

M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Falazott kő elemek közötti kapcsolat laboratóriumi vizsgálata

TDK 2023

készítette:

Jáger Balázs ZXTOYC

BSc 4. évfolyam

konzulensek: Dr. Bögöly Gyula

Abstract

Az ipari forradalom előtti, kevésbé fejlett időkben az építőipart még nem hódította meg a portlandcement, így főleg égetett mészsel, illetve hidraulikus mészhabarccsal falaztak. Ezen habarcsok viselkedése merőben eltérő a mai cementhabarcsból, főleg eltérő szilárdságuk és kötési mechanizmusuk miatt. Egy falazat viselkedésének pontos modellezéséhez szükséges a blokkok közötti nyírószilárdsági paraméterek ismerete, és így fontos megvizsgálni, hogy különböző típusú habarcsok, eltérő vastagságban alkalmazva, hogy befolyásolják ezeket az értékeket. In situ vizsgálatok során ezek mérésére nincs lehetőség, és összefalazott blokkok mintavételezése sem könnyen megoldható feladat. Ezen paraméterek meghatározása leginkább laboratóriumi körülmények között lehetséges, kontrollált minőségű próbatestekkel. Jelen kutatás célja a falazókövek közötti kapcsolat viselkedésének leírása, a modellezéshez szükséges paraméterek jellemző értékeinek meghatározása laboratóriumi vizsgálatok segítségével. A kutatás során a már korábban vizsgált 1 cm vastag mészhabarcsra mért adatsort bővítjük, illetve hasonlítjuk össze azonos vastagságú cementhabarccsal, illetve 2 cm vastagságú mészhabarccsal.

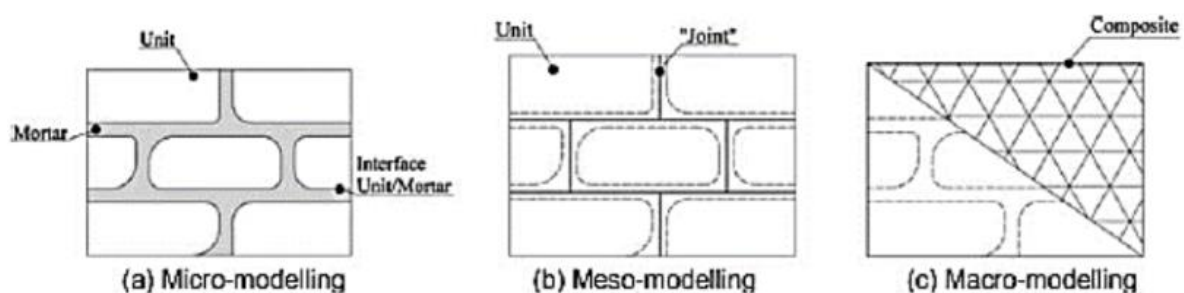
Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
2. Tárgy fontossága	5
3. Célkitűzés	6
4. Irodalmi háttér	6
5. Falazatok jellemzői	8
5.1. Falazati típusok és kötések	8
5.2. Kötőanyagok és fejlődésük	10
6.1. Nyírószilárdság	12
7. A laboratóriumi mérések módszertan	15
7.1. Próbatestek	15
7.1.1. Műkő felület	15
7.1.2. Ágyazat.....	16
7.1.3. Habarcs	17
7.2. Mérés	19
7.2.1. Nyírás	19
7.2.2. Rugalmassági modulus.....	20
8. Mérési eredmények	22
8.1. Nyírószilárdság mérése	22
8.1.1. 1cm vastag mészhabarcs értelmezési tartományának bővítése, illetve pontosításának vizsgálata	23
8.1.2. 2cm vastag mészhabarcs vizsgálata.....	23
8.1.3. 1cm vastag cementhabarcs vizsgálata	25
8.1.4. Tapadási tényező alkalmazása.....	26
8.2. Rugalmassági modulus és Poisson-tényező mérése	28
9. Mérési eredmények felhasználása	32
9.1. Kapcsolat rugalmassági modulusainak meghatározása	32
10. Diskusszió	33

1. Bevezetés

Manapság az építőipari feladatoknak jelentős hányadát teszi ki a már meglévő épületek állagmegóvása, illetve restaurációja, rekonstrukciója. Ennek jó példája a 2021-2024 között zajló citadella felújítása, ahol éppen a dolgozat témájába vágó falazott kőszerkezetek átépítése, felújítása, illetve rekonstrukciója zajlik. Ebben az esetben is statikai kérdés volt az egyes falszakaszok stabilitása és teherbírása, amelynél egy esetben nem tudták pontosan megállapítani a szakasz terhelhetőségét, így kénytelenek voltak lebontani és újat építeni a helyére. Egy másik példája a kőfalazatoknak a budai vár, és az alatta rejlő alagútrendszer. Ezen szerkezetek esetében is fontos a teherbírás, illetve az alakváltozások meghatározása, azonban lévén, hogy meglévő szerkezetekről van szó, sokkal nehezebb feladat.

Mindkét fenti esetben, a kőszerkezetek teherbírásának, illetve alakváltozásának meghatározásához szükség van a falazat mechanikai tulajdonságaira. Többféle egyszerűsítést is alkalmazhatunk, amelyek során a falazatot eltérő pontossággal modellezzük (1. ábra). Ezen modellekhez eltérő bemeneti paraméterek tartoznak, például a mezo-modellnél a falazóelemek, illetve a kapcsolat normál- illetve nyírómerevségére van szükség az alakváltozások számításához. Ezeket a tulajdonságokat, sajnos nem lehetséges in situ vizsgálatokkal meghatározni, mivel nem lehet megfelelően precíz, és megismételhető mintát venni egy falazatból. A helyzet tovább nehezül kis szilárdságú mészhabarcok esetén, ahol gyakorlatilag nincsen húzószilárdsága a habarcsnak, így a kivett minta szétmállik.



1. ábra: Falazatok modellezési lehetőségei [1]

A mintavétel nehézségei miatt laboratóriumi vizsgálatokkal érdemes meghatározni a falazat ezen szilárdsági paramétereit. A paraméterek közül, jelen dolgozat a nyírási jellemzőket célozza meghatározni adott minőségű habarcs esetén.

2. Tárgy fontossága

Ahogy azt fentebb említettem, Magyarországon is számos kőépület található meg, amely felülvizsgálatához szükség van a falazatai pontos teherbírásának meghatározására. Mivel ezek a szerkezetek általában meglehetősen régiek, ezért nagy szükség van erre, a későbbi károk megelőzése érdekében. A szerkezeteknek több hibája is lehet, amelyet szabadszemmel, illetve tapasztalati úton nem mindig lehet meghatározni. Mivel a nyomószilárdságuk meglehetősen nagy, a falazott kőszerkezetek legtöbbször stabilitási, vagy nyírási tönkremenetelt szenvednek. Ilyen például a földrengésre való reakciójuk, amikor is, ha a falazat a síkjára merőleges terhet kap, akkor a kapcsolatok hajlítási, és a felmenő falazat nyírási ellenállása kimerülésekor eldől, jelentősen gyengítve a szerkezet további részeit. [2]. Ezek a szerkezetek továbbá kiemelten érzékenyek a támaszmozgásokra is, illetve magára az építéskor alkalmazott technológiára, ugyanis rendkívül nagy szerepet játszik a falazóblokkok elhelyezkedése a teljes szerkezet viselkedésében. Továbbá ahogy azt az később 6. ábrán is láthattuk a kövek anyagának mállása is nagy szerepet játszik az időben lejátszódó amortizációban, ez a folyamat jellemzően savas környezetben, illetve rossz minőségű építőkö használata esetén jelentkezik. Egy másik jellemző oka a károsodásnak, a szerkezet nem megfelelő toldása, egyéb beavatkozása miatt, ugyanis a modern szerkezetek vegyítése a történelmivel nagymértékű megfontolást igényel. (2. ábra) [3]



2. ábra: Nem megfelelő beavatkozás eredménye a kő falazaton [3]

A felsorolt károk megelőzése érdekében célszerű a szerkezetet valamilyen módon modellezni és ellenőrizni a teherbírását adott állapotban. Ezekhez a modellekhez bemenő adatok szükségesek, amelyek leírják a falazat anyagminőségét, azonban jellemzően csak nehezen és pontatlanul lehet ezeket helyszíni vizsgálatokkal meghatározni. Laboratóriumi vizsgálatokkal már pontosabban tudjuk a falazat mechanikai paramétereit meghatározni legyen

szó bármelyik modelltípusról. Például a fal homogenizálásával járó modell rugalmassági és nyírási modulusának meghatározására számos kísérletet végeztek, amely során eltérő eredményeket kaptak [4]. Ennek a kutatásnak a fő célja a fentebb említett mezo-modell (*1. ábra*) bemenő paramétereinek meghatározása, amelyről kevesebb szakirodalmi cikk lelhető fel.

3. Célkitűzés

A fentebb megállapított okok miatt érdemes vizsgálni a falazott kőszerkezetek kapcsolatainak viselkedését. Ebben a dolgozatban főleg a nyírószilárdsági paramétereket kívánjuk meghatározni, illetve kiegészíteni a korábbi vizsgálatokat. A 2022-es dolgozatomban már meghatároztam egy adott felületen és 1cm vastagság mellett az elemi kapcsolat Mohr-Coulomb egyenesét, ebben a tanulmányban pedig ennek a diagrammnak az értelmezési tartományát céloztam meg bővíteni, illetve ugyan ezen habarcs receptúrájával, azonban 2cm habarcsvastagság mellett vizsgáltam hasonló normálfeszültségi tartományon. Az előző dolgozatomban vizsgált próbaszerű cementhabarcs viselkedése és szilárdsága merőben eltért a mészhabarcsétól, ezért idén az előzővel azonos receptúrával és vastagsággal tovább vizsgáltam a cementhabarccsal összekötött blokkok viselkedését is. A tavalyi 2 mérés eredményével összehasonlítható bővített normálfeszültségtartományon szándékozom meghatározni ennek is a Mohr-Coulomb törési határfeltételét. A nyírószilárdsági vizsgálatok mellett kísérletet teszünk az *1. ábrán* látható modellek más bemenő paramétereinek meghatározására is, például a normál és a nyírómerevség laboratóriumi vizsgálatára is sor kerül.

4. Irodalmi háttér

Több jelentős műemléki épület is épült terméskőből, azonban leggyakrabban mégis a helyi adottságoknak köszönhetően építenek követ a szerkezeteikbe a helyiek. Ez jellemzően a Dunántúli-, illetve az Északi-középhegységben fordul elő. Remek példa erre Alsóörs, ahol a faluközpontban számos vörös homokkő támfal fordul elő, illetve több épület is ebből az anyagból épült, továbbá gyakoriak az alárendelt szerkezetek, mint kerítés, vagy utcakövezet [5]. Ezek a tájakon a középkor- és újkori várépítészetben is döntő többségben ez az anyag fordult elő, mivel egyszerű volt nagyobb mennyiségben beszerezni, illetve a belőlük készült vastag falazatok rendkívül ellenállóak a támadásoknak. Ilyen például Csókakő vára, amely a szintén a helyi adottságoknak megfelelően, mészkőből, illetve dolomitból épült (*4 ábra*).

További megjelenési formája a kőnek az épületeinkben az egy-egy tartószerkezeti elemet helyettesítése, jellemzően a kőben gazdag tájegységeken. Gyakran a legnagyobb terhet

viselő lábazati falakat építik kőből (3. ábra), illetve gyakoriak a vegyesfalazatok is, amelyekkel egyes kultúrák képesek voltak változatosabbnál változatosabb homlokzatokat képezni (5. ábra). Ezen vegyes falazatok viselkedése azonban sokkal bonyolultabb, ezért jelen dolgozatban nem részletezem.



3. ábra: Arnaudovi háza, Ohrid
(Észak-Macedónia)



4. ábra: Csókakő vára



5. ábra: Szent Szófia templom, Ohrid



6. ábra: Mállott mészkő falazat, Isla)

Gyakori előfordulásuk miatt hazánkban is fontos a falazott kőszerkezetek vizsgálata, azonban még az egyszerűbb terméskőfalazatok esetén sem magától értetődő a szerkezetek vizsgálatának módja. A falazat mechanikai modelljét tekintve inhomogén, anizotróp anyagként lehet jellemezni, amely két, élesen elkülönülő anyagból áll, ezek a kötőanyag (jellemzően valamilyen habarcs), illetve a falazóelem, a kő. Míg a kötőanyag, amely általában mész-, vagy hidraulikus mészhabarcs meglehetősen kis szilárdságú, addig a falazókövek nyomószilárdsága a 140-160 MPa-t is elérheti. Lévén, hogy megépült szerkezetről van szó, és általában nem fellelhetőek az eredeti tervek, nincs információnk a felhasznált alapanyagokról, vagy a pontos technológiáról. Ezt például egy vasbeton szerkezetenél könnyű orvosolni helyszíni mintavétellel, illetve más, roncsolásmentes, például ultrahangos vizsgálati módszerrel, azonban ez nem kivitelezhető kőből készült falazatok esetében. Ennek oka először is a szerkezet inhomogenitása, emiatt nem biztos, hogy megfelelően reprezentatív helyen kerül sor a mintavételre, másodsor is pedig a kisebb szilárdságú mészhabarcs esetén a fűrt magminta egyszerűen szétmállik. Ezen kívül, egy megkérdőjelezhető teherbírású falazat esetén nem célszerű megbolygatni a szerkezet beállt egyensúlyát magminta vétellel. A roncsolásmentes vizsgálatok lennének a legjobb megoldás, azonban ezek pontosságának kalibrálásához meglehetősen sok idő és energia kell, több vizsgálatot igényelnek, illetve a hozzá szükséges eszközök sem állnak rendelkezésre a legtöbb esetben [6].

5. Falazatok jellemzői

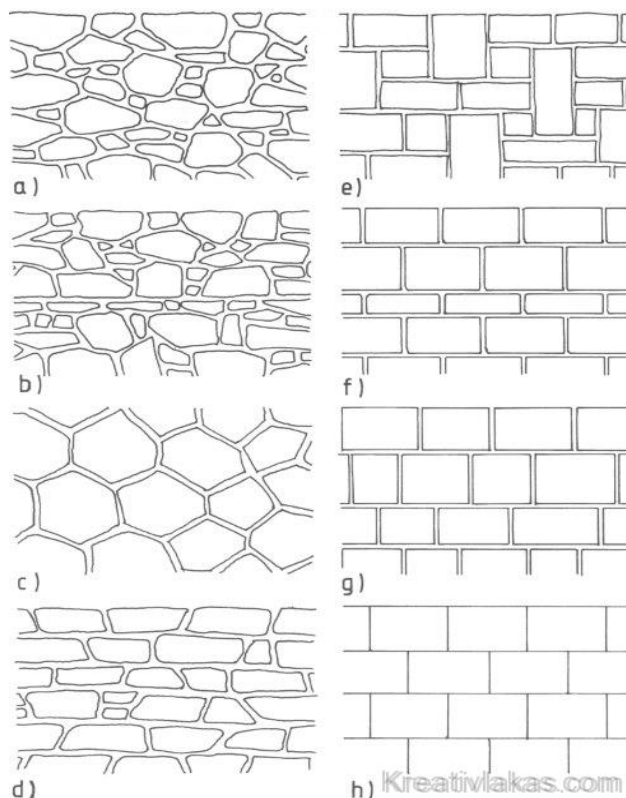
5.1. Falazati típusok és kötéseik

A történelem során a környezeti erőforrásoktól, fennálló követelményektől és kultúráktól függően többféle kő falazási mód is kialakult, ezek mindegyike az adott lehetőségekhez illeszkedett. A legegyszerűbb, és általában alárendelt szerkezeteknél megtalálható falazati típus a szárazon rakott falazat, amely a durva, megmunkálatlan, lehetőleg lapos kődarabokat kapcsolja egymáshoz a felület érdességével. Ennek a továbbfejlesztése a továbbra is szabálytalan alakú és kötésű falazat, azonban itt már található valamilyen habarcs a blokkok között. Jellemzően nagyobb szerkezetek, várfalak, vagy kerítések esetén használtak ilyen típusú terméskő falazatot.

A kő megmunkálásával már jelentősen javul mind a falazat minősége, mint az építésének az ideje. A megmunkálás hatására sokkal könnyebb lett sávosan kialakítani a falazatot, így egy fokkal kevésbé lett anizotróp a szerkezet, és kevesebb gyenge pontja lett.

Jelen dolgozatban ezekkel a falazatokkal foglalkoztam, a választott köfelület nagyjából ennek a megmunkálási szintnek felel meg.

A megmunkálás minőségének a növelésével pedig közel sima felületeket, illetve derékszögeket is sikerült kialakítaniuk a kőműveseknek, ezzel szabályos falazóblokkokat állítottak elő. Ezek a lehető legrszabályosabb szerkezetek, azonos méretű blokkokból készültek, azonban ennek a következtében jelentősen csökken a nyírószilárdságuk és az együtt dolgozásuk. Ennek megoldására falkötővasakat helyeztek el a kötőmőkben, így növelve az elemek közötti kapcsolat minőségét. [7]



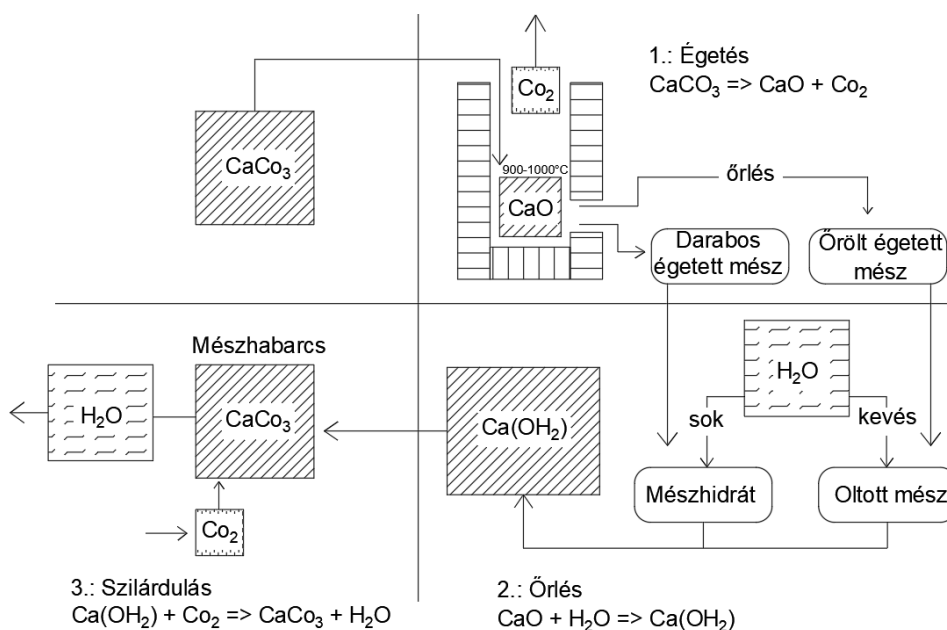
6. ábra: Kő falazatok topológiája [8]

Ezeken felül létezett néhány általános szabály a falazatok kötéseivel kapcsolatban. Ilyen volt például, hogy nem kerülhetett két vertikális hézag egymás fölé, illetve adott távolságban olyan falazóblokkokat kellett alkalmazni, amely a falazat teljes szélességén áthatol, így segítve a két oldal együtt dolgozását. További jellegzetessége ezen falazatoknak, hogy a sarkoknál, illetve a lábazatnál jellemzően nagyobb kötőmőköt használtak, előbbi helyen a sorok szabályossága miatt, utóbbi helyen pedig a nagyobb igénybevételek szabályosabb felvétele miatt. Továbbá üledékes kőzetek esetén a rétegződésre merőlegesen kell átadniuk a blokkoknak a terhet. [7]

a) közönséges; b) kiegyenlítő réteges; c) sokszögű (ciklop); d) réteges; e) szabályos váltósoros; f) szabályos soros; g) szabályos (kváder), eltérő rétegvastagsággal; h) szabályos (kváder) homlokzati.

5.2. Kötőanyagok és fejlődésük

Az épített szerkezeteink fejlődése már az őskortól indult, amikor is a legegyszerűbben előállítható nyersanyag a kő volt, ennek eredményül kötőanyag nélküli szerkezeteket építettek, úgynevezett szárazon rakott falazatokat építettek. Ekkoriban a reprezentatív épületek szerepét a megalitikus építészet foglalta el, majd a technológia fejlődésével az ember megtanult habarcsot készíteni különböző alapanyagokból. Ez nagy előrelépést jelentett, ugyanis a habarccsal nagyobb és összetettebb szerkezeteket tudtak építeni. Magának a habarcsnak az alapanyaga égetett mész volt, illetve esetenként alkalmaztak vulkáni tufa örleményét, amely segítségével a kapott habarcs nagyobb szilárdságú lett, illetve hidraulikus tulajdonsággal is rendelkezett. Ezt a kötőanyagot használták egészen a 18. századig, így számos elegáns épület áll még ma is, amelyben mészhabarcsot alkalmaztak. A mészhabarcs kötési folyamatát a mész körfolyamata jellemzi, ami a mész égetésével kezdődik, majd oltásával és kötésével fejeződik be. A hidraulikus mészhabarcsot is hasonló folyamat jellemzi, csupán az égetés és a kötési folyamata más körülmények között zajlik, míg a mészhabarcs levegőn köt, addig a hidraulikus mészhabarcsnak nincs szüksége levegőre a kötéshez.



7. ábra: Mész körfolyamat [9]

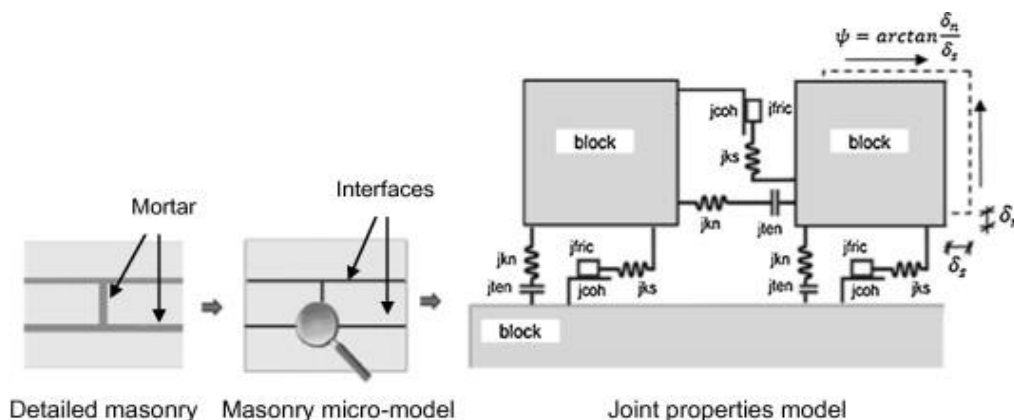
Ezt a kötőanyagot legjobban az egyszerűsége jellemzi, ugyanis olcsó és meglehetősen könnyű hozzájutni, emellett azonban a cementnél kissé lassabb a kötési ideje, illetve jelentősen kisebb a mind a nyomó, mind a nyírószilárdsága, húzószilárdsága pedig gyakorlatilag 0-val egyenlő. A mai gyakorlatban leginkább műemléki szerkezetekben használják, ahol kedvező hatással van

a savas vizek vándorlásában, illetve a kitett felületeken is jobban alkalmazkodik a történelmi kő szerkezetek működéséhez. [10]

Egészen az ipari forradalomig az uralkodó kötőanyag a mész vagy hidraulikus mészhabarcs volt. A portlandcement feltalálásával és a technológia fejlődésével azonban már utóbbi habarcs vált elterjedté, és mészhabarcsot csak alárendelt épületek esetén, illetve speciális esetekben használtak. A térhódítását főleg a rendkívül nagy szilárdsága okozta, illetve elterjedésével fejlődött a betonipar és idővel a vasbeton szerkezetek jobb ismeretével nagyobb teherbírású és fesztávú épületeket tudtak építeni. A portlandcement előállítását tekintve hasonló a mészhidrátéhoz, azonban itt márgát és más agyagtartalmú mészkövet égetnek ki zsugorodási hőmérsékleten (1400-1500°C), amely során klinkerásványok keletkeznek. Eltérő az alapanyag összetétele és aránya függvényében keletkeznek az egyes cementtípusok. A végtermék tulajdonságát legfőképpen a klinkerásványok határozzák meg, az Alit (trikalcium-szilikát), amely a nagy kezdőszilárdságot felel meg, Belit (dikalcium-szili), amely a nagyobb végszilárdságot felel meg, illetve még sok más klinker, mint a Felit vagy a Celit. [9]

6. Elméleti módszertan

Többféle módon is modellezhetőek. Nevezetesen a mikro- mezo- és makro modellel (*I. ábra*). A mikromodell az egyes falazóelemeket és a köztük lévő kötőanyagot is pontosan, testként modellezi, azonban a megfelelő modellezéshez nagyon sok paraméterre van szükség, így nehéz a megvalósítani. A mezo modellben az falazóblokkok diszkrét elemként vannak modellezve, míg a habarcs pedig az elemek közötti kapcsolatként van jelen a modellben. A makromodellben pedig a teljes falazat egy kontinuummal van reprezentálva, amely anyagi modelljébe beletartozik az anizotrópia is [1].



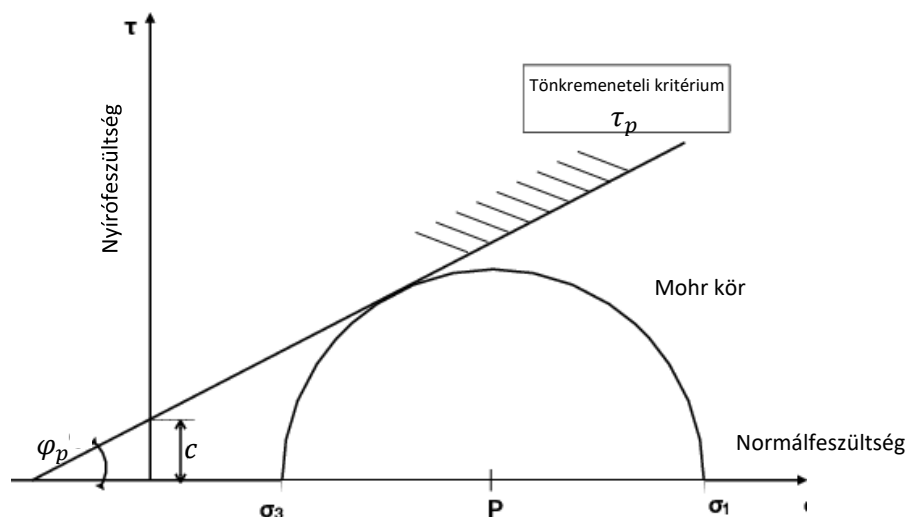
7. ábra: Falazóblokkok közti kapcsolat mechanikai modellje [1]

Ebben a dolgozatban a mezo-modellt vesszük alapul, ehhez határozunk meg adatokat. Ezen modell esetén hasonló paramétereket kell meghatározni a kapcsolat, illetve a diszkrét elemek esetén is. A diszkrét elem, azaz a falazóblokk tulajdonságait még lehetséges roncsolásmentes módszerrel közelíteni, azonban a blokkok közti kapcsolatot már nem. Ezen kapcsolat mechanikai modelljét az alábbi 7. ábra szemlélteti, itt látható, hogy többféle paraméter is befolyásolja a falazóblokkok viselkedését, ezen tanulmányunk a célja ilyen nyírási paraméterek meghatározása.

6.1. Nyírószilárdság

Amint már azt korábban említettem, olyan mechanikai modellhez határozunk meg bemenő paramétereket, amelyben egy diszkrét elem, illetve ezek kapcsolati felülete határozza meg a falazat viselkedését.

Ezt az elméletet Charles-Augustin de Coulomb és Christian Otto Mohr dolgozták ki 1778-ban, amelynek a lényege, hogy felületek mentén való nyírás a kapcsolat súrlódási szögétől, illetve kohéziójától függ. A későbbiekben több, pontosabb modell is született, amelyek már a kohézióval rendelkező kapcsolatokat is magába foglalják. Ezen elmélet felhasználásával számítható egy tönkremeneteli kritérium, amely bemenő paramétere a kapcsolat súrlódási szöge, illetve kohéziója (egyenes meredeksége és a nyírófeszültség tengely metszése a 0 pontban, 8. ábra).



8. ábra: Mohr-Coulomb egyenes

Az előbbi elmélet alapján meghatározható a tönkremenetel, az alábbi (1) egyenlettel:

$$\tau_p = \sigma_n * \tan\varphi_p + c \quad (1.)$$

ahol: c - a kapcsolat kohéziója,
 φ_p - a kapcsolat belső súrlódási szöge,
 σ_n - a tönkremenetelhez tartozó normálerő
 τ_p - a tönkremenetelhez tartozó nyíróerő

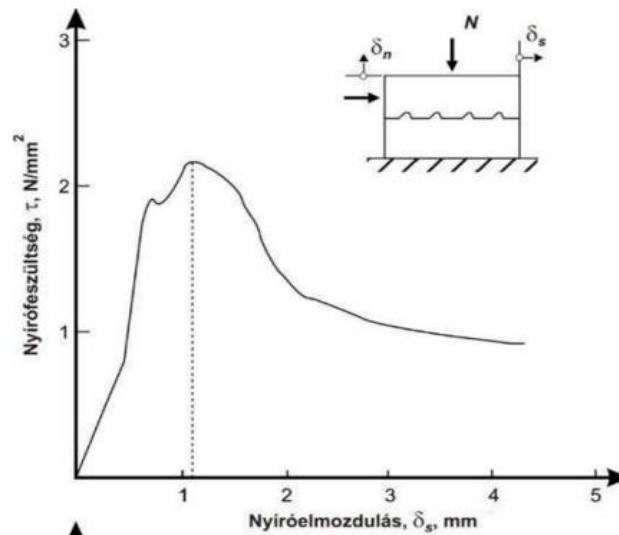
Azonban ez az egyenlet nem írja le a kapcsolat ezt követő viselkedését, ehhez a reziduális, megmaradó szilárdságra van szükség, amelyet a hasonló (2.) egyenlet szemléltet:

$$\tau_r = \sigma_n * \tan\varphi_r \quad (2.)$$

ahol: φ_r - a kapcsolat megmaradó belső
súrlódási szöge,
 σ_n - a tönkremenetelhez tartozó normálerő
 τ_r - a megmaradó nyírószilárdság adott
normálerő mellett

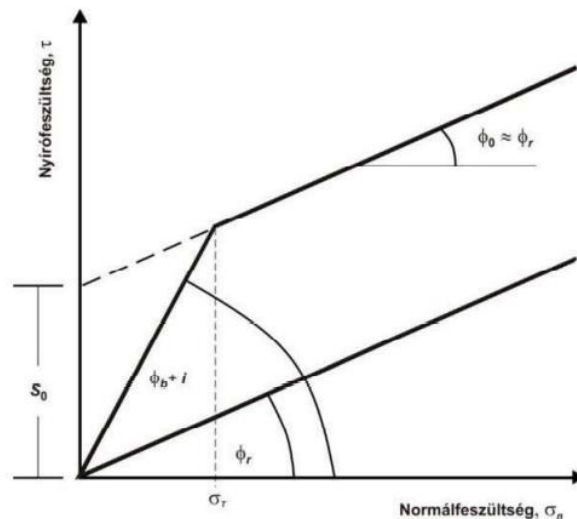
Ezt a mechanikai modellt a gyakorlati alkalmazásban igazolták, így megfelelően lehet alkalmazni is a vizsgált elemi kapcsolatok leírására. A reziduális állapotban már megszűnik az anyagi folytonosság, így eltűnik a kohézió, és már csak a roncsolt felület lecsökkent súrlódási szöge marad meg. [12]

A kőfelületek közötti kapcsolat jobb megértéséhez, azonban nem elegendő a súrlódási szög, illetve a kohézió. Az eredeti Mohr-Coulomb egyenes sima felületeket végzett vizsgálatok eredménye volt, azonban ahogy azt később láthatjuk, az érdekes kapcsolatok nyírószilárdságában szerepe van a felületek érdességének, illetve szilárdságának is. Az *.9 ábrán* jól látszik, hogy a nyírt felületet alkotó „fogak” egymásba illeszkednek a nyírás kezdetekor, ekkor még kvázi lineárisan nő a nyíróerő, majd eléri a nyírt fogak maximális igénybevételét. Ekkor a fogak elnyíródnak, illetve elcsúsznak egymáson, ennek következtében csökken a nyíróerő, majd beáll egy megmaradó, reziduális értékre, amelynél azonos nyíróerő mellett növekszik az elmozdulás. Habarccsal összekötött felületek esetében is hasonló a viselkedése a kapcsolatnak, azonban ekkor nem elnyíródnak a fogak, hanem elmorzsolódik a mészhabarcs, cementhabarcs esetén pedig egyszerűen leválik a kapcsolódó elemekről. (lásd későbbi vizsgálati eredmények).



9. ábra: Nyírási vizsgálat eredményeül kapott erő-elmozdulás diagramm

Patton modell: Az egyik ilyen összetettebb modell, ami más tényezőket is figyelembe vesz a Patton-modell, amely működési elvét az alábbi 10. ábra szemléltet. Itt már megjelenik az előző 10. ábrán látható fogak miatt okozott mechanizmus, miszerint eleinte nagyobb meredekséggel növekszik a nyírószilárdság, majd a fogak elmozdulása pillanatától egy csökkent meredekségű egyenes jelenik meg, azaz itt már azonos normálerő növelésével sokkal kisebb növekedést mutat a nyíróerő. Ez a bilineáris görbe már számításba veszi a fogak elnyírását, azonban még továbbra is csak a belső súrlódási szöggel számol. [12]



10. ábra: Patton modell bilineáris görbéje

Barton modell: Barton több paramétert is figyelembe vevő modell dolgozott ki, aminek a segítségével már a felületek érdessége és szilárdsága is része a számításnak [12]. Ennek a kritériumnak a számítását a (3.) egyenlet adja meg:

$$\tau_p = \sigma'_n \tan(\varphi_b + JRC \log_{10}) \quad (3.)$$

ahol: σ'_n - a tönkrementelhez tartozó normálfeszültség

φ_b - az eddig is láthatott belső súrlódási szög

JRC - a kapcsolat felületének érdessége

JCS - a kapcsolat nyomószilárdsága

7. A laboratóriumi mérések módszertan

A méréseket a nemzetközi ISRM szervezet ajánlása alapján végeztük el [13], figyelve a nyírási sebességre, a nyírt felület ágyazási mélységére, illetve az eredményül kapott görbe jellege is megfelelt ezeknek a követelményeknek. A vizsgálat során két, nagyjából 6540mm² névleges területű kő utánzatú felületet kötöttem össze habarccsal, majd nyírtam el, mérve a nyíróerőt és a nyírási eltolódást, illetve a normálerőt másodpercenként 10 alkalommal a Catman program segítségével. A kapott eredményekből egyenként ábrázoltam a normál és a nyírófeszültséget egy skálán az alakváltozás függvényében. Ezen adatsorokból leolvastam a maximális nyírófeszültséghez tartozó normálfeszültséget és azt tekintetem a tönkrementel pillanatának. Erre azért volt szükség, mivel ahogy azt később láthatjuk, a mészhabarcs esetén nem volt teljesen egyértelmű a tönkrementel pillanata. A kapott nyírófeszültségeket ábrázoltam a normálfeszültség függvényében, és lineáris regresszióval egyenest illeszttem a kapott pontokra. Ez az egyenes jelenti az adott falazott kapcsolat tönkrementeli kritériumát, ha ezen egyenes felett helyezkedik el a vizsgált falazat feszültségi állapota, túllépte a nyírási teherbírását és el fog nyíródni.

7.1. Próbatetek

A vizsgálatához speciális próbateteket kellett készítenem, ugyanis a rendelkezésünkre álló nyírógépbe egy speciális trapézalakú ágyazattal lehet csak elhelyezni a vizsgálni kívánt felületet. Ezen próbatetek laboratóriumi körülmények között lettek előállítva, azonos felületi érdességgel, szilárdsággal, illetve mérettel, hogy ezek a tulajdonságok ne befolyásolják a vizsgálati eredményeket.

7.1.1. Működő felület

A felület elkészítéséhez egy szilikonmintát használtam, amely eredetileg Vattai Alina kutatásaiból [14] származik. Ez a nyomat egy homokkő törésfelületének enyhén módosított

változata, amelynél a két felület nem pontosan egyezik, hanem valós kőfelület révén illeszkednek egymáshoz kisebb hézaggal. A szilikon forma köré fa kaloda került és ebben került kiöntésre a nyírási felület. A felület ellenőrzött minőségű, eredetileg meghatározott JRC=8-as értékűnek tekinthető, ahogy azt még a 2022-es dolgozatomban is feltüntettem. Barton fésűvel lemértem a próbatest felületének érdességét, és a referenciafelületekkel összevetve hasonlóan 8-as értéket eredményezett a vizsgálat.

Anyagát tekintve cementhabarcs, amelyhez CEM I 52,5 N minőségű cementből, illetve 0-4mm szemeloszlású homokból és vízből. A pontos receptúra tömegszázalékban mérve 59% homok, 27% cement, illetve 14% víz. Mivel csak egy darab ilyen sablonom volt, ezért a próbatestek gyártásának ez volt a legidőigényesebb része. A kizsaluzást követően 1 hétig víz alatt voltak tárolva, majd laboratóriumi levegőn, hogy megfelelő szilárdságúak legyenek. Mivel ebben a kutatásban én magam készítettem el a felületeket, ezért volt lehetőségem ellenőrizni annak a szilárdságát is, amelyet, mivel minden egyes felületpárt más alkalommal készítettem, minden alkalommal 3-3 darab 3x3x3cm méretű kockát öntöttem referenciaként. Ezen próbatestek eredményeit a melléklet táblázatai tartalmazzák. A mérésekből megállapítható, hogy átlagosan 63,34 MPa nyomószilárdságú az ágyazat, illetve ezeknek az eredményeknek a szórása 3,56.

7.1.2. Ágyazat

Az ágyazatnak már kisebb szerepe van a próbatest működésében, csupán a beleágyazott felületet hivatott megtartani a helyén és beleilleszkedni a nyírógépbe. Mivel az ágyazati része a próbatestnek sokkal nagyobb volt, mint az beágyazott felület és nem kellett olyan finom geometriát követnie, ezért az adalékanyag 1/3-át 4-8mm átmérőjű kavicsal helyettesítettem. A pontos receptúra alapján, tömegszázalékosan 66% adalékanyag (44% 0-4mm homok, 22% 4-8mm kavics), 22% CEM I 52,5 N cement, illetve 11% víz. Ebbe a receptúrába már kellett kis mennyiségű folyósító adalékszert kevernem, hogy jól tömöríthető legyen a próbatestem, ugyanis fontos, hogy a beágyazott felületet minden oldalról hiány nélkül megfogja. Ennek az elemnek is készültek ellenőrző referenciapróbatestek, két méretben is, mivel ebben a receptúrában már vannak kavicsok is, ezért a mérethatás már jelentős lehet. Emiatt nem csak 3 centiméter élhosszúságú kockákat készítettem, hanem 5 centimétereseket is. Ezeket természetesen a méretüknek megfelelő terhelési sebességgel törtem össze, a próbatesteket. Ez a terhelési sebességet az MSZ 4798:2016 visszavont szabvány alapján számoltam, a 150 mm élhosszúságú kocka 11.25 kN/sec terhelési sebességét felületarányosítottam a jelen

vizsgálatban meglévő 30, illetve 50 mm élhosszúságú kockákra. Ez azt jelenti, hogy a $150 \times 150 = 11,25$ kN/sec terhelési sebességet 1 mm^2 felületre véve $0,5 \text{ N/sec/mm}^2$ sebességet kapunk. A vizsgálatban használt próbatestekre arányosítva $30 \times 30 \times 0,5 = 450 \text{ N/sec}$, illetve $50 \times 50 \times 0,5 = 1250 \text{ N/sec}$ terhelési sebességet kapunk. Az így meghatározott szilárdságok:

1. táblázat: *Próbatestek nyomószilárdsága*

Próbatest mérete	Átlagos Nyomószilárdság [N/ mm ²]	Átlagos szórás [-]
30x30x30	64,11	2,77
50x50x50	62,03	3,94

7.1.3. Habarcs

A végső eleme a próbatestnek maga a felületeket összekötő habarcs. Ez a vizsgálataink során elsődlegesen mészhabarcs volt, azonban cementhabarccsal is végeztünk vizsgálatokat. A próbatest ezen részén a felülethez hasonlóan nagy hangsúly van, ugyanis, ahogy az eredményeken láthatjuk nagy hatással van a fuga kitöltőanyagának a teljes szerkezet viselkedésére. Mivel mind a cement, mind a mészhabarcsokat egy-egy keverésből alakítottam ki, így kisebb a referenciapróbatestek száma, azonban mivel egy alkalommal készült az összes próbatest, ezért kisebb lehetőség van az anyagminőség valós változására is. A két működő felületet egy patkó alakú zsaluval tudtam összekötni, amely biztosította a próbatest síkjainak párhuzamosságát és megakadályozta a két fél összenyomódását az önsúlyuk alatt. Az összeállítás folyamatát *11-14. ábrák* szemléltetik, ahogy először a zárt zsalut megtöltjük, majd összeillesztjük a két felet. Ha ez sikerült, akkor vízszintesre kell igazítani a felső elemet, a zsalu kinyitásával és a felesleges habarcs eltávolításával, majd amikor ez sikerült, visszazárni.



11. ábra: Próbatesszaluval kitöltés előtt



12. ábra: Próbatesszálhabarccsal kitöltve



13. ábra: Pontosan illesztett felső elem



14. ábra: Az illesztett próbatesszal 4. falának kiegyenlítése

Elsőnek a mészhabarcs kötésű próbatesszaleket készítettem el, ehhez a korábbi TDK munkámban alkalmazott receptúrát használtam, itt a kőművesi gyakorlat alapján vettem az arányokat. Ekkor térfogatarányosan 60% 0-4 mm szemcse nagyságú homokból, 20% mészhidrátból, illetve 20% vízből állt a keverék. Ennek a keveréknek a szilárdsága megegyezett a korábbi méréseknél megfigyelttel, azaz jelen vizsgálat sorozat felhasználható a korábbi méréseim bővítésére.

Másodjára pedig a cementhabarcsra került a sor, ennek a keveréknek a receptúrája is azonos az egy évvel. Ez a recept tömegszázalékosan 65% 0-4mm átmérőjű homok, 22 CEM I 42,5 N cement, illetve 13% vizet tartalmaz. A referenciaprobatesszalek kiértékelésekor szintén hasonló eredményeket kaptunk az egy évvel ezelőttiekhez, tehát kijelenthető, hogy az idej

mérések azonos anyaggal zajlottak az előzőhöz képest. Átlagos nyomószilárdságuk $26,39 \text{ N/mm}^2$, 1,41-es szórással.

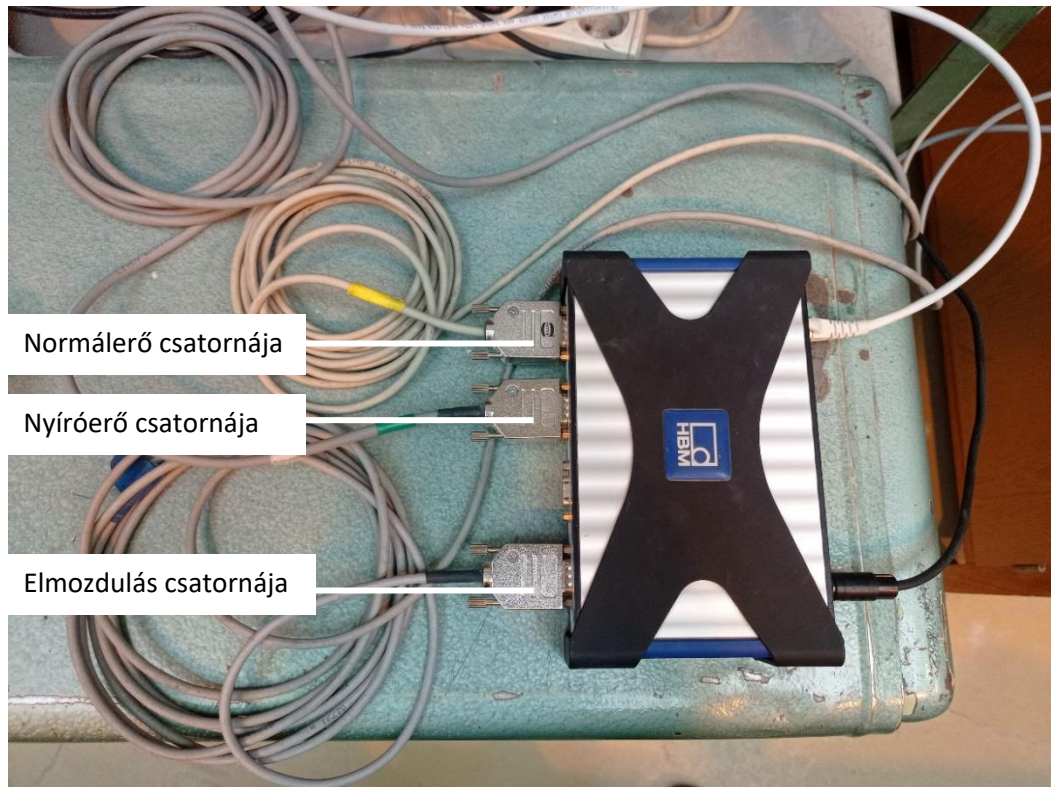
7.2. Mérés

7.2.1. Nyírás

A mérést az 15. ábrán látható nyírógéppel hajtottuk végre, amely elvégzéséhez két ember szükséges. A szerkezet két hidraulikus és egy pneumatikus pumpával működik, ezek adják rá a próbatestre a normál, illetve a nyíróerőket. A hidraulikus pumpákra kötött eltolódó hengerek adják rá az erőt a próbatestre úgy, hogy pászmákkal az ellentétes oldalához vannak rögzítve, így, ha például a normálerőt ráadó henger eltolódik, jobban rászorítja a felső pászmát a szerkezetre. A pászma és a henger között található az erőmérő cella, amely precízen a benne lévő szál alakváltozásából következő ellenállás megváltozásából tudja mérni a cella deformációját, illetve a ráható erőt. Az erőmérőkön kívül egy elmozdulásmérő is található a műszeren, amely segítségével a próbatest nyírási alakváltozását tudjuk mérni. Ezek a mérőműszerek egy QuantumX mérésadatgyűjtőn (16. ábra) keresztül kerülnek továbbításra a számítógépbe, amelyben a Catman program segítségével valós időben gyűjtöttük az elmozdulás, illetve az erőkről mért adatokat.



15. ábra : Nyírógép részei



16. ábra: QuantumX DAQ adatgyűjtő

7.2.2. Rugalmassági modulus

A rugalmassági modulus mérését betonra az MSZ EN 13412:2007 szabvány írja elő, amely szerint ciklikus felterheléssel mérhető a beton húrmodulusa, azonban ez a szabvány nem terjed ki habarcsok hasonló vizsgálatára. Egységes előírás hiányában, ami megszabná a mérés folyamatát, jelen dolgozatban meglévő kísérletekre hagyatkoztunk. Több tanulmányt is megvizsgálva van néhány olyan vizsgálati mód, amivel pontosan közelíthető az anyag rugalmassági modulusa, illetve a Poisson-tényezője. Az alábbi [15] kutatást, illetve a fentebb említett szabványt vettük alapul, ahol 40x40x160 mm méretű hasábokon végeztek méréseket, amelyek mész, hidraulikus mész, illetve cement kötőanyagúak voltak. A kutatásból többek között az is kiderül, hogy az időnek a legtöbb anyagnál kis ráhatása van a rugalmassági modulus, illetve a szilárdságra is 1 hét eltelte után. A legfontosabb számunkra azonban a mérési metodika, amely szerint a hasábot a nyomógépbe kell helyezni, és először egy kis, 100-500 N értékű terhet ráengedni, amely beállítja a kezdeti állapotra. Ezt követően fel kell terhelni a próbatestek nyomószilárdságának mészhabarcs esetén 33%-ra, cementhabarcs esetén 50%-ra. Ha a két oldalt elhelyezett eltolódásmérő mért értékének a különbsége nagyobb, mint a teljes összenyomódás 25%, akkor a mérést újra kell kezdeni, és megfordítani a próbatestet. Ha a haránt irányú eltolódások különbsége ezen értéken belül van, akkor teljesen leterheljük, és még háromszor megismételjük a 33% vagy 50%-ra való felterhelést. Ezt a mérési sorozatot minden

egyek hasábon el kell végezni, hogy a rugalmassági modulus minél kisebb szórással meg lehessen határozni.

A mérést az alábbi 17-18. ábrákon látható géppel végeztük, amelyen egy nyomógép, illetve az adatokat továbbító QuantumX látható. Maga a nyomógép kézi vezérlésű, ezért pontosan kellett konstans terhelési sebességet beállítani a megfelelően lassú méréshez. A rugalmassági modulus méréséhez a normálirányú elmozdulást 3 elmozdulásmérővel mértük, amelyek átlagaként állt elő a normálirányú eltolódás, majd alakváltozás. A normálerőt a nyomógép aljára erősített cellával mértük, a keresztirányú eltolódásokat pedig szintén elmozdulásmérőkkel határoztuk meg, amit a próbatest két ellentétes oldalára rögzítettünk úgy, hogy ne a bedolgozási felületen mérjünk. A Poisson-tényező meghatározásához hasonló módon a két eltolódásmérő átlagát vettük keresztirányú elmozdulásnak. Ezeket összegezve már 6 csatornán kapunk mérési eredményt, így két QuantumX adatgyűjtőt kellett használnunk, amit egy routerrel kötöttünk össze egymással, illetve a méréseket feldolgozó számítógéppel. A számítógépen CatmanEasy program segítségével követtük valós időben a keletkező normálerőt, illetve normálirányú elmozdulást. A kapott adatsort Excel segítségével dolgoztuk fel és értékeltük ki.



17. ábra: Próbatest mérés közben



18. ábra: Mérési adatokat továbbító adattároló

8. Mérési eredmények

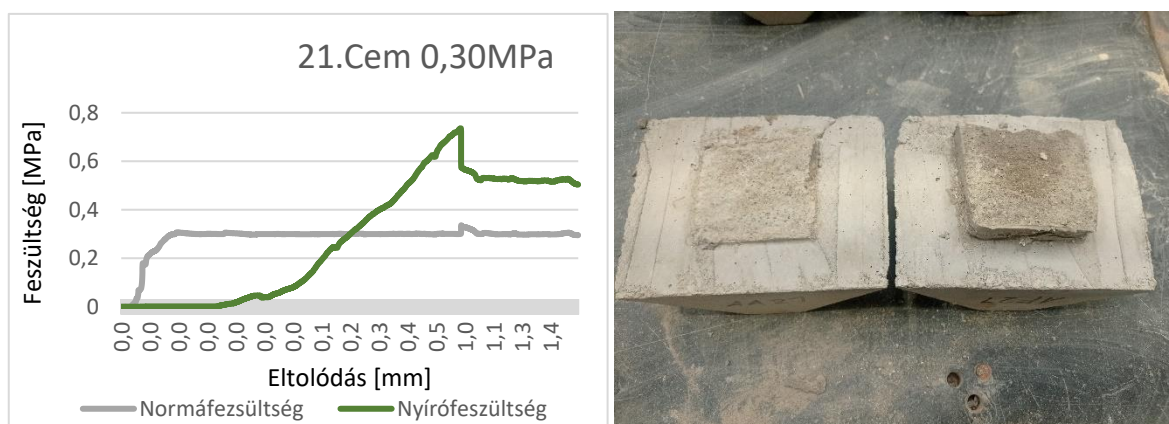
8.1. Nyírószilárdság mérése

A fentebb leírt mérési módot mind a mész, mind a cementhabarcsra alkalmaztuk, és ahogy azt már korábban láthattuk, merőben eltérő volt a viselkedése a két habarccsal kialakított kapcsolatnak. A mészhabarcs kis szilárdsága miatt jellemzően parabolikus függvény szerint nőtt a feszültség az elmozdulás függvényében (19. ábra) és a tönkremenetel is a habarcs elmorzsolódásával jött létre.

A cementhabarcs esetében a nagyobb szilárdság miatt ridegebb viselkedés volt a jellemző, itt a lineárisan növekvő rugalmas szakasz után hirtelen ugrásszerűen csökkent le a nyírófeszültség a két felület elválása után (20. ábra). A tönkremenetel után még mérhető volt a levált felületek közti súrlódásból adódó szilárdság, így a reziduális szakaszt is meg lehetett határozni a mérésekből.



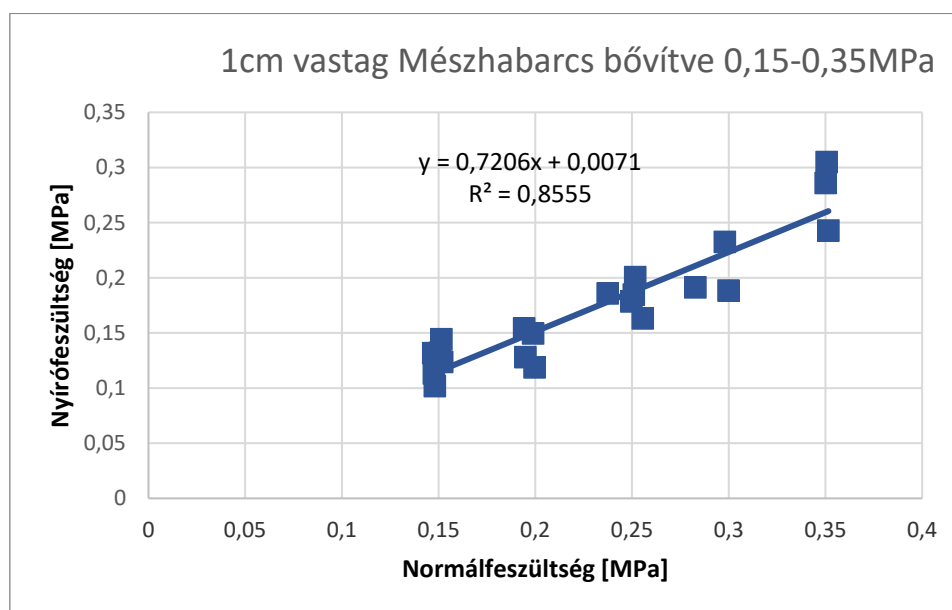
19. ábra: Mészhabarcs kapcsolatú próbatest jellemző tönkremeneteli módja



20. ábra: Cementhabarcs kapcsolat jellemző tönkremeneteli

8.1.1. 1cm vastag mészhabarcs értelmezési tartományának bővítése, illetve pontosításának vizsgálata

Elsőnek az 1cm vastagságú mészhabarcsok kerültek elnyírásra, itt a vizsgálatok célja a 2022-es mérések megerősítése, illetve ellenőrzése, hogy az idei saját készítésű próbatestekkel, illetve receptúrával is azonos eredményekre jutunk. Ezt sikeresen el is értük, mivel a 0,25, illetve 0,30 MPa normálfeszültségen végzett vizsgálatok hasonló értékeket adtak az egy évvel korábbiakhoz. Ennek következtében felhasználhatóak az idei mérések a tavaly vizsgált tartomány kiegészítéséhez és bővítéséhez. Az idei görbét 21. ábrán látható diagrammok mutatják. Ezeken jól látszik, hogy az eredmények számának növekedésével a c érték, a kapcsolat adhéziós mérőszáma egyre jobban tart a nullához. Ez is jól mutatja, hogy mészhabarcsok esetén a kapcsolat gyakorlatilag zérus tapadószilárdsággal rendelkezik. Továbbá az R^2 értékén is látható a növekedés, azaz az illesztett egyenes jobban kapcsolódik az egyes mérési pontokhoz.

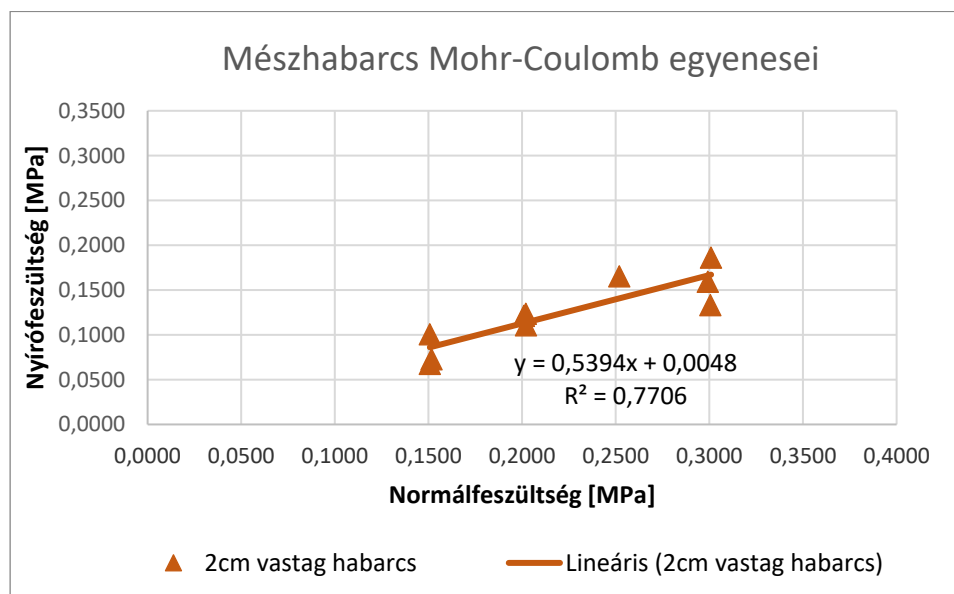


21. ábra: Kiegészített 1cm vastag mészhabarcs kapcsolat törési határgörbéje

8.1.2. 2cm vastag mészhabarcs vizsgálata

Az előbbieken mért nyírószilárdsági vizsgálatot elvégeztük azonos anyagminőségű és felületű próbatesteken, de 2 cm vastag habarccsal is. Szemlélet alapján a vizsgálati eredményekkel szembeni elvárás azt diktálta, hogy még ismeretlen mértékben, de mindenképpen kisebb szilárdságot kell mérni a vastagabb habarcon. Itt már nagyobb szerepe van a mérethatásnak, amiből kifolyólag több anyagi hiba lehet a próbatestben, illetve a feszültségek is hosszabb úton kerülnek át a próbatest egyik oldaláról a másikra. Ez a sejtés beigazolódott, ugyanis a 2 cm vastag habarcs nyírási tönkremeneteli kritériumát leíró egyenes

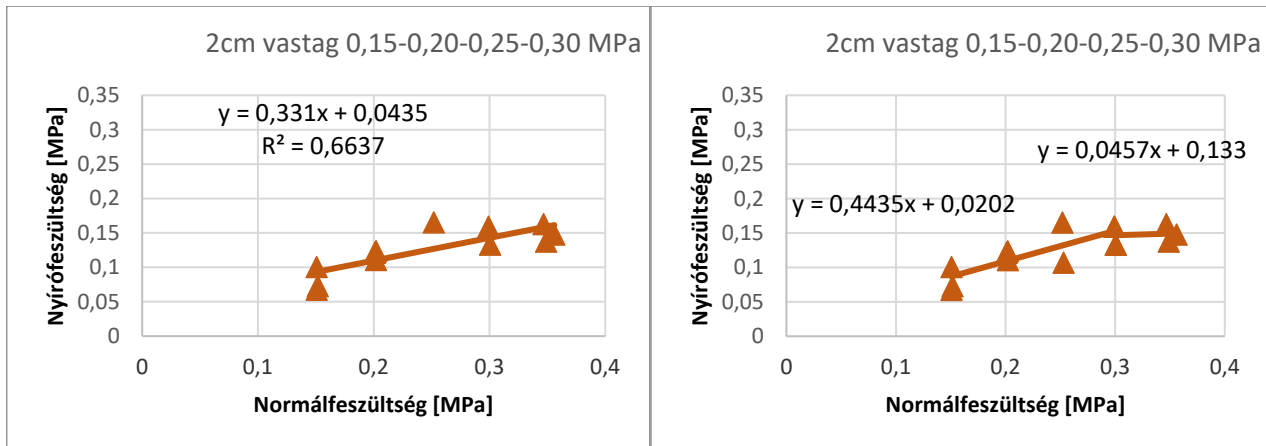
határozottan lejjebb helyezkedik el, mint az 1 cm vastag mészhabarcscé. Emellett az egyenes meredeksége is határozottan kisebb, tehát azonos normálerő növelése mellett kisebb nyírószilárdsági növekedés érhető el. Az itt elért eredményeket az előbbi 1 cm vastag habarcséval érdemes egy koordináta-rendszerben ábrázolni, hogy össze lehessen hasonlítani (22. ábra). Jól látszik, hogy bár a két egyenes közel áll egymáshoz, azért jelentős különbség van az egyenesek között, például a vékonyabb mészhabarcscé egyenesének meredeksége 1,4-szerese a vastagabbénak. Továbbá azt is jól szemlélteti mindkét egyenes, hogy jó közelítéssel mindkettő az origóból indul.



22. ábra: 2 cm vastag mészhabarcscé kapcsolat Mohr-Coulomb diagrammja

A 2 cm vastag mészhabarcscé egy másik érdekes viselkedése nagyobb normálfeszültségen jelentkezett. Ekkor ugyanis ugyanazon típusú próbatestek nyírószilárdsága elkezdett visszaesni (23. ábra). Ez akár lehetett annak is a következménye, hogy a vastagabb habarcsban több imperfekció van, így több helyen tud létrejönni a korai tönkremenetel a nyomószilárdságához közeli feszültségeken. Az értékek tendenciájából akár bilineáris viselkedésre is lehet következtetni, amely a meredekség csökkenésével jár jelen esetben 0,30 MPa normálfeszültség után. Egy másik magyarázata az eltérő viselkedésnek, hogy a mészhabarcscé 2cm vastagság mellett nagyobb feszültségeken eltérő tönkremeneteli móddal rendelkezik. Ekkor nagyobb szerepe van a habarcs anyagának a nyírési folyamatban, a mért érték a habarcs anyagának a kohézióját jobban reflektálja (24. ábra). A dolgozat megírása pillanatában még nem volt elég bizonyíték, ami alapján el lehetett volna dönteni, hogy melyik viselkedési forma, illetve tönkremeneteli kritérium a valós. A kezdeti lineáris modell miatt ezen 0,35MPa normálfeszültségen mért értékeket nem vettük figyelembe a további eredmények vizsgálatánál,

azonban érdemes lenne a nyomószilárdság értékéhez közel is mérni a kapcsolat nyírószilárdságát a jövőben.



23. ábra: 2 cm vastag mészhabarcos kapcsolat lehetséges tönkremeneteli kritériumai

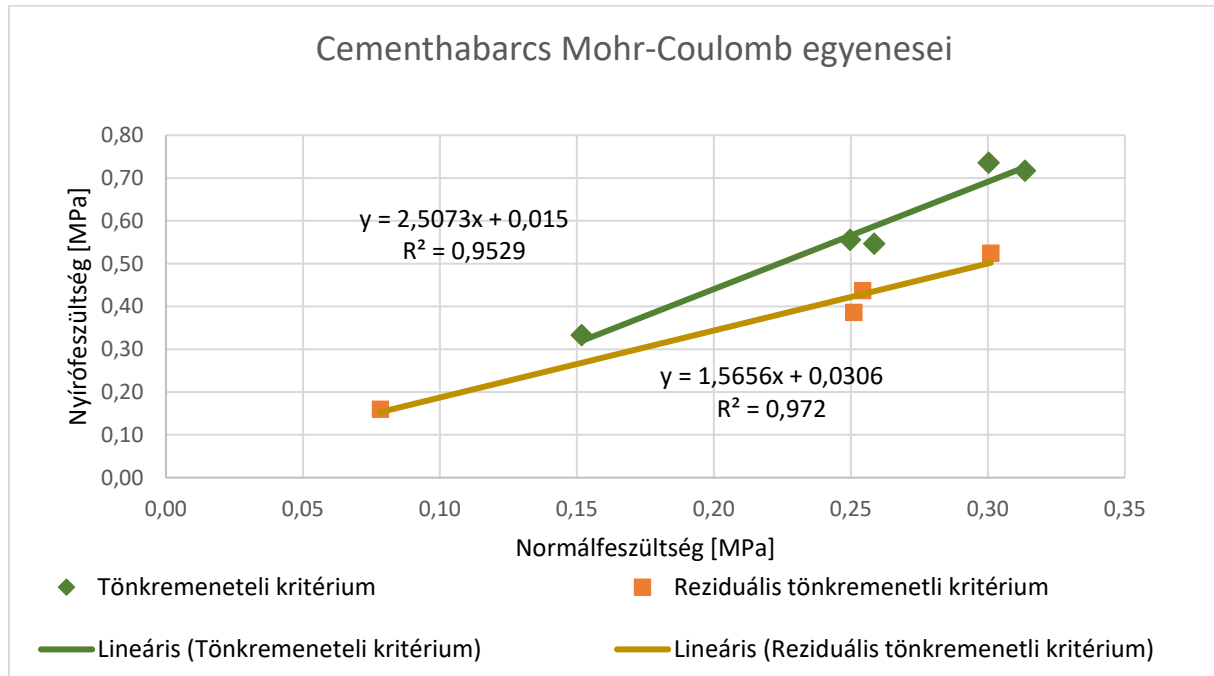


24. ábra: 1 illetve 2 cm vastag habarcos törési képe

8.1.3. 1cm vastag cementhabarcos vizsgálata

Már a tavalyi 2022-es TDK dolgozatomban vizsgáltam cementkötésű habarccsal alkotott kő kapcsolat viselkedését, azonban ekkor még csak annyit tudtam megállapítani, hogy nagy mértékben eltérő a viselkedése a két anyagnak. Az idei vizsgálat során kapott eredményeket 25. ábra szemlélteti, amelyen láthatóak már a különbségek. Első sorban a minták alacsony száma tűnik fel, ez a nyírógép nem megfelelő konstrukciójának tudható be, ugyanis kisebb normálfeszültségeken nincs lehetőség elnyírni az adott próbatestet, mivel nem tudja a szerkezet a helyén tartani azt, és kifordul, illetve kicsúszik a gépből. A rendelkezésre álló adatokból, viszont jól látszik, hogy ezen kapcsolat szilárdsága sokkal nagyobb, mint a mészhabarcosé. Az illesztett egyenesek meredekségei sokkal nagyobbak, így az adott normálfeszültséghez is nagyobb nyírófeszültség tartozik. A vizsgálatok során miután elnyíródott egy-egy próbatest tovább terheltük azonos normálfeszültségen, hogy kapjunk értéket a reziduális nyírószilárdságra is. Ezeket a kapott értékeket a narancssárga pontok és az

erre illesztett egyenes mutatja. A két egyenes egymás melletti ábrázolása jól mutatja, hogy az eltört próbatest megmaradó nyírószilárdsága jelentősen kisebb, mint a tönkremenetelhez tartozó. A határnormálfeszültség ismeretében rá lehetne illeszteni a Patton féle bilineáris modellt is akár.

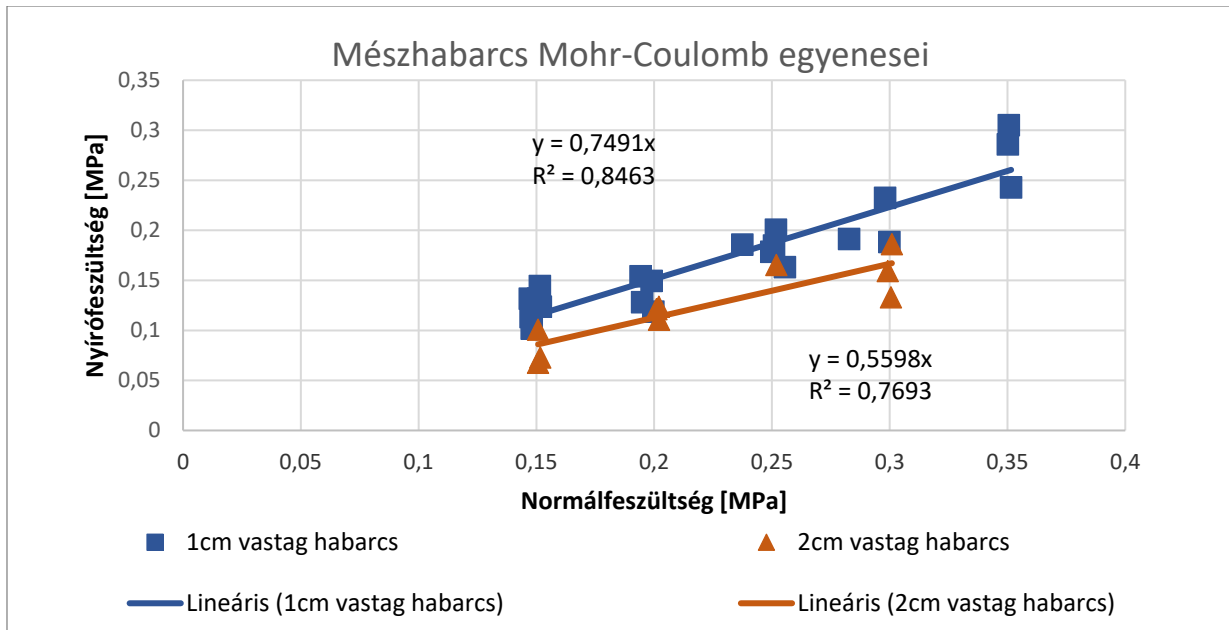


25. ábra: Cementhabarcs Mohr-Coulomb diagramjai

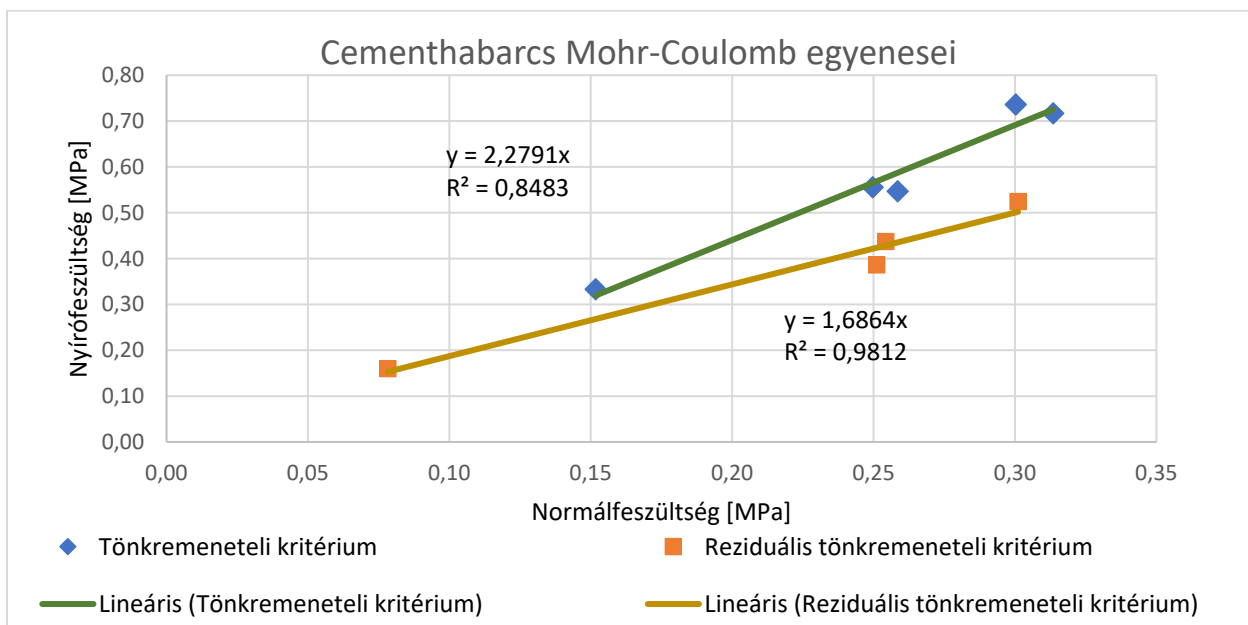
8.1.4. Tapadási tényező alkalmazása

Egy egyszerűbb modellezése a kapcsolatnak, ha csak a súrlódási paramétert vesszük figyelembe és a kohéziót nullának vesszük. Ha ezt a modellt alkalmazzuk, akkor a kapcsolat tönkremeneteli feltétele gyakorlatilag egy, az origóból induló egyenes lesz, amely meredeksége lesz a μ súrlódási paraméter

Mind a cement, mind a mészhabarcs meghatározott tönkremeneteli kritériumának egyenese az y tengelyt közel az origóban metszené el, tehát kis, alig mérhető adhézióval rendelkeznek, így nem okoz nagy változást az egyenes meredekségében, ha az origóból indítjuk. Az így kapott mészhabarcs, illetve cementhabarcs tönkremeneteli görbéjét 26. és 27. ábra mutatja.



26. ábra: Mészhabarcs kohézió nélküli Mohr-Coulomb diagrammja



27. ábra: Cementhabarcs kohézió nélküli Mohr-Coulomb diagrammja

Az így kapott origóból induló egyenesek mechanika modellje egy kohézió nélküli állapotot feltételez, amely a mészhabarcs viselkedésére tökéletesen illik, ugyanis a minimális kohézió, amivel rendelkezik gyakorlatilag elhanyagolható mértékű. Mivel nincs kohézió, ezért az adott érdességű, vastagságú kapcsolat nyírófeszültségét ezután csak egy tényező befolyásolja, a tapadási tényező. Ez a tönkremeneteli kritérium nyíró és normálfeszültségének aránya $\left(\frac{\tau}{\sigma}\right)$, amely ezen diagrammokon az egyenesek meredeksége. Ezt a paramétert használja a merev blokkos eljárást alkalmazó LimitState:RING program is a falazóelemek közti nyírási viselkedés leírására.

A fenti programban a tapadási tényező alapbeállítása 0,6 értékű, amelyet a brit szabvány [BS5628(i)] alapján vesz fel, ahol a téglá, illetve a betonfelületek tapadási tényezője van meghatározva. Ezek ismeretében nyilvánvaló, hogy falazott kőszerkezetek esetében ez a tényező nem feltétlen a 0,6-os értékű lesz, mivel teljesen más a mechanizmusa, mintha két anyag egymáson súrlódna. A kitöltő anyag nagyban befolyásolja ezt a tapadási tényezőt, ahogy azt a 8.1. részben láthattuk. Ezek miatt a laboratóriumi vizsgálatok alapján az alábbi tapadási tényezőket javaslom, amelyek a vizsgálatok eredményeként kapott lineáris regressziós görbe meredekségei:

2. táblázat: Súrlódási tényezők

Kapcsolat típusa	tapadási tényező μ	reziduális súrlódási tényező μ_{res}
1cm vastag mészhabarc	0,75	-
2cm vastag mészhabarc	0,56	-
1cm vastag cementhabarc	2,40	1,67

A tapadási tényező értéke általában 0 és 1 között mozog, azonban, ha a két felület között adhézió és jelen van, ekkor a tényező 1, de akár 2-nél nagyobb értéket is fel tud venni. A tényező gyakorlatilag a nyíró- illetve normálerők arányát fejezi ki, így az egynél nagyobb tapadási tényező esetén a nyíróerő nagyobb, mint a normálerő, amivel össze van nyomva a felület. [16] Jelen esetben jól mutatja az anyagokra vonatkozó eltérő értékek a kapcsolatok viselkedését. A mészhabarc esetén nincsen a felületek között nagyobb adhézió, ezért a tapadási tényező 1-nél kisebb, ezzel ellentétben a cementhabarcnak meglehetősen nagy az adhéziója a felületen, így 1-nél nagyobb a tapadási tényezője

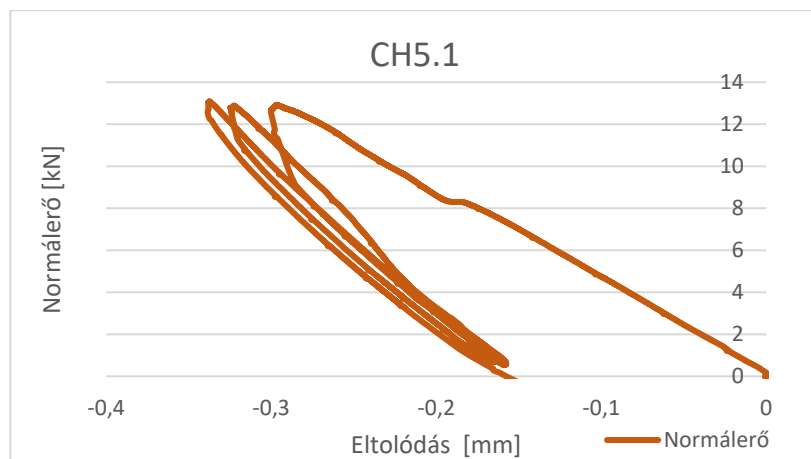
A mészhabarcok tönkremeneteléből adódóan nem értelmezhető a reziduális súrlódási tényező, mivel ezen kapcsolatok a tönkremenetel után sem csökken nagyobb mértékben a kapcsolat ellenállása, anyagnyírás jellegű, ahol maga a habarc morzsolódik szét. Összehasonlítva a különböző anyagból készült habarcokat, elmondható, hogy nagyban függ az alkalmazott habarc vastagságától, illetve összetételétől is.

8.2. Rugalmassági modulus és Poisson-tényező mérése

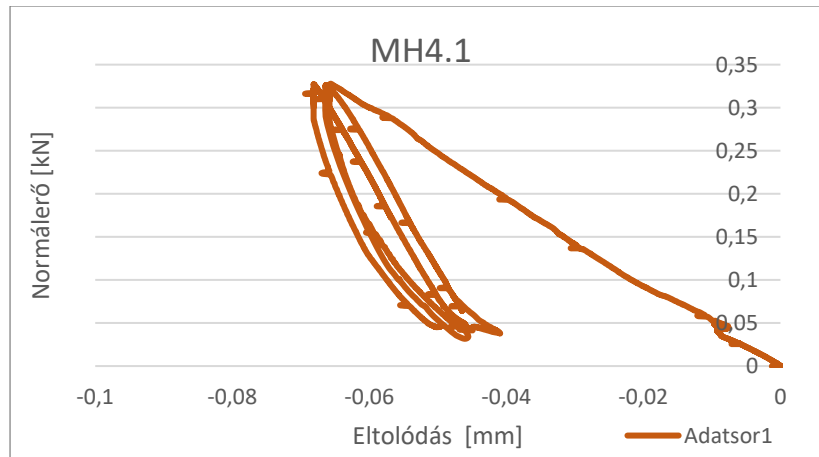
A kapcsolat normál- illetve nyírómerevsége elengedhetetlen paraméter falazott szerkezetek olyan modellezésében, ahol az alakváltozásokkal is számolnak, és nem csak a tönkremeneteli teher határozzák meg, mint például a LimitState:RING programban. Ilyen tényezőket is figyelembe vevő program például a 3DEC, amely egy diszkrét elemekkel számoló

numerikus program. Itt is többféle anyagmodell közül választhatunk, azonban a legegyszerűbb lineárisan rugalmas kapcsolati modell. Ennek az alkalmazásakor a bemenő adat a kapcsolat normál-, illetve nyírómerevsége.

A leírt módszertan segítségével több ciklusban meghatároztam mind a mész- mind a cementhabarcs anyagának a rugalmassági modulusát. Mindkét mérésre jellemző volt, hogy az első felterhelés után létrejön egy nagyobb, maradandó alakváltozás, majd ez után a többszöri felterhelés során a megmaradó alakváltozáshoz fog visszatérni a próbatest normálirányú eltolódása. Azonban itt is volt különbség a két anyag viselkedése között. A cementhabarcsban az első felterhelés közben is nagyjából azonos meredekséggel nőtt a normálerő az eltolódás függvényében, mint az elkövetkező (28. ábra). A mészhabarcs esetében viszont az első felterheléshez összehasonlítva egy relatíve lankásabb egyenes tartozik, mint a soron következő felterhelésekhez (29. ábra). Ezen eredmények alapján arra lehet következtetni, hogy a mészhabarcs a kezdeti alakváltozás után felkeményedik, és csak utána fog lineárisan rugalmasan viselkedni a következő felterhelésnél. Az eredmények kiértékelésekor a 2. és 3. felterhelés egyenesének a meredekségével számoltunk, mivel a valóságban is az első felterheléshez tartozó merevség már az építést, vagy az első nagyobb igénybevétel után lejátszódik. A kapcsolat tartós viselkedését ezeknek az egyeneseknek a rugalmassági modulusával lehet jellemezni.



28. ábra: Cementhabarcs jellemző normálerő-eltolódás függvénye



29. ábra: Mészhabarcs jellemző normálerő-eltolódás függvénye

Az egyes lineáris felterhelési szakaszokat elkülönítettem, és egyenest illesztettem rá, majd ennek az egyenesnek a meredeksége alapján meghatároztam az anyag rugalmassági modulusát. Mivel az elmozdulásmérő negatív összenyomódást mért, ezért a diagram tükrözve van az y tengelyre, továbbá, mivel kN és mm mértékegységben van, át kell váltani N/mm²-re, ugyanis ez a rugalmassági modulus mértékegysége, vagy MPa, illetve GPa. Az átváltást alábbi egyenlet szemlélteti:

$$\frac{kN}{mm} = \frac{kN}{mm} * \frac{1000}{\frac{40mm * 40mm}{160mm}} = \frac{N}{mm^2} (MPa)$$

Az átváltással megkapott eredményeket 3. táblázat foglalja össze:

3. táblázat: Rugalmassági modulusok

Kapcsolat anyaga	Próbatest jele	Merekség [kN/mm]	Rugalmassági modulus E [MPa]	Átlag [MPa]	Szórás	Teljes átlag [MPa]	Teljes szórás
Mész	MH4.1	9,603	960,3	912	68,3	1080,4	206,3
	MH4.1	8,637	863,7				
	MH4.2	9,148	914,8	914,8	0		
	MH5.1	13,89	1389	1384,5	6,4		
	MH5.1	13,8	1380				
	MH5.2	13,615	1361,5	1253,3	153,1		
	MH5.2	11,45	1145	983,5	91,2		
	MH6.1	9,19	919				
	MH6.1	10,48	1048	951,6	91,8		
	MH3.1	8,867	886,7				
Mh3.1	10,165	1016,5					
Cement	CH2.1	98,211	9821,1	9500,7	453,1	10973,9	1691,6
	CH2.1	91,803	9180,3				
	CH2.2	106,97	10697	9982	1011,2		
	CH2.2	92,67	9267	13702,5	412,2		
	CH3.1	139,94	13994				

CH3.1	134,11	13411		
CH3.2	106,7	10670		
CH3.2	120,3	12030	11586,7	793,9
CH3.2	120,6	12060		
CH4.1	118,32	11832		
CH4.1	110,89	11089	11658	505,0
CH4.1	120,53	12053		
CH5.1	80,852	8085,2		
CH5.1	88,59	8859	8472,1	547,2
CH6.1	115,61	11561	11561	0

Az eredmények függvényében elmondható, hogy a mészhabarc határozottan puhább, mint a cementhabarc, egy teljes nagyságrenddel. Az egyes próbatesteken mért több rugalmassági modulus a durva hibákat kivéve kisebb szórást eredményez, de a teljes minta szórása megfelelő értéken belül van, így reálisak a kapott eredmények.

A Poisson-tényező mérése már nagyobb bizonytalanságokat eredményezett, ugyanis a keresztirányú elmozdulás alapján véve is egy nagyságrenddel kisebb, mint a normálirányú, illetve a 3 helyett csak 2 műszer mérte. Ezekből kifolyóan kevesebb jó eredményt kaptam és meglehetősen nagyobb szórással is. Az pontokat, amelyeken mértem a tényezőt, az egyes felterhelési szakaszokról vettem, ahol lineáris volt az elmozdulás-normálerő függvény.

4. táblázat: Poisson-tényezők

	Poisson-tényező	Átlag	Szórás	Teljes átlag	Teljes szórás
MH3.1	0,400	0,211	0,164	0,10	0,0467
	0,114				
	0,117				
MH6.1	0,115	0,115	0		
	0,044				
MH5.1	0,048	0,046	0,00238		
	0,048				
	0,020				
MH4.1	0,027	0,035	0,0204		
	0,027				
	0,058				
CH2.1	0,017	0,019	0,00956		
	0,011				
	0,030				
	0,036				
CH2.2	0,053	0,056	0,0218		
	0,080				
	0,065				
CH3.2	0,066	0,065	0,000866		
	0,064				
CH4.1	0,026	0,028	0,00224		
	0,030				

	0,029		
	0,020		
	0,030	0,024	0,00509
CH5.1	0,021		
	0,128		
	0,092	0,111	0,0178
CH5.2	0,112		

Az így kapott Poisson tényezők meglehetősen alacsony értékek, azonban a tendenciájuk alapján látszik, hogy jellemzően a mészhabarcs a puhább és könnyebben deformálódó, a cementhabarcs pedig a ridegebb anyag. Ezen az eredmények egybevágának a szakirodalomban fellelhető habarcsok Poisson tényezőinek tartományaival, amik jellemzően 0,05 és 0,30 értékek között mozognak [17].

9. Mérési eredmények felhasználása

9.1. Kapcsolat rugalmassági modulusainak meghatározása

Először is a normálmerevség felhasználásával lehet a nyírási modulus meghatározni, amely Hooke-törvénye szerint:

$$E = 2G * (1 + n)$$

$$G = \frac{E}{2 * (1 + n)}$$

ahol: E – Rugalmassági modulus
G – Nyírási modulus
n – Poisson-tényező

A kapcsolat modellezéséhez használatos normál- és nyírómerevségnek több közelítési módja is van, mivel nehéz pontosan magának a kapcsolatnak a tulajdonságát vizsgálni. A RocScience ajánlása szerint [18] a kitöltőanyag tulajdonságaiból számítható magának a kapcsolatnak a tulajdonságai is, ezek szerint:

$$k_n = \frac{E_0}{h}, \text{ illetve } k_s = \frac{G_0}{h},$$

ahol: k_n – Kapcsolat normálmerevsége
 k_s – Kapcsolat nyírómerevsége
 E_0 – Kitöltőanyag rugalmassági modulusa
 G_0 – Kitöltőanyag nyírási modulusa
 h – Kapcsolat vastagsága

4. táblázat: Kapcsolat merevségi adatai

Kapcsolat típusa	Anyag rugalmassági modulusa E [N/mm ²]	Anyag nyírási modulusa G [N/mm ²]	Kapcsolat vastagsága [mm]	Kapcsolat normálmerevsége k_n [N/mm ³]	Kapcsolat nyírási merevsége k_s [N/mm ³]	Nyíró és normálmerevségek aránya [-]
Mészhabarcs	1080,41	490,31	10	108,04	49,03	0,4538
			20	54,02	24,52	0,4538
Cementhabarcs	10973,97	5222,68	10	1097,40	522,27	0,4759

Az itt meghatározott merevségi adatokkal már lehet modellezni diszkrét elemes programban a kapcsolat alakváltozását, ahogy azt számos [19] másik tanulmány is végzi, azonban ezek az eredmények már laboratóriumi körülmények között lettek előállítva, így nagyobb valóság alapja van, mint egy tapasztalati értékek alapján vett paraméternek.

10. Diszkusszió

10.1. Tapadási tényező

Ahogy azt már korábban említettük többen is vizsgálták már a falazott köelemek közötti tapadási tényezőt, legyen szó falazatokról, vagy boltívekről. Ez a tényező, illetve a nyírási merevsége a falazatnak fontos szerepet játszik falazott szerkezetek nem lineáris szeizmikus analízisében [20]. A tényező mérésével is többen foglalkoztak, ugyanis számos program bemeneti paramétere, illetve a viselkedést is megfelelő módon le lehet írni vele. Jó példa a mérésre Marino et al. 2014 [21], amely kutatás során történelmi épületek kő falazatát vizsgálták és hasonlították össze a mért tapadási tényezőt a falazat minőségével. A mérés során a falazatban egy jól lehatárolt falazóblokk jobb és bal oldalát kivésték, majd eltolták a fal síkjával párhuzamosan hidraulikus pumpával. A mérés eredményeként meghatározták az adott elem pillanatnyi normálfeszültség melletti nyírószilárdságát, azonban 2 ismeretlen is volt a tapadási tényező, illetve a normálfeszültség, amelyet nem tudtak külön mérni, így két mérésből határozták meg egy blokk tapadási tényezőjét. Az ő eredményeiket 5. táblázat szemlélteti, amely szerint nagyságrendileg hasonló eredményekre jutottak.

5. táblázat: Marino et al. in situ vizsgálatainak eredménye [20]

Types of masonry	μ_r average	Standard deviation	μ_r acceptable values	
Cut soft stone	0,61	0,06	max min	0,65 0,55
Rough-cut lava stone	0,83	0,09	max min	0,90 0,70

A vizsgált épület falazata is mészhabarcból készült, így megfelelő összehasonlítási alapot ad. Az általam vizsgált kapcsolatok tapadási tényezői egybevágóak az itt tapasztaltakkal,

ugyanis az általam kapott 0,56, illetve 0,75 hasonló a fenti értékekhez. Az eltérés az eltérő habarcsvastagságoknak, illetve anyagminőségnek tudható be. Cementhabarcs és kő alkotta kapcsolatokról nem található hasonló eredmény a szakirodalomban, mivel kő esetén jellemzően mészhabarcsot használnak.

Más vizsgálatok is azonos nagyságrendű eredményekre jutottak, például G. Vasconcelos et al. [22] vizsgálatuk során simább felületű falazóblokkok között mérték a tapadási tényezőt, és az ő méréseik alapján 1 cm habarcsvastagságukkal a tényező értéke 0,63 lett, amely értékének eltérése valószínűleg a felületeink különbségének tudható be.

10.2. Rugalmassági modulus

A habarcs rugalmassági modulus méréséhez felhasznált szakirodalom eredményei is összehasonlíthatóak jelen kutatás értékeivel. Marques et al. [23] kutatásukban több összetételű habarcsot is vizsgáltak, többek között 1:3 kötőanyag-adalékanyag arányú cement, illetve mészhabarcsot is, amelyeket jelen vizsgálat során is alkalmaztunk. Az ő eredményeik a mészhabarcsra nagyjából 1700 MPa, cementhabarcsra 14000 MPa értékű rugalmassági moduluszt határoztak meg. Ez jól összevethető jelen dolgozatban meghatározott 1080, illetve 10974 MPa-al. A két mérési eredmény különbsége adódhat az eltérő adalékanyag, illetve kötőanyag minőségétől.

Meg kell említeni, hogy az itt meghatározott merevségek a falazóelemek közti kapcsolatot, és nem a teljes falazatot jellemzik. A szakirodalomban nehéz találni olyan kutatást, ahol a kapcsolatot vizsgálják, és nem a teljes falazatot, így nehéz ezeket az értékeket összehasonlítani más kutatásokkal. A teljes falazat viselkedésének meghatározásához szükségünk van a falazóelemek rugalmassági és nyírási modulusára is, ezeket összesítve lehet megfelelő módon meghatározni egy homogenizált falazat rugalmassági- és nyírási modulusát. Jelen vizsgálat eredményei azonban diszkrét elemes számításhoz tökéletesen alkalmazhatók. Nagyságrendileg azonban összehasonlítható a nyírási merevség, illetve a normálmerevség aránya, ugyanis az általam vizsgált kapcsolatok merevségeinek aránya nagyjából 0,45, ahogy azt a 4. táblázat is mutatja. Ha a falazatot nem diszkrét elemes makró modellel közelítenénk, hanem a falazatot egy homogén felületté szeretnénk redukálni, akkor a teljes falazatra kéne egységes rugalmassági és nyírási modulusokat meghatározni. A homogenizálás feladata során tapasztalatok alapján a két modulus aránya 0,15 és 0,45 között mozog [24], azonban jellemzően a 0,15-ös értéket használják a biztonság javára. Jelen esetben, ha a teljes falazatra néznénk, a rugalmassági modulus

valószínűleg nagyobb értéket venne fel a normálmerevségnél, a falazóelemek merevsége miatt, míg a nyírási merevségből számított nyírási modulus kisebb mértékben változna.

11. Összegzés

A dolgozat célja eltérő minőségű falazott kőkapcsolatok nyírási viselkedésének leírása volt. Ehhez elsősorban nyírógép segítségével elnyírtam a próbatesteket, aminek eredményeként megkaptam a kapcsolat Mohr-Coulomb tönkremeneteli kritériumát. Ez a modell a kapcsolat kohéziójával, illetve súrlódási szögével számol, amelyeket a 6. táblázatba gyűjtöttem össze. Ezen kritérium az adott normálfeszültségeken eltört próbatestek normál- és nyírófeszültségi párok pontjaira illesztett egyenes adja meg. A vizsgált próbatestek 1, illetve 2 cm vastag mészhabarccsal, illetve 1 cm vastag cementhabarccsal voltak összeillesztve, ezen kapcsolatok tönkremeneteli kritériumát az alábbi egyenletek írják le:

$$1 \text{ cm vastag mészhabarcs: } \tau_{cr} = 0,7206\sigma_n + 0,0071$$

$$2 \text{ cm vastag mészhabarcs: } \tau_{cr} = 0,5394 \sigma_n + 0,0048$$

$$1 \text{ cm vastag cementhabarcs: } \tau_{cr} = 2,5073\sigma_n + 0,015$$

ahol: τ_{cr} – Kapcsolat nyírószilárdsága

σ_n – Kapcsolat pillanatnyi normálfeszültsége

6. táblázat: Mohr-coulomb modell bemenő paraméterei

Kapcsolat típusa	Súrlódási szög [°]	Kohézió [MPa]
1cm mészhabarcs	35,78	0,0071
2cm mészhabarcs	28,34	0,0048
1cm cementhabarcs	68,26	0,015

Egyes programok a kapcsolatot csak a tapadási tényezőjünkkel modellezik, ezért érdemes ezt a paramétert is meghatározni. Ezen tényező segítségével lehet modellezni falazott kőszervezetek viselkedését és lehet meghatározni teherbírásukat, például a LimitState:RING nevű programban. Az itt alkalmazott modellhez tartozó tapadási tényezőket 7. táblázat foglalja össze.

7. táblázat: Tapadási tényezők értékei

Kapcsolat típusa	tapadási tényező μ	reziduális súrlódási tényező μ_{res}
1cm vastag mészhabarcs	0,75	-
2cm vastag mészhabarcs	0,56	-
1cm vastag cementhabarcs	2,28	1,69

A dolgozat során továbbá mértük még a használt habarcs rugalmassági modulusát, illetve Poisson-tényezőjét, amelyek felhasználásával a nyírási merevség is előállítható. A kapcsolat normál, és nyírási merevségével pedig már a terhelés közben fellépő alakváltozásokat is ki lehet számolni. Ezen vizsgálati eredményeket 8. táblázat foglalja össze az egyes habarcs típusokra.

8. táblázat: Egyesített merevségi paraméterek

Kapcsolat típusa	Kapcsolat vastagsága [mm]	Kapcsolat normál merevsége k_n [N/mm ³]	Kapcsolat nyírási merevsége k_s [N/mm ³]
Mészhabarcs	10	108,04	49,03
	20	54,02	24,52
Cementhabarcs	10	1097,40	522,27

Irodalomjegyzék

- [1] <https://blog.msc-sahc.org/out-of-plane-behavior-of-stone-masonry-walls-built-with-earthquake-resistant-techniques/> Out-of-plane behavior of stone masonry walls built with earthquake resistant techniques, (Antonio Murano)
- [2] Unreinforced masonry walls subjected to out-of-plane seismic actions, (Jaroslav Vaculik)
- [3] Understanding of historical masonry for conservation approaches: the contribution of Prof. Luigia Binda to research advancement, (Anna Anzani . Giuliana Cardani . Paola Condoleo . Elsa Garavaglia . Antonella Saisi . Cristina Tedeschi . Claudia Tiraboschi . Maria Rosa Valluzzi)
- [4] Shear modulus of masonry walls: a critical review (Pietro Crocea, Maria Luisa Beconcina , Paolo Formichia , Paolo Cionia , Filippo Landi, Caterina Mochi, Frenacesco De Lellis, Elisabetta Mariotti, Isabelle Serre)
- [5] Hagymányos építőkövek a települési tájban a Dunántúli-középhegység példáján, (Vajda Tamás)
- [6] Strategies for assessment of historic masonry structures (L. Binda, C. Maierhofer)
- [7] Déry Attila: Öt könyv a régi építészeztől 1 Az építés anyagai
- [8] <https://kreativlakas.com/magasepiteszet/kofalazatok-es-tulajdonsagai-termesko-es-faragottkofalazatok/>
- [9] Dr. Kausay Tibor: Betonopus, Kötőanyagok IV. Hidraulikus kötőanyagok: cement 2, klinkerásványok
- [10] Performance Research of Lime Based Mortars. (Bayraktar, Oğuzhan & Çığtoğlu, Gülsüm & Saad, Adel)
- [11] Numerical modelling of masonry joints degradation in built tunnels (Jamal Idris, Marwan Al-Heib, Thierry Verdel)
- [12] SZIKLARÉZSŰK VIZSGÁLATA – ELMÉLET ÉS GYAKORLAT, Magyar Útügyi Társaság (MAÚT) (Bögöly Gyula, Léber Tímea, Rozgonyi-Boissinot Nikoletta, Vásárhelyi Balázs)
- [13] ISRM Suggested Method for Laboratory Determination of the Shear Strength of Rock Joints: Revised Version (Jose´ Muralha, Giovanni Grasselli, Bryan Tatone, Manfred Blu¨mel, Panayiotis Chryssanthakis, Jiang Yujing)
- [14] Effect of grain size and different multi-stage shearing techniques on shear strength along rock discontinuities (Alina Vattai, Nikoletta Rozgonyi-Boissinot)
- [15] Modulus of elasticity of mortars: Static and dynamic analyses (Ana Isabel Marques a,† , João Morais b , Paulo Morais b , Maria do Rosário Veiga a , Carlos Santos b , Paulo Candeias c , João Gomes Ferreira d)
- [16] Tribological aspects in friction stir welding and processing (V.N. Malyshev)
- [17] The confinement of mortar in masonry under compression: Experimental data and micro-mechanical analysis (Anastasios Drougkas, Els Verstrynge, Roald Hayen, Koenraad Van Balen)

- [18] <https://static.rocscience.cloud/assets/verification-and-theory/RS2/RS2-Estimating-Joint-Stiffness.pdf>
- [19] Discrete element modeling of masonry structures: Validation and application (Pulatsu, Bora Bretas, Eduardo M.Lourenço, Paulo B.)
- [20] Influence of mechanical parameters on non-linear static analysis of masonry buildings: a relevant case-study. (Croce, P. et al., 2018.)
- [21] Experimental data of friction coefficient for some types of masonry and its correlation with an index quality masonry (IQM). (Manuela Marino, Fabio Nero, Alessandro De Maria, Antonio Borri)
- [22] Experimental shear behavior of stone masonry joints G. Vasconcelos, P.B. Lourenço & D. Oliveira
- [23] Modulus of elasticity of mortars: Static and dynamic analyses (Ana Isabel Marques a,†, João Morais b, Paulo Morais b, Maria do Rosário Veiga a, Carlos Santos b, Paulo Candeias c, João Gomes Ferreira)
- [24] The ratio of shear to elastic modulus of in-plane loaded masonry (Bastian Valentin Wilding, Michele Godio, Katrin Beyer)

Ábrajegyzék

1. ábra: Falazatok modellezési lehetőségei [1].....	4	
2. ábra: Nem megfelelő beavatkozás eredménye a kő falazaton [3]	5	
3. ábra: Arnaudovi háza, Ohrid	4. ábra: Csókakő vára.....	7
5. ábra: Szent Szófia templom, Ohrid	6. ábra: Mállott mészkő falazat, Isla).....	7
7. ábra: Falazóblokkok közti kapcsolat mechanikai modellje [1]	11	
8. ábra: Mohr-Coulomb egyenes	12	
9. ábra: Nyírási vizsgálat eredményeül kapott erő-elmozdulás diagramm.....	14	
10. ábra: Patton modell bilineáris görbéje.....	14	
11. ábra: Próbatétel zsaluval kitöltés előtt	12. ábra: Próbatétel mészhabarcossal kitöltve	18
13. ábra: Pontosan illesztett felső elem kiegyenlítése	14. ábra: Az illesztett próbatétel 4. falának kiegyenlítése	18
15. ábra : Nyírógép részei.....	19	
16. ábra: QuantumX DAQ adatgyűjtő.....	20	
17. ábra: Próbatétel mérés közben	18. ábra: Mérési adatokat továbbító adattároló	21
19. ábra: Mészhabarc kapcsolatú próbatétel jellemző tönkremeneteli módja	22	
20. ábra: Cementhabarc kapcsolat jellemző tönkremeneteli	22	
21. ábra: Kiegészített 1cm vastag mészhabarc kapcsolat törési határgörbéje.....	23	
22. ábra: 2 cm vastag mészhabarc kapcsolat Mohr-Coulomb diagrammja.....	24	
23. ábra: 2 cm vastag mészhabarc kapcsolat lehetséges tönkremeneteli kritériumai	25	
24. ábra: 1 illetve 2 cm vastag habarc törési képe	25	
25. ábra: Cementhabarc Mohr-Coulomb diagrammjai	26	
26. ábra: Mészhabarc kohézió nélküli Mohr-Coulomb diagrammja	27	
27. ábra: Cementhabarc kohézió nélküli Mohr-Coulomb diagrammja.....	27	
28. ábra: Cementhabarc jellemző normálerő-eltolódás függvénye.....	29	
29. ábra: Mészhabarc jellemző normálerő-eltolódás függvénye	30	

Mellékletek

	a [mm]	b [mm]	c [mm]	m [g]	F (kN)	N (MPa)	N átlag [MPa]	N szórás
A*1	49,8	49,8	50,1	274,4	141,25	56,95	58,32	1,61
A*2	49,84	49,9	50	273,52	144,03	57,91		
A*3	50,3	49,9	49,8	277,52	150,84	60,10		
A*4	50,7	49,7	49,8	277,72	159,82	63,43	64,90	1,32
A*5	49,9	49,9	49,8	279,01	162,65	65,32		
A*6	49,8	49,8	49,8	277,3	163,57	65,95		
A*7	49,8	49,8	49,9	280	161,97	65,31	64,72	0,62
A*8	49,3	49,9	49,9	277,85	157,61	64,07		
A*9	48,8	49,9	49,8	274,7	157,73	64,77		
A*10	49,4	49,8	49,8	274,99	165,54	67,29	67,20	0,92
A*11	48,7	49,8	49,7	271,39	160,65	66,24		
A*12	49,1	49,8	50,1	272,36	166,47	68,08		
A*13	49,7	49,8	49,6	272,28	166,01	67,07	67,52	1,79
A*14	49,9	50	49,6	273,84	164,65	65,99		
A*15	49	49,7	49,7	269,21	169,22	69,49		
A*16	48,8	49,9	49,8	270,25	15,69	6,44	46,08	34,33
A*17	49,8	49,9	49,8	271,58	163,25	65,69		
A*18	49,9	50	50	272,54	164,92	66,10		
A*19	49,8	49,8	49,9	270,69	162,35	65,46	61,89	3,09
A*20	49,9	49,9	49,9	273,4	149,57	60,07		
A*21	49,9	50	50	276,37	150,06	60,14		
A*22	49,3	50,1	50	274,66	150,93	61,11	62,01	0,85
A*23	49,7	49,9	49,9	274	155,7	62,78		
A*24	49,7	49,9	49,8	275,38	154,12	62,14		
A*25	49,3	50,1	49,8	272,73	151,11	61,18	61,57	2,04
A*26	50,1	49,8	49,9	281,99	159,14	63,78		
A*27	50	49,9	49,9	280,01	149,09	59,76		
A*28	49,8	49,7	49,8	277,63	155,8	62,95	64,57	1,41
A*29	49,3	49,9	49,8	274,39	160,54	65,26		
A*30	49,9	49,8	50	275,38	162,8	65,51		
A*31	49,4	49,9	49,7	272,5	152,84	62,00	61,60	0,58
A*32	50,3	50	49,9	277,73	155,57	61,86		
A*33	49,7	49,9	49,9	270,29	151,11	60,93		
A*34	50,7	50	49,8	276,63	149,33	58,91	64,17	4,63
A*35	49,3	50	49,8	275,13	166,71	67,63		
A*36	49,6	50	49,8	279,47	163,63	65,98		
A*37	49,8	50	49,8	277,19	167,09	67,10	67,15	0,82
A*38	49,2	49,8	49,8	274,25	162,58	66,35		
A*39	49,8	49,8	49,9	276,59	168,63	67,99		
A*40	49,9	49,9	49,9	271,53	160,24	64,35	58,77	5,10
A*41	50	49,8	49,8	273,75	135,38	54,37		
A*42	50,3	49,9	49,9	280,37	144,52	57,58		
A*43	50,1	50	50	274,58	143,85	57,43	60,56	2,73
A*44	49,5	49,9	49,8	275,85	154,06	62,37		
A*45	49,3	49,9	49,9	278,52	152,27	61,90		
A*46	49,6	50	50	276,13	155,03	62,51	61,48	1,23
A*47	49,4	49,8	49,9	271,27	147,89	60,11		
A*48	49,4	49,9	49,9	272,34	152,4	61,82		
Átlag:	49,68	49,89	49,86	275,03	153,75	62,03	62,03	3,94

Ágyazat 30x30x30	a [mm]	b [mm]	c [mm]	m [g]	F (kN)	N (MPa)	N átlag [MPa]	N szórás
A1	30,4	30,2	30,2	60,03	48,52	52,85	49,81	4,30
A2	30,2	30,2	30,2	56,92	42,65	46,76		
A3	30,9	30,1	30,1	55,39	21,08			
A4	29,9	31	30,2	57,64	60,86	65,66	68,80	2,76
A5	30	31,1	30,3	60,72	66,08	70,83		
A6	29,9	29,9	31	60,48	62,51	69,92		
A7	29,4	30,1	30,2	57,94	63,39	71,63	71,10	2,10
A8	30	29,6	30,5	57,95	64,73	72,89		
A9	30,1	30,2	32	60,02	62,53	68,79		
A10	30,2	30,1	30,1	61,1	56,61	62,28	58,67	4,17
A11	30	30,4	30,1	61,52	49,34	54,10		
A12	30	30,2	30	59,74	54,03	59,64		
A13	30,1	29,9	30,1	60,52	54,88	60,98	61,55	2,47
A14	30,4	30,3	30,2	61,36	54,74	59,43		
A15	30,2	30,1	30,2	60,74	58,41	64,26		
A16	29,8	30,1	30	60,62	70,71	78,83	74,95	4,35
A17	29,9	30,2	30	59,67	63,43	70,25		
A18	29,5	30,1	30	59,37	67,27	75,76		
A19	29,9	30,2	30	61,15	64,72	71,67	68,85	3,96
A20	29,8	30,1	30,1	59,59	63,27	70,54		
A21	30,1	30,1	30,1	60,52	58,28	64,33		
A22	29,8	30	29,8	59,41	57,09	63,86	65,57	1,52
A23	29,9	30,4	30	60,51	60,7	66,78		
A24	29,9	30	30,2	60	59,27	66,08		
A25	29,5	30,1	30,2	59,28	59,74	67,28	63,80	3,12
A26	29,5	30	30,1	59,41	54,21	61,25		
A27	29,9	30	30	59,15	56,39	62,87		
A28	30,3	29,9	30,2	60,56	56,3	62,14	67,07	4,44
A29	29,8	30	30,1	58,66	63,25	70,75		
A30	30	30,1	29,9	59,18	61,69	68,32		
A31	29,7	30	29,9	59,51	65,08	73,04	68,87	9,88
A32	29,7	30,1	30,1	59,05	67,92	75,98		
A33	30,2	30	29,8	59,34	52,17	57,58		
A34	30,5	30	30,2	61,02	61,01	66,68	64,56	4,90
A35	30,6	30,2	30	60,36	54,48	58,95		
A36	30,4	30,2	30,1	61,25	62,47	68,04		
A37	30,1	29,9	29,9	59,75	60,78	67,53	63,33	6,98
A38	30,2	30,1	30	60,26	50,24	55,27		
A39	30	30	30	59,9	60,46	67,18		
A40	29,9	30,1	30	60,14	59,29	65,88	59,97	5,27
A41	30,2	30	30	60,35	50,51	55,75		
A42	30,1	30,2	30,1	60,66	52,98	58,28		
A43	30	30,1	29,9	59,82	66,4	73,53	70,07	3,17
A44	30	29,9	30,1	60,63	62,23	69,38		
A45	30	30	30	60,14	60,58	67,31		
A46	30,1	30,1	30,2	61,02	55,66	61,43	64,72	3,04
A47	29,9	30,2	30,2	60,19	58,95	65,28		
A48	29,8	30,2	30	60,31	60,69	67,44		
Átlag	30,01	30,13	30,14	59,85	58,30	65,43	65,11	4,15

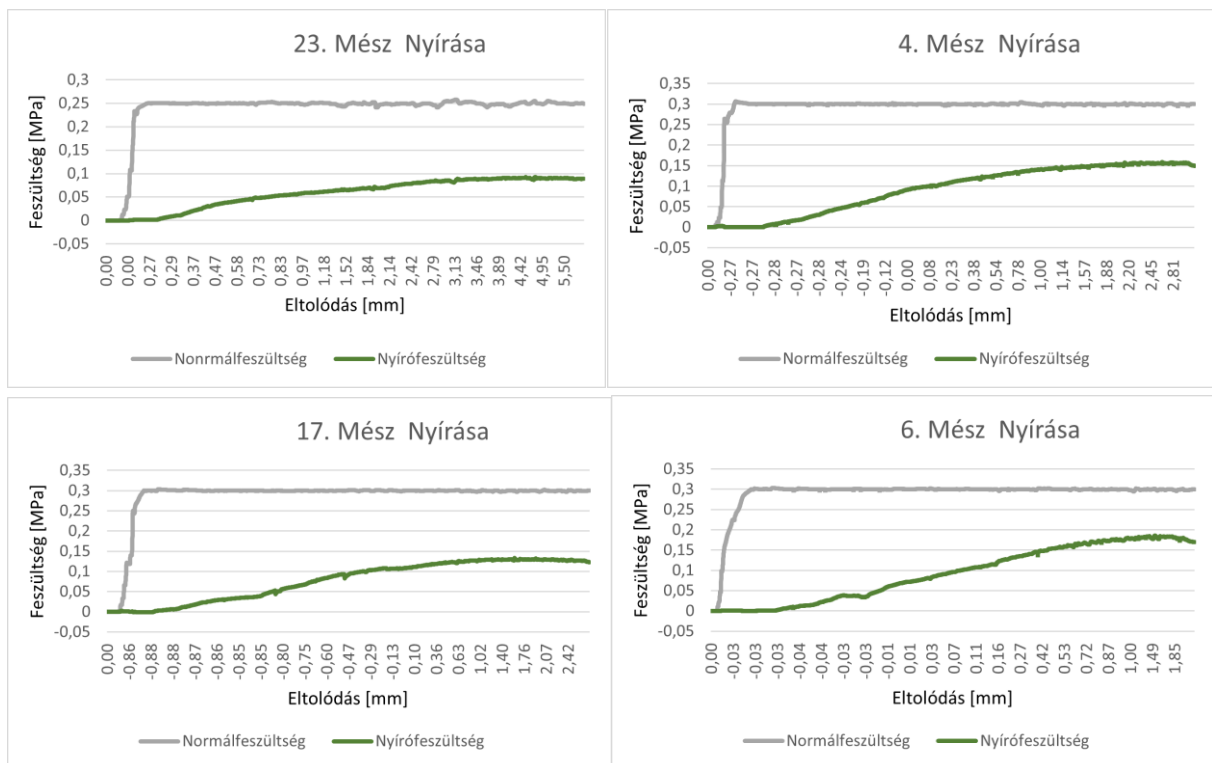
Felület 30x30x30	a [mm]	b [mm]	c [mm]	m [g]	F (kN)	N (MPa)	N átlag [MPa]	N szórás
F1	30,1	30,2	30,2	60,92	43,57	47,93	49,53	2,26
F2	29,9	30,3	30,1	58,27	29,28			
F3	29,5	30,2	30,2	57,37	45,55	51,13		
F4	30,9	30,1	30,2	58,25	44,95	48,33	48,67	0,49
F5	29,8	30	30,2	58,51	27,76			
F6	30,1	30,2	30,1	57,41	44,56	49,02		
F7	30,4	29,9	30	58,5	55,14	60,66	60,04	4,98
F8	30,1	30,2	30,1	58,88	58,79	64,67		
F9	30,5	30,3	30,6	58,07	50,62	54,77		
F10	30,6	30,1	30,1	57,99	45,94	49,88	50,69	0,72
F11	30,8	30,2	30,3	57,05	47,39	50,95		
F12	30,9	30,2	30,3	57,19	47,83	51,25		
F13	31	30,1	30,5	60,24	54,35	58,25	58,29	0,18
F14	31	30,2	30,2	58,86	54,43	58,14		
F15	31,1	30,3	30,2	58,89	55,11	58,48		
F16	30,1	30	30,1	58,26	52,44	58,07	57,99	0,74
F17	30,1	30,3	30	57,53	52,18	57,21		
F18	30,2	30,2	30,1	57,06	53,53	58,69		
F19	30,4	30	30,1	58,82	61,08	66,97	65,67	1,93
F20	30,5	30,1	30,1	59,2	58,26	63,46		
F21	29,8	30	29,9	58,11	59,53	66,59		
F22	29,9	30,3	30	58,89	63,73	70,34	62,54	6,77
F23	29,5	30,2	30	58,2	52,64	59,09		
F24	30,9	30,1	30	58,81	54,12	58,19		
F25	30,9	30,2	30	59,87	63,95	68,53	65,65	3,35
F26	30,5	29,8	30	59,11	60,39	66,44		
F27	30,3	30,1	30,2	59,1	56,52	61,97		
F28	29,6	30,4	29,9	58,55	53,96	59,97	54,74	6,28
F29	30,5	30,1	30	59,4	51,85	56,48		
F30	30,4	30	30,1	59,95	43,57	47,77		
F31	30	29,9	30	58,46	58,13	64,80	62,08	4,61
F32	30	30,4	30,1	59,39	51,76	56,75		
F33	29,9	29,8	30	58,27	57,62	64,67		
F34	30,2	29,9	30,1	58,51	56,22	62,26	62,29	2,03
F35	30,1	29,9	30	58,22	57,9	64,33		
F36	30,4	30,1	30	59,42	55,16	60,28		
F37	30,7	29,9	30,1	60,54	64,53	70,30	66,18	4,78
F38	30,3	30,1	30	59,77	61,39	67,31		
F39	30,4	30,1	29,8	58,62	55,76	60,94		
F40	30,3	30,1	30	58,65	59,5	65,24	61,75	3,15
F41	30,3	30,6	30	59,22	56,49	60,93		
F42	30,1	30,2	30	58,94	53,72	59,10		
F43	29,8	30	30	58,75	58,35	65,27	63,89	1,33
F44	29,4	29,9	29,9	57,58	55,04	62,61		
F45	29,6	30,2	29,8	57,2	57,01	63,78		
F46	30,4	30,1	29,9	58,47	49,47	54,06	54,32	1,81
F47	30,6	30,1	29,9	59,48	48,5	52,66		
F48	30,8	30,2	30	58,03	52,32	56,25		
F49	30,3	30	29,9	59,57	59,47	65,42	63,45	1,94
F50	30,2	30,1	30,1	59,49	55,95	61,55		
F51	30	30	30,1	57,9	57,04	63,38		

F52	30,2	30	30	58,51	54,46	60,11		
F53	30,8	30,2	30,2	60,16	56,25	60,47	59,82	0,84
F54	30,6	30,5	30,3	59,68	54,95	58,88		
F55	30,4	30,2	30,1	60,09	61,38	66,86		
F56	30,3	29,9	30,1	60,52	68,53	75,64	68,37	6,64
F57	30,7	30	30	59,8	57,67	62,62		
F58	29,8	30,1	30,2	59,44	69,53	77,52		
F59	29,9	30	30	59,36	65,6	73,13	74,23	2,90
F60	30	30,2	30,1	59,77	65,27	72,04		
F61	30,7	30,2	30	58,98	61,73	66,58		
F62	30,6	30,1	30,1	58,22	56,7	61,56	66,59	5,03
F63	30	30,1	30	57,66	64,67	71,62		
F64	30,5	30,3	30,1	58,51	60,25	65,20		
F65	30,4	30,2	30	58,81	61,69	67,19	65,81	1,20
F66	30,2	30,2	30,1	58,66	59,31	65,03		
F67	30,9	30,1	30	60,47	31,98			
F68	30	30,2	30,1	58,25	61,94	68,37	69,03	0,94
F69	30,3	30,2	30,1	58,71	63,78	69,70		
F70	29,8	30,1	30,2	58,1	63,16	70,41		
F71	30,4	30,1	30	58,23	59,51	65,04	67,24	2,82
F72	30,5	30,1	30,2	59,65	60,85	66,28		
F73	30,1	30	30	59,33	62,98	69,75		
F74	29,9	30	30,2	57,4	56,63	63,13	67,26	3,60
F75	30,3	30	30	59,19	62,62	68,89		
F76	29,9	30,2	30,1	59,57	63,01	69,78		
F77	30	30,1	30	59,16	63,73	70,58	70,09	0,43
F78	30	30,2	29,8	57,37	63,34	69,91		
F79	29,8	30,1	30,2	58,24	59,34	66,16		
F80	30,5	30	30,2	57,95	59,03	64,51	67,31	3,53
F81	30,1	30,2	30	57,49	64,79	71,27		
F82	29,8	30,1	30	59,93	79,38	88,50		
F83	30,2	29,9	29,9	60,08	73,82	81,75	83,13	4,83
F84	29,8	30	29,8	58,11	70,74	79,13		
F85	29,9	29,9	29,9	59,82	67,86	75,91		
F86	30,2	30,1	30,1	60,84	70,27	77,30	74,61	3,52
F87	30,1	29,9	30,1	58,55	63,57	70,63		
F88	29,7	30,2	30	58,63	63,48	70,77		
F89	29,8	30	30	58,04	64,91	72,61	72,34	1,45
F90	30	30,1	30,2	58,67	66,49	73,63		
F91	30,3	30,1	30,1	59,46	66,57	72,99		
F92	30	30,1	30	58,94	62,09	68,76	69,66	2,99
F93	30,3	30	30,2	59,3	61,11	67,23		
F94	30,4	30,1	30,1	59,2	62,35	68,14		
F95	30,2	30,2	30,1	58,6	62,59	68,63	68,10	0,55
F96	29,9	30	30	57,74	60,57	67,53		
Átlag:	30,23	30,11	30,07	58,80	57,65	64,37	64,11	2,77

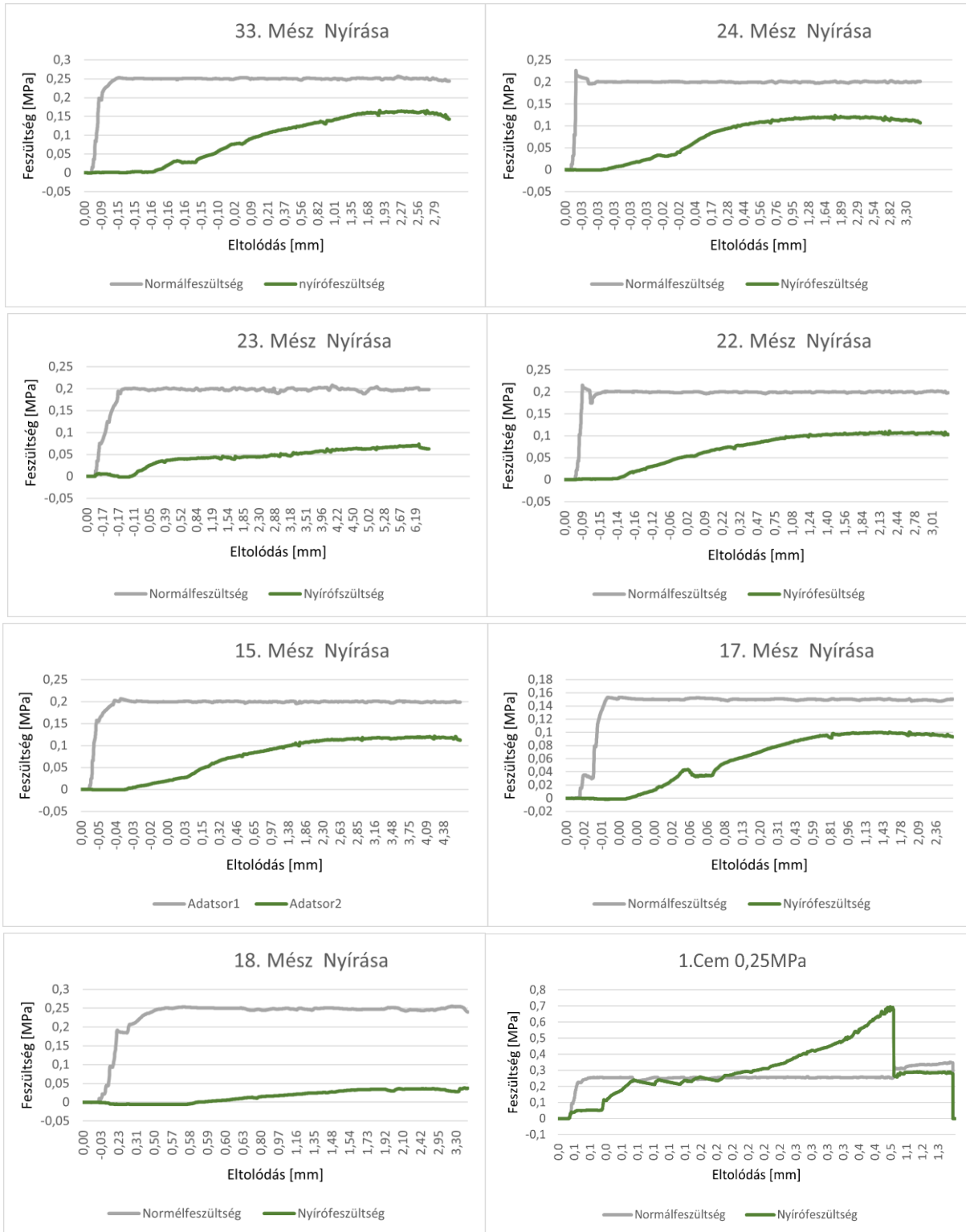
Habarcsc	a [mm]	b [mm]	c [mm]	m [g]	F (kN)	N (MPa)	N átlag [MPa]	N szórás
CH6	30,2	30,1	30	60,26	22,63	24,895	26,364	26,364
CH5	30	29,8	30	60,02	23,78	26,600		
CH4	30	30,1	29,9	59,76	24,92	27,597		
Átlag	30,07	30,00	29,97	60,01	23,78	26,36		
MH1	30,10	29,90	30,10	55,62	0,83	0,92	0,889	0,889
MH2	30,00	30,00	30,00	54,95	0,68	0,76		
MH3	30,20	30,10	30,20	56,37	0,90	0,99		
Átlag	30,10	30,00	30,10	55,65	0,80	0,89		

CEM	b [mm]	h [mm]	l [mm]	m [g]
1	39,5	40,11	159,95	541,39
2	39,85	40,02	160,18	548,81
3	39,62	40,1	159,9	543,34
4	39,97	40,27	159,65	537,93
5	40,07	40,05	159,75	539,06
6	39,65	40,02	159,78	530,86
MÉSZ				
1	39,31	38,98	159,82	444,65
2	39,34	39,77	159,2	447,04
3	40,11	37,78	159,15	441,31
4	39,75	39,52	158,4	447,95
5	38,96	39,82	158,33	440,52
6	39,24	39,73	158,62	449,52

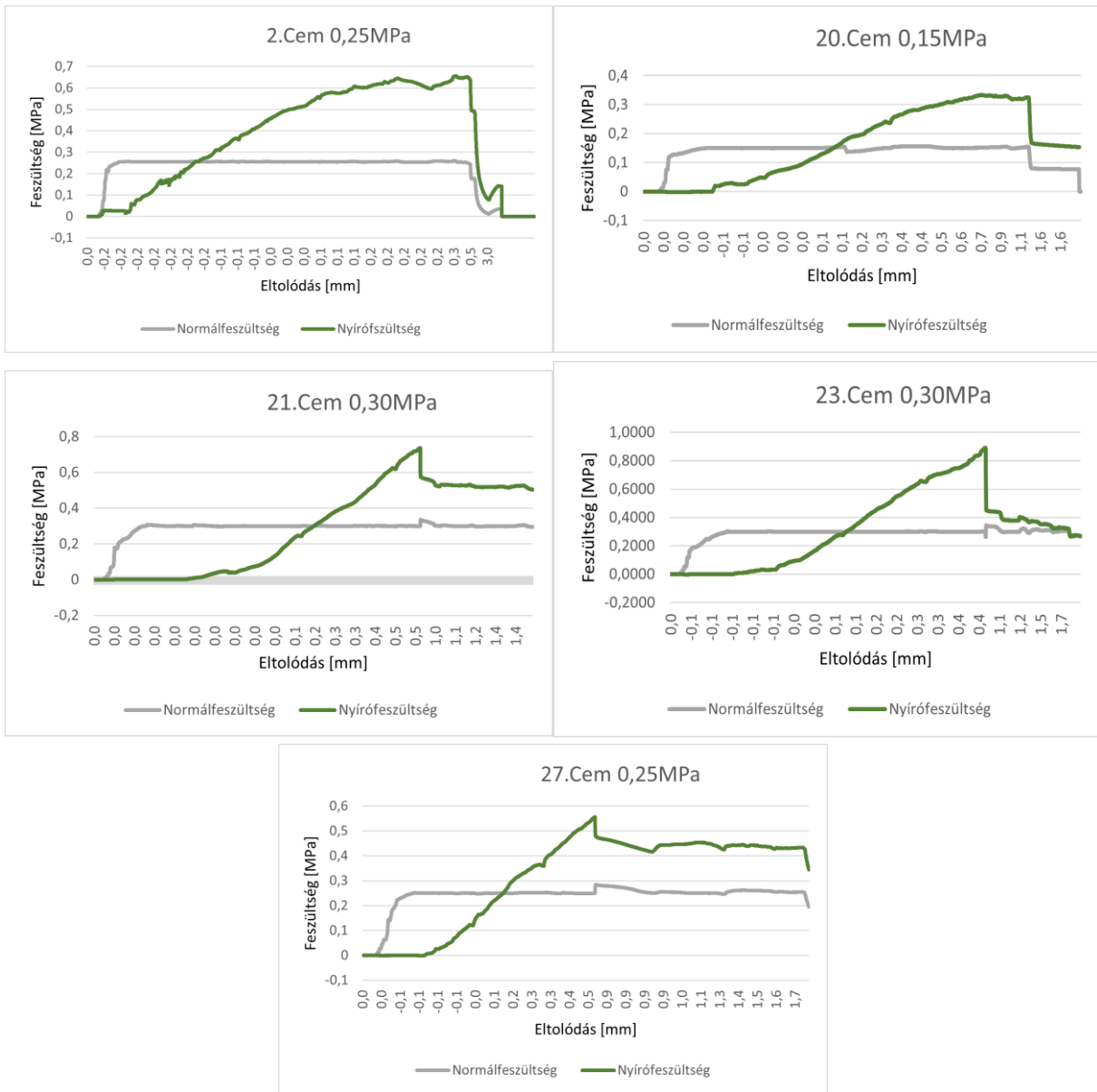
Mészhabarcs nyírása



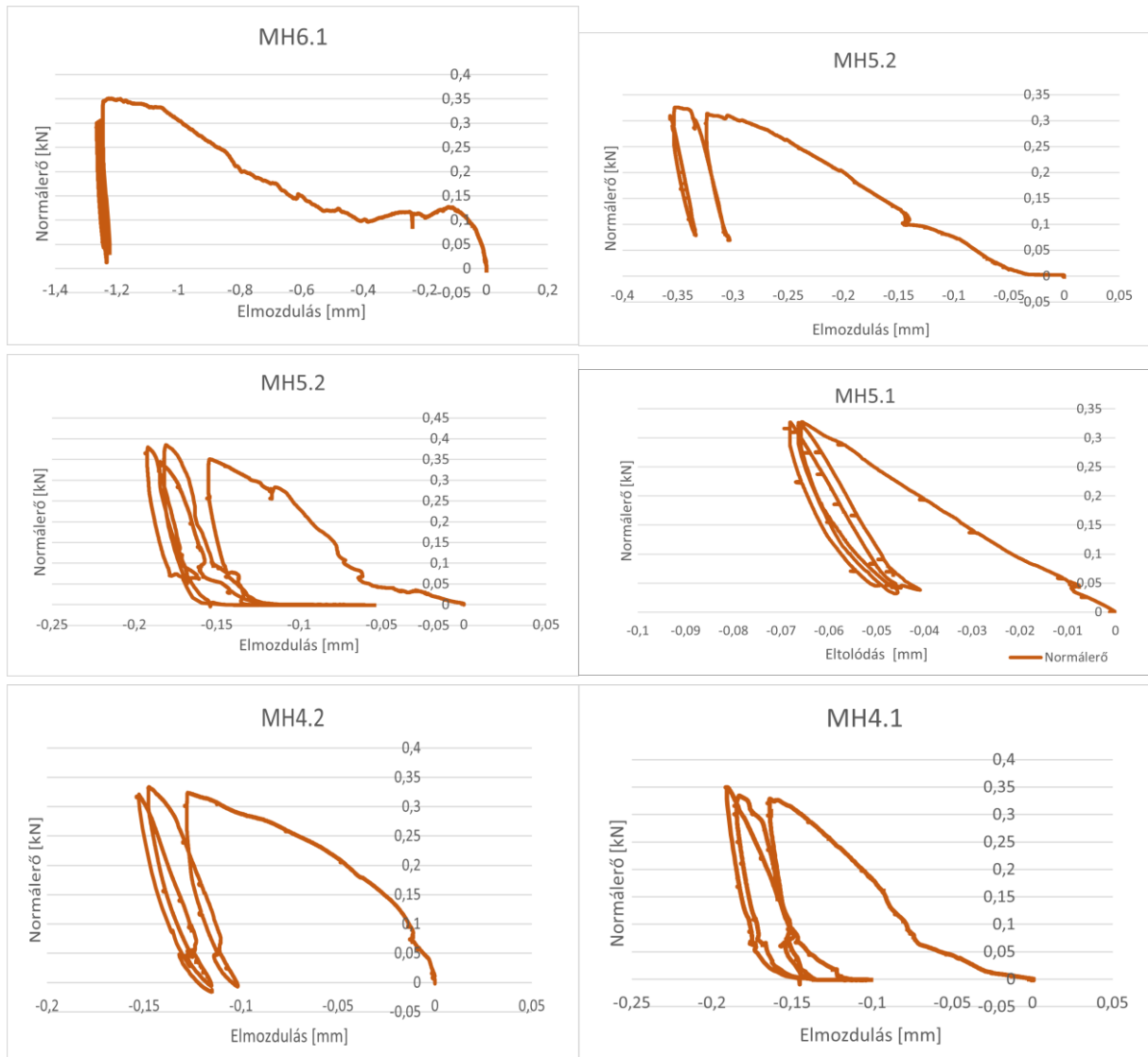




Cementhabarcs nyírása



Mészhabarcs rugalmassági modulusának mérése



Cementhabarcs rugalmassági modulusának mérése

