyi, B. (2023). A zsámbéki Öregtemplom építőanyagának vizsgálata: eset tanulmány. *Építés-Építészettudomány*, *51*(1-2), 25-37.

Lógó, B. A., & Vásárhelyi, B. (2025). Estimation of the constitutive relationship between impact resistance and compressive strength in sandstones, *Periodica Polytechnica Civil Engineering, 69(3), pp. 944–953, https://doi.org/10.3311/PPci.40270.*

5.2 Konferencia kiadványok

Lógó, B. A.; Vásárhelyi, B. (2019b) Parametric Study on the Variable Poisson's Ratio, Workshop on Engineering Optimization, Inst. Fund. Techn. Res., Polish Acad. Sci., 1 p

Lógó B.A.; Lógó J.; Tauzowski P.; Blachowski B., (2019c): Rugalmas-képlékeny anyagú topológiai optimálás változó Poisson tényező felhasználásával, *In: Baksa, Attila; Bertóti, Edgár; Kiss, László; Szirbik, Sándor (szerk.) XIII. Magyar Mechanikai Konferencia, Miskolc-Egyetemváros, Magyarország: Miskolci Egyetem, Műszaki Mechanikai Intézet Paper: 468.*

Lógó B. A., Vásárhelyi B. (2021). Charpy impact test to sedimentary rocks. *In: B. Blachowski and P. Tauzowski (eds.) Book of Abstracts-2nd Workshop on Engineering Optimization, Warsaw*, 89-97.

Lógó B. A.; Bruggi M.; Lógó J. (2022): Computational aspect of a reconstruction of heritage structure built as ribbed masonry vaults, *In: Ivica, Skozrit; Jurica, Soric; Zdenko, Tomkovic (eds.) 10th ICCSM Int. Cong. Croatian Soc. Mechanics : Book of Abstracts, 189-190.*

Lógó B. A.; Vásárhelyi, B. (2022b): Charpy impact test to sedimentary rocks, *In: Coric, Slobodan; Papic, Jovan (eds.) Engineering problems in soft rocks, Skopje, Macedonia: Macedonian Association for Geotechnics. 839-844.*