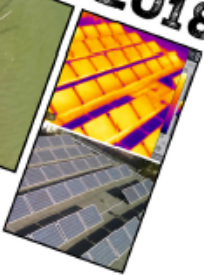
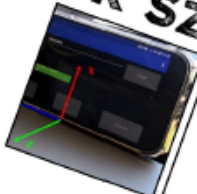
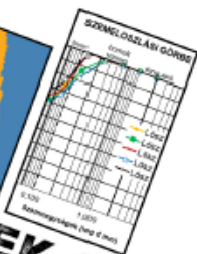


TDK SZEMELVÉNYEK 2018



Válogatott munkák a BME Építőmérnöki Karának
2018. évi TDK Konferenciájáról

TDK Szemelvények 2018

Cím: TDK Szemelvények 2018

ISSN: 2559-9569

Felelős kiadó: Dr. Dunai László dékán

Kiadja a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar (1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

+3614633531 epito.bme.hu)

Szerkesztő: Dr. Takács Bence

Kiadás éve: 2019

Tartalomjegyzék

Bevezető	4
Szagri Dóra Idősoththonok nyári túlmelegedésének dinamikus szimulációval támogatott vizsgálata	6
Gonda Evelyn A pálya-jármű kölcsönhatás mozgásgeometriai vizsgálata közúti vasúti kitérőkben és kis sugarú pályáívekben okostelefonok szenzoradatainak felhasználásával	18
Benkő Gergely Analysis of river bed material composition with Deep Learning based on drone video footages	33
Lajkó Rebeka Hidrométeres talajvizsgálat során a diszpergálószer különböző koncentrációban tett hatása a szemeloszlási görbe alakjára	46

BEVEZETŐ

Kiadványunk válogatás a BME Építőmérnöki Karának 2018. évi Tudományos Diákköri (TDK) konferenciáján bemutatott pályamunkák közül.

Karunkon az elmúlt években többször készült hasonló kiadvány a TDK dolgozatokból, amelynek célja, hogy a TDK konferencia kiemelkedő, szekciójukban első díjas dolgozatait könnyen hivatkozható, rövid terjedelmű tudományos cikk formájában is közreadjuk, és ezzel a publikációs lehetőséggel a tudományos pályájuk kezdetén segítsük a szerzőket.

Napjainkban sok minden változik a felsőoktatásban. Karunkon tanúi lehetünk a hallgatói létszám jelentős csökkenésének. Feltehetően ennek a következménye, hogy a TDK dolgozatok abszolút száma is csökkenésnek indult az utóbbi években. Ugyanakkor a TDK konferenciáink színvonala, hangulata töretlen. Bámulatos, hogy a rengeteg tanulnivaló és egyéb kötelezettség mellett évről-évre önként jelentkeznek diákjaink TDK munkára. Elismerésre méltó az is, hogy zseni koruk ellenére milyen meggyőzően mutatják be tudományos kutatásaik eredményeit. A diákok tudományos kutatásait mostanában több kormányzati kezdeményezés is jelentősen támogatja, többek között az Új Nemzeti Kiválóság Program (ÚNKP). Várjuk, hogy az ehhez hasonló lehetőségek hatására a TDK dolgozatok száma is növekedésnek indul, és ha lehet a beadott dolgozatok színvonala is tovább erősödik.

A kiadvány szerkesztésének idején rendezte egyetemünk az Országos TDK Konferencia Műszaki Tudományi, illetve Kémiai

és Vegyipari szekcióinak konferenciáját. Egyetemünk és különösen az Építőmérnöki Kar eredményeire büszkék lehetünk, a 28 bemutatott pályamunka közül 23 ért el díjat vagy helyezést. Külön öröm, hogy több sikeres pályamunka mögött fiatal oktatók és doktoranduszok állnak témavezetőként, biztosítva ezzel oktatóink körében a TDK iránti elköteleződés folytonosságát. Őszintén reméljük, hogy az OTDK sikerei is hozzájárulnak ahhoz, hogy a 2019. évi kari TDK konferencián ismét magas színvonalú pályamunkák bemutatására fog majd sor kerülni és ezek közül a válogatott pályamunkák kiadványa 2019. évben is meg fog jelenni.

A kiadvány szerkesztése, összeállítása, a borító terve Tóth Flóra, kommunikációs munkatársunk munkája.

Dr. Takács Bence
kari TDK felelős

Dr. Krámer Tamás
tudományos dékánhelyettes

Idősotthonok nyári túlmelegedésének dinamikus szimulációval támogatott vizsgálata (Investigating the summer overheating of elderly homes supported by dynamic simulations)

Szagri Dóra MSc II. évf.

Konzulensek:

Dr. Szalay Zsuzsa egyetemi docens

Építőanyagok és Magasépítés Tanszék

Dr. Csanaky Judit Emília adjunktus

Építőanyagok és Magasépítés Tanszék

Nagy Balázs

Építőanyagok és Magasépítés Tanszék

Kulcsszavak: dinamikus épületszimuláció; hőhullámok; nyári túlmelegedés; kérdőív

1. Bevezetés

A napjainkban megfigyelhető klímaváltozás nem csak az ökoszisztémára van jelentős hatással, befolyása az ételmisszerellásban, mezőgazdaságban és az egészség szempontjából is meghatározó. Elég visszagondolni a 2003-as hőhullámra, mely során több mint 80.000 hőhullámmal összefüggésbe hozható halálesetet regisztráltak 12 ország adatai alapján [1]. A probléma fontosságát mi sem mutatja jobban, minthogy rendszeresen találkozunk a témával a különböző hírforrásokban (televízió, internet, rádió): riportok, interjúk formájában hívják fel a figyelmet a veszélyekre és a megelőzés lehetőségeire.

Magyarország esetében az Országos Katasztrófavédelmi Minisztérium értelmezése alapján hőhullámnak nevezzük, ha 3 egymást követő napon a napi átlaghőmérséklet 26,6 °C felett van. Számos kutatás alapján egyértelműen kimutatható, hogy a hőhullámok alkalmával nemcsak a felmerülő egészségügyi problémák, de a halálozások számának emelkedése

is jelentős. A veszélyeztetettebb csoportok közé tartoznak a csecsemők és fiatalok, illetve a 65 évnél idősebbek, fogyatékosok, szívbetegségekben és magas vérnyomásban szenvedők. A dolgozatban a 65 évnél idősebb csoporttal foglalkozom részletesen, ezen belül is a Budapesten található idősotthonokat vizsgálom a nyári túlmelegedés szempontjából.

2. Szakirodalmi áttekintés

Éghajlati elemzések alapján elmondható, hogy a 25 °C feletti középhőmérsékletű hőhullámos napok száma az ország középső és déli-alföldi területein a legmagasabb, ha az elmúlt évtizedek tendenciát elemezzük. Magasabb hegységeink esetében nem volt jellemző a hőhullámos napok előfordulása, míg az Alpokalja és a Dunántúli-középhegység térségében már számolnunk kell a fellépésükkel melegebb nyarak alkalmával. A 2016-os évig vizsgált legutolsó évtizedben, a hőhullámos napok száma már elérte a 14-et, mely a múlt század elejével összehasonlítva 6 napnyi növekedést jelent [2]. Ha a jövőbeli időjárást tekintjük, úgy a nyári napok számában egyértelmű növekedés prognosztizálható: 2021-2050-re várhatóan 16-20 napra, de bizonyos országrészekben 20 napot meghaladó nyári napokra kell számítani [3]. A magas hőmérséklet nemcsak hőgutát okoz, hanem számos hőmérséklettel összefüggő egészségügyi állapot súlyosbodását vonhatja maga után. A hőhullám egészségre vonatkozó hatásának felmérése olyan kihívást jelentő feladat, amit gyakran alábecsülnek a kutatók [4]. Nem csupán az egészségügyi hatásai jelentősek, hiszen kimutatható hatása van az erőszakos bűncselekmények [5] és a halálos közúti balesetek [6] számában is. A hőhullámok gyakori előfordulása és az extrém meleg időjárás mellett a mentőszolgálatok munkaterhelése is fokozódik [7].

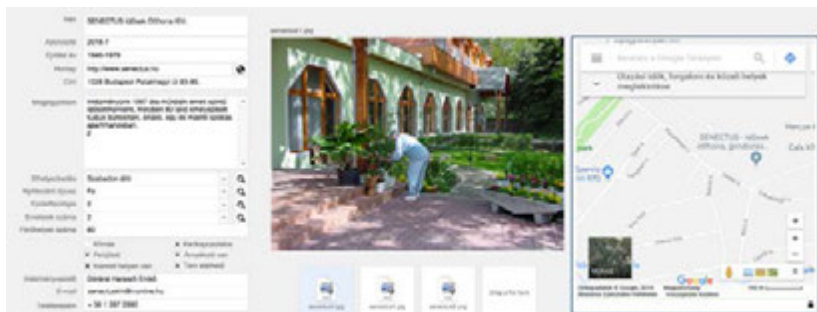
Már az 1970-es években is végeztek kutatást arra vonatkozóan, hogy a légkondicionáló használata miként segíti csökkenteni a hőhullámok hatását az idősotthonokban [8]. Az elemzések kimutatták, hogy a nem légkondicionált épületekben a halandóság szignifikánsan emelkedik, és amennyiben ezekben az épületekben is alkalmaznák a légkondicionáló berendezéseket, úgy jelentősen csökkenthető lehetne a halálesetek száma.

Németországi felmérések alapján 74.753 nőt és 21.055 férfit vizsgáltak a 65 év feletti korcsoportban, akik 2001-2005 között idősotthonokban éltek Baden-Württemberg tartományban [9]. Felvételtkor a lakók több mint fele a 80-89 éves korcsoportba tartozott, ahol 3 kategóriába sorolták őket aszerint, hogy az egészségügyi állapotuknak megfelelően mennyi gondozást igényelnek. Az eredmények alapján ebben az esetben is érvényes az a

megállapítás, hogy a növekvő hőmérséklettel párhuzamosan a halálozási arány is növekszik: 30,0-31,9 °C, 32,0-33,9 °C és 34 °C esetében az arány 18, 26 és 62%-kal emelkedett. Hasonló tendencia volt megfigyelhető a különböző nemeket és gondozási kategóriát elemezve.

3. Adatgyűjtés, kérdőíves felmérés

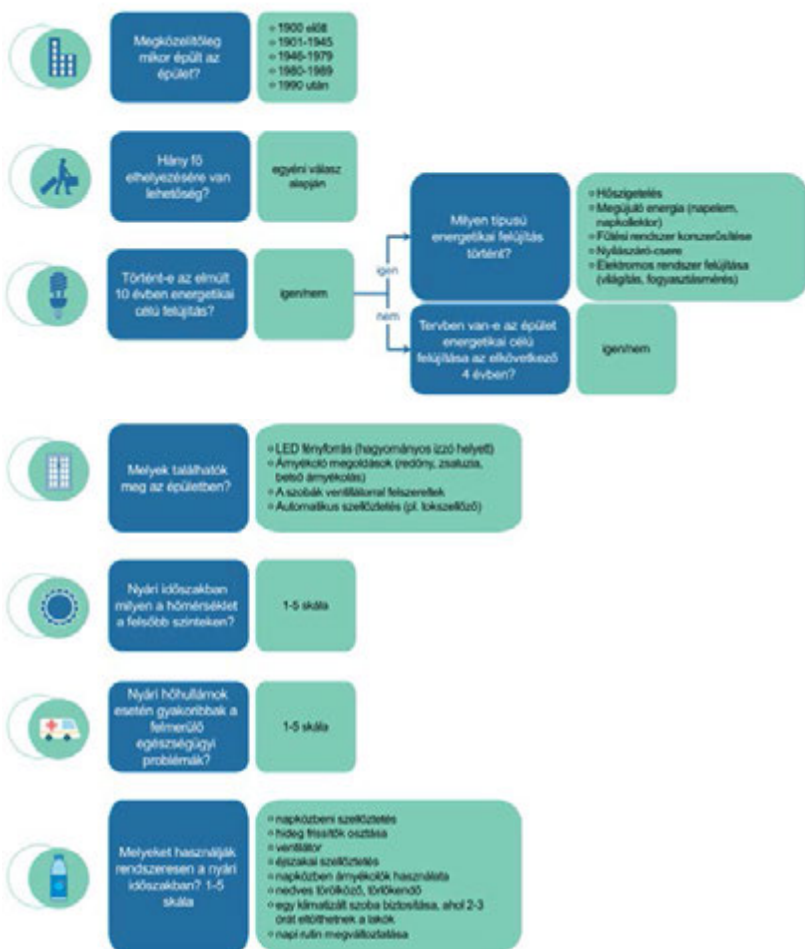
A nyári hőhullámokkal kapcsolatban az idősebb korosztály az egyik legveszélyeztetettebb, így dolgozatomban a budapesti idősothtonokat választottam ki célcsoportként. A vizsgálatba bevont intézményeket internetes kereséssel gyűjtöttem össze. A tanulmányomban összesen 73 idősök otthona képezte az adatbázis alapját, amelybe felvittem az otthonok nevét, címét, a férőhelyek számát, az épület kialakításával kapcsolatos fontosabb tudnivalókat és egyéb kapcsolattartási adatokat (honlap, telefonszám, e-mail cím, intézményvezető neve). A megjegyzések mezőbe jegyeztem fel az épületről elérhető online információkat pl. alapítás éve, elnyert támogatások stb. Az előzetes kutatás alapján az épületszerkezettel kapcsolatos fontosabb információk is feljegyzésre kerültek. Az adatbázis alap elrendezése a 1. ábrán látható.



1. ábra: adatbázis felépítése

3.1 Kérdőíves felmérés

A kérdőív felépítésénél elsődleges szempont volt az összeállítás során, hogy egy gyorsan kitölthető űrlapot készítsék, amely a téma szempontjából releváns információkat megfelelően összegezi. Az elkészítést követően e-mailben elküldtem az intézményvezetőknek az űrlapot, illetve a későbbiekben telefonos megkeresés útján gyűjtöttem be a válaszokat. Összesítésként elmondható, hogy az általam felmért otthonok 41%-a, azaz 30 otthon segítette kitöltéssel a munkámat. A kérdőív szerkezeti felépítése a 2. ábrán látható.

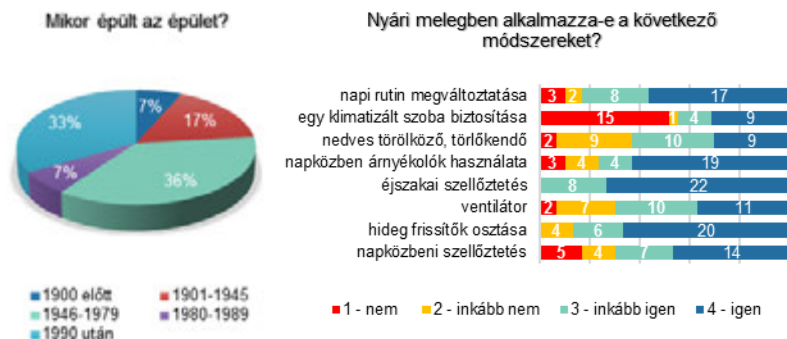


2. ábra: kérdőív szerkezeti felépítése

3.2 Kérdőíves felmérés eredményei

A felmérés eredményei alapján látszik, hogy a budapesti idősothonok típusa, állapota és életkora (3. ábra – bal oldal) igen nagy szórást mutat. A kategóriák felvétele a Nemzeti Épületenergetikai Stratégia [10] szerinti építési idők alapján történt. Az épületek legnagyobb hányada az 1946-1979-es időszakban épült, közel negyede pedig még ezt megelőzően, a század elején. Az újabb építésű otthonok (1990 után) aránya 33%. Az eredményeket

összevetve az elkészült adatbázissal, az is látszik, hogy a kérdőív kitöltésében inkább az újabb építésű otthonok vettek részt, így az eredményből nem lehet teljes következtetést levonni az egész budapesti állományra.



3. ábra: kérdőív eredményei: építés ideje és a nyáron alkalmazott módszerek

A vizsgált épületek nagy részében, 20 otthonban történt valamilyen energetikai felújítás az elmúlt 10 évben, a maradék 10 épület közül pedig 4 tervezi az épület felújítását az elkövetkezendő 4 évben. A 20 otthon közül leggyakrabban a nyílászáró-csere és a fűtési rendszer korszerűsítése történt meg. A felújítási megoldásokat általában kombinálták, csupán 4 esetben végeztek 1-1 felújítási opciót.

A kérdőív további részében az energiatakarékos és a hőhullámok során kiemelt fontosságú berendezéseket is felmértem. A vizsgált otthonok 60%-a LED fényforrást használ, illetve 80%-ban árnyékoló megoldás is található az épületekben. A ventilátorok 26%-os, míg az automatikus szellőztetés 13%-os aránya viszont elég alacsony.

A felsőbb szinteken tapasztalható hőmérséklet szempontjából kritikus a helyzet: az otthonok több mint 66%-a szerint *nagyon meleg*, vagy *meleg* van a szobákban, akár annak ellenére is, hogy az épület felújításon esett át. A 30 otthon közül egy sem választotta a *kellemes* a hőmérséklet opciót, csak 10% szerint *viszonylag kellemes* a hőmérséklet.

Az utolsó kérdésben a nyári időszakban alkalmazott módszereket mértem fel: a válaszadók fele rendszeresen szellőztet napközben is a nyári melegben, annak ellenére, hogy inkább az éjszakai szellőztetés ajánlott. A leggyakoribb megoldás a napközbeni árnyékolóhasználat, éjszakai szellőztetés, hideg frissítők osztása és a napi rutin megváltoztatása, ezeket minden otthon legalább fele rendszeresen alkalmazza (3. ábra - jobb oldal).

Az épületekkel kapcsolatos főbb megállapítások:

- A vizsgált otthonok összesen 3085 főt tudnak befogadni, ami a budapesti kapacitásnak mintegy fele.
- A válaszadók többsége 1946-1979 között épült épületben dolgozik, és a budapesti épületek többségében nem található klímaberendezés, habár az épületek 30%-ban van egy klimatizált szoba, ahol a lakók eltölthetnek néhány órát.
- Az épületek 67%-a átesett valamilyen energetikai felújításon, ugyanakkor a válaszadóknak csupán 10%-a mondja azt, hogy a felsőbb szinteken viszonylag kellemes a hőmérséklet.
- Az otthonok 80%-a rendelkezik árnyékoló megoldásokkal, illetve 60%-a LED fényforrást használ.

Az alkalmazott módszerekkel kapcsolatos megállapítások:

- Minden épületben szellőztetnek éjszaka.
- A ventilátorok az esetek 26%-ban rendelkezésre állnak, használatuk ~70%-os.
- Az otthonok nagy részében (80%) megváltoztatják a napi rutint a nagy melegben, azaz az esetleges foglalkozások, torna, séta stb. időpontja módosul (pl. reggeli vagy késő délutáni órákra időzítik) a meleg idő miatt.
- A legnépszerűbb módszerek közé tartozik a hideg frissítők osztása (86%), nedves törölkendőt, törölközőt pedig 63%-ban használnak.

4. Dinamikus épületszimuláció

A választott épület a kérdőíves felmérés alapján az 1946-1979-es időszakban épült, 131 fő elhelyezésére van lehetőség, így az eredmények alapján a nagyobb kapacitású otthonok közé sorolható. Történt energetikai célú felújítás: hőszigetelés, nyílászáró-csere és napelemek (136 db) telepítését is elvégezték. A helyszíni mérések során megvizsgáltam az épület és az alaprajzok esetleges hiányosságait, és kiegészítő méréseket végeztem a szimulációhoz szükséges geometria elkészítéséhez. A helyszíni bejárás során megállapítottam a homlokzati hőszigetelések méretét, megvizsgáltam a beépített nyílászárók tulajdonságait, illetve a beállított téli fűtési hőmérsékleteket. Az épületre vonatkozóan csak alaprajzok álltak rendelkezésre, így a rétegrendek felvétele részben a helyszíni mérések, illetve a korszak jellemző rétegrendjei alapján történt. A felvett szerkezetek hőátbocsátási tényezőinek értéke az 1. táblázatban olvasható.

1. táblázat: vizsgált épület hőátbocsátási tényezői

Szerkezet neve	Hőátbocsátási tényező (W/m ² K)
Pince falazat	2,156
Talajon fekvő padló	2,874
Homlokzati fal	0,366
Homlokzati fal (iroda)	1,462
Lábazati fal	0,674
Közbenső födém	0,859
Zárófödém	1,313
válaszfal (10 cm)	1,477
válaszfal (blokkos)	2,065

A szimulációhoz használt időjárásfájl egy generált időjárás, Budapest-Lőrinc, Kecskemét, Szarvas és Debrecen állomás meglévő mérési adatait is felhasználva, azokból interpolálva, ugyanis a vizsgált otthon Budapesten, a 10. kerületben található, melyhez nem áll rendelkezésre konkrét adatsor. A dolgozat része a jövőbeli klíma hatásainak vizsgálata is. Ehhez 2050 és 2100-ra vonatkozó, IPCC A2 Szenárió szerint generált időjárással dolgoztam. A levegő hőmérséklete minden jövőbeli klíma esetében jelentősen emelkedik, az évi átlagos hőmérséklet értéke: 12,38 °C, 2050-ben 14,38 °C, míg 2100-ban 16,44 °C, mely kb. 2 °C növekedést jelent évente.

A belső tervezési feltételek esetében az elvárt minimális hőmérsékleteket adtam meg: a pincehelyiségben, az irodarészen és az épület többi részében 20 °C az elvárt hőmérséklet. A déli oldalon lévő árnyékolók működtetésének „célja” a túlmelegedés csökkentése (reduce overheating profil), továbbá beállítottam az árnyékolási faktorokat is. Az otthon déli oldalán több nagyméretű fa is található 5 m-re a homlokzattól, mely láthatóan befolyásolta a benapozottságot, illetve a pillérek túllógása a homlokzati síkon szintén módosította a benapozás mértékét.

A légcserét tekintve 0,1 1/h infiltrációt állítottam be 0,5-ös légcsereszámmal, a nyári időszakban viszont az éjszakai órákban (este 20-tól reggel 6 óráig) emelt légcserét (2 1/h) használtam a referencia modell elkészítése során. A belső nyereségek tekintetében egyénileg állítottam be a zónákban tartózkodó emberek számát és a végzett cselekvést. Ez általános esetben ülő vagy könnyebb ülő cselekvést végző, illetve lassan sétáló személyeket jelentett.

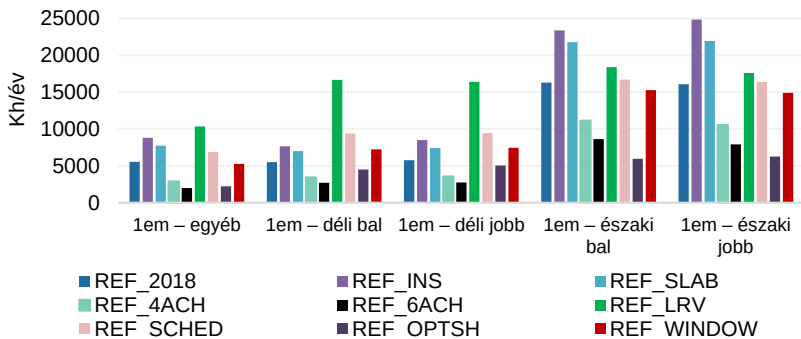
Az alap modellhez képest többféle felújítási javaslatot is vizsgáltam szintén a nyári túlmelegedések értékét figyelve. A vizsgált változatok a 2. táblázatban olvashatók.

Első lépésként a jelenlegi időjárásfájllal dolgoztam, és 1-1 opciót változtattam a modellben, megvizsgálva azok hatását. Majd a kapott eredmények alapján készítettem egy új modellt az összes felújítási módszert (8.opció) ötvözve, melyet a 2050-re és a 2100-ra vonatkozó időjárásfájllal is megvizsgáltam. 9. opcióként a hőszigetelés nélküli épületet vizsgáltam az előzőek alapján megállapított legoptimálisabb megoldásokkal.

2. táblázat: dinamikus épületszimuláció során vizsgált opciók

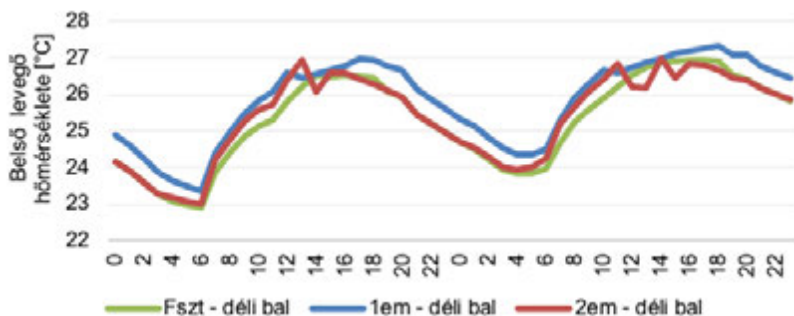
Opció neve	Leírás	Szimuláció azonosító
1. opció	20 cm homlokzati/lábazati és zárófödém hőszigetelés	REF_INS
2. opció	csak zárófödém hőszigetelés (20cm)	REF_SLAB
3/a opció	nyári légcseré estí értéke: 4 1/h	REF_4ACH
3/b opció	nyári légcseré estí értéke: 6 1/h	REF_6ACH
4. opció	redőny működtetése „limit radiation value” szerint (500W)	REF_LRV
5. opció	redőny működtetése ütemterv szerint	REF_SCHED
6. opció	a leghatékonyabb redőnybeállítás szerint, minden nyílászáró esetében használva	REF_OPTSH
7. opció	jelenlegi nyílászárók helyett jobb, 0,8 W/m ² K értéket alkalmazva	REF_WINDOW
8. opció	összes felújítási módszert ötvözve	REF_FULL
9. opció	az extra hőszigetelés nélküli épület, az előzőek alapján megállapított legoptimálisabb megoldásokkal	REF_COST

Az eredmények értékelése elsősorban az ODH₂₆ indikátor szerint történt, melynek jelentése „Overheating Degree Hours above 26 °C”, azaz a 26 °C felett alakuló hőmérséklet óráinak száma. Ezzel meghatározható, hogy mennyi ideig és milyen mértékben tartott a jelzett túlmelegedés (mértékegysége Kh/a, azaz Kelvin*óra/év).



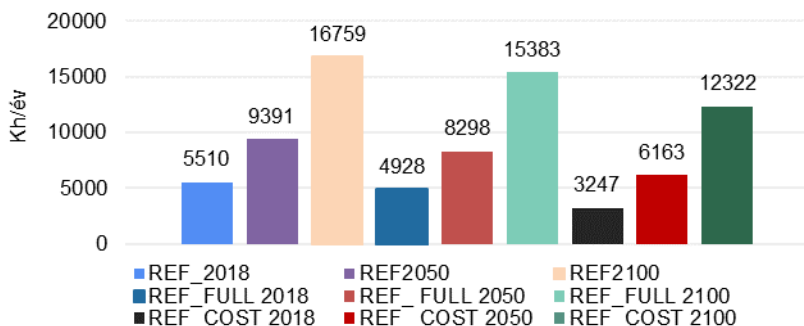
4. ábra: ODH₂₆ indikátor értékei az első emeleti blokkokban különböző változatok esetén

A vizsgálat alapján az épület hőszigetelése esetében az indikátor értéke jelentős mértékben, 68% és 86%-kal emelkedik (4. ábra). Ennek oka elsősorban az, hogy a könnyen felmelegő épület a tartósan meleg napok mellett nehezen tud lehűlni, az alkalmazott éjszakai légcseré értéke nem elegendő a hőmérséklet jelentős csökkentéséhez. Amennyiben csak a földemen helyezünk el hőszigetelést szintén ez a jelenség tapasztalható. Ezekben az esetekben a hőszigetelés elhelyezése gátolja az éjszakai égbolt felé történő lesugárzást. Az éjszakai légcseré számának emelése azonban jelentősen csökkentette a túlmelegedett órák számát, 4 l/h értéket alkalmazva 36%-kal, 6 l/h értéket alkalmazva pedig 52%-kal. A nyílászárók cseréje nem eredményezett szignifikáns különbséget, míg a redőny üzemeltetési szokások vizsgálata nagyban befolyásolta az eredményeket. A referenciaépületben használt „reduce overheating” opciónál egyik megoldás sem bizonyult jobbnak. Ez a beállítás automatikusan lehúzottnak feltételezi a redőnyöket, amint eléri a zóna hőmérséklete a maximális hőmérsékletet. „Limit radiation value” beállítás esetében a redőny mindaddig lehúzva marad, amíg a sugárzás értéke eléri az 500 W-ot. A „schedule” beállítás esetén viszont egyedi ütemterv megadására van lehetőség, itt a valósághoz hasonlóan nappal a redőnyök le voltak engedve, míg éjszaka felhúzottnak feltételeztem őket, különböző sötétítési fokkal beállítva.



5. ábra: belső léghőmérséklet változása emelt légcserét alkalmazva

A jövőbeli klímát elemezve az utolsó eredménycsoportot tekintve (6. ábra), melyben elhagytam a további hőszigetelést az épületről, illetve csak az optimális árnyékolást/szellőztetést alkalmaztam, nagymértékű (75% - 50%) csökkenést lehetett elérni mind a három klímafajl esetében. A 2018-as időjárást vizsgálva 75%-os, míg a 2050-est elemezve közel 50%-ban sikerült csökkenteni az indikátor mértékét.



6. ábra: épület ODH_{26} indikátorának változása jövőbeli klíma esetén

Összességében a választott módszerek hatékonyan csökkentették a nyári időszakban tapasztalható meleg órák számát, leghatékonyabb megoldásnak az optimalizált felhasználó szokások (REF_COST) bizonyultak, de a hőszigeteléssel kiegészített változat is (REF_FULL) is hatékony a probléma megoldásának szempontjából.

5. Összefoglalás

Kutatásom nagyban hozzájárult a budapesti idősotthonok állapotának felméréséhez, a budapesti kapacitás mintegy feléhez sikerült eljuttatni az űrlapokat és megkérdezni a véleményüket a témában. A kérdőíves felmérés eredményei alapján elmondható, hogy ez az épületcsoport valóban kiemelten veszélyeztetett. Mindenképp pozitív eredménynek mondható, hogy az otthonok 80%-a rendelkezik árnyékoló megoldásokkal, illetve 60%-a LED fényforrást használ, ellenben a ventilátorok száma csekélynek mondható (26%).



7. ábra: Balról: vizsgált épület, zónafelbontás, elkészült modell

A felmérés tanulsága, hogy az épületek nyári túlmelegedése egy igen komoly probléma ma Magyarországon, és kiemelten fontos foglalkoznunk nemcsak a téli fűtési energia csökkentésével, hanem az épületek nyári túlmelegedésével is. A dolgozat készítése során létrehozott adatbázis nagy segítség lehet későbbi elemzések készítéséhez, illetve sérülékenységi index létrehozásához is.

A dinamikus szimuláció eredményei alapján meghatároztam azokat a főbb paramétereket, amelyek nagy szerepet játszanak a nyári belső hőmérséklet csökkentésében. Megfelelő iránymutatást nyújthatnak, hogy a nyári túlmelegedés során milyen módszerekkel lehet javítani egy légkondicionáló nélküli épület túlmelegedésén.

Főbb megállapítások:

- A vizsgálatok alapján az épület hőszigetelése esetében az indikátor értéke 68-86%-kal emelkedett, azaz az épület felmelegedése szempontjából nem különösebben kedvező a használata. Viszont nem szabad elfeledkeznünk arról, hogy a további hőszigeteléssel a fűtési energiafogyasztás mértéke szignifikáns mértékben csökkenthető.
- Másik megállapítás, hogy a hőszigetelés használata megváltoztatja az épület felmelegedésének dinamikáját: az eredetileg jobban felmelegedő 1. szint hőszigetelés alkalmazása után kevésbé melegszik fel, ebben az esetben a 2. emelet lesz a legmelegebb része az épületnek.
- Az éjszakai légcseré számának emelése jelentős mértékben segítette a belső hőmérséklet csökkentését: 4 1/h értéket alkalmazva 36%-kal, 6 1/h értéket alkalmazva pedig 52%-kal.
- A redőnyök működtetésének is kiemelt hatása van, bár a legjobb eredményt a szoftveren belül a „reduce overheating” profillal sikerült elérni, ám ez nem feltételen felel meg a valós működtetési rutinnak.

Célszerű lenne a továbbiakban monitoring méréseket végezni legalább 1 éves időtartammal, ami alapján lehetőség lenne a modell kalibrálására. Illetve érdemes lenne részletesebben felmérni az épületekben a felhasználói szokásokat, és ez alapján elemezni tovább a modelleket. Ugyan a dolgozatban mesterséges hűtés nélküli épületet elemeztem, számos előzőleg bemutatott tanulmány javasolja a légkondicionáló berendezés használatát. Ennek az egészségügyi létesítményekben kiemelt szerepe van a hőhullámokkal kapcsolatos halálozások csökkentésében, így célszerű lenne megvizsgálni az alkalmazását, beruházási, fogyasztási és élettani hatások szempontjából is.

6. Köszönetnyilvánítás

A tanulmány alapjául szolgáló kutatást az Emberi Erőforrások Minisztériuma által meghirdetett Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program támogatta, a BME FIKP-VÍZ tématerületi programja keretében.

7. Hivatkozások

- [1] J. Robine, S. L. Cheung, S. Le Roy, H. Van Oyen, and F. R. Herrmann, “Report on excess mortality in Europe during summer 2003,” *Statistics (Ber.)*, vol. 2003, no. February, p. 15, 2007.
- [2] Z. Bihari *et al.*, “Magyarország nemzeti atlasza: éghajlat.” MTA CSFK Földrajztudományi Intézet, pp. 58–69, 2018.
- [3] M. Lakatos *et al.*, “Éghajlati szélsőségek változásai Magyarországon : közelmúlt és jövő,” p. 11, 2012.
- [4] J. Kravchenko, A. P. Abernethy, M. Fawzy, and H. K. Lysterly, “Minimization of heatwave morbidity and mortality,” *Am. J. Prev. Med.*, vol. 44, no. 3, pp. 274–282, 2013.
- [5] B. Sanz-Barbero, C. Linares, C. Vives-Cases, J. L. González, J. J. López-Ossorio, and J. Díaz, “Heat wave and the risk of intimate partner violence,” *Sci. Total Environ.*, vol. 644, pp. 413–419, 2018.
- [6] C. Y. H. Wu, B. F. Zaitchik, and J. M. Gohlke, “Heat waves and fatal traffic crashes in the continental United States,” *Accid. Anal. Prev.*, vol. 119, no. April, pp. 195–201, 2018.
- [7] J. Cheng *et al.*, “The burden of extreme heat and heatwave on emergency ambulance dispatches: A time-series study in Huainan, China,” *Sci. Total Environ.*, vol. 571, pp. 27–33, 2016.
- [8] M. Marmor, “Heat wave mortality in nursing homes,” *Environ. Res.*, vol. 17, no. 1, pp. 102–115, 1978.
- [9] J. Klenk, C. Becker, and K. Rapp, “Heat-related mortality in residents of nursing homes,” *Age Ageing*, vol. 39, no. 2, pp. 245–252, 2010.
- [10] ÉMI Építésügyi Minőségellenőrző és Innovációs Nonprofit Kft., “Nemzeti Épületenergetikai Stratégia,” pp. 1–101, 2015.

A pálya-jármű kölcsönhatás mozgásgeometriai vizsgálata közúti vasúti kitérőkben és kis sugarú pályaívekben okostelefonok szenzoradatainak felhasználásával

(Kinematic analysis of vehicle-track interaction in tramway turnouts and small radius curves using smartphone sensor data)

Gonda Evelyn BSc IV. évf.

Konzulens(ek):

Dr. Vinkó Ákos adjunktus

Út és vasútépítési Tanszék

Előhegyi Zoltán osztályvezető

VAMAV Vasúti Berendezések Kft.

Kulcsszavak: okostelefon; inerciális szenzor; közúti vasúti kitérő; CAF villamos; mozgásgeometria

Bevezetés

Az utazási komfort szempontjából mértékadó paraméterek határértékei (a_0 kiegyenlítettlen szabad oldalgyorsulás és h oldalgyorsulás-változás) a hatályos hazai előírásokban nincsenek alátámasztva a Budapesten üzemeltetett közúti vasúti járművek mérésel meghatározott mozgás-geometriai viselkedésének statisztikai vizsgálatával. Célom a kitérők eltérítő ágán és a hozzájuk csatlakozó íveken járműáthaladáskor tapasztalható keresztirányú mozgásgeometriai jellemzők (a_0, h) tényleges meghatározása volt gyorsulásmérésre alkalmas okostelefonokkal.

A jármű kinematikai mozgásjellemzőinek mérésére egy telefonos applikációt fejlesztettünk, amely alkalmas a telefon összes szenzoradatainak és a GPS helyadatoknak az időalapú szinkronizált rögzítésére. A szolgáltatott adatok validálása során a telefonok mért adatainak valós fizikai tartalmát ellenőriztem az ismert szöghelyzet, elfordulás és pozíció esetén. A vizsgált

szenzoradatok (gyorsulásmérő, dőlésmérő, giroszkóp) nagy pontossággal visszaadták a fizikából jól ismert alap törvényszerűségeket.

A Budapesten üzemeltetett közúti vasúti járművek közül a CAF Urbos3 típusú modern villamosok futási tulajdonságait vizsgáltam kiváló műszaki állapotú „Ph” rendszerű kitérőkön való áthaladás esetén. A vizsgált kitérők eltérítő ágán és a csatlakozó pályáíveiken való áthaladáskor jellemző járműreakció vizsgálata előtt meghatároztam a 3 és az 5 modulós CAF járművek keresztirányú utazási komfort szempontjából mértékadó keresztmetszetét, ennek ismeretében a kitérőméréseket már csak a mértékadó járműkeresztmetszetben végeztem el.

A kutatómunkám során vizsgáltam a mért és a közelítő képletekkel becsült oldalgyorsulás adatok eltéréseit, valamint összevettem a mért adatokat a hatályos szabványokban meghatározott kvázi-statisztikus határértékekkel. A fentiekben túlmenően rámutattam a vizsgált jármű ívérzékelésének sajátosságaira és összegyűjtöttem a különböző szerkezeti és geometriai kialakítású „Ph” rendszerű kitérők esetén rögzített gyorsulás jelalakok jellegzetességeit is.

1. A kinematikai mozgásjellemzőkre vonatkozó hatályos hazai, uniós és külföldi előírások közúti vasúti alkalmazásának korlátai [1][2][3][4]

A pályatervezési előírásokat tekintve a megkívánt tervezési sebességhez tartozó átmeneti ív és minimális ívsugar paraméterek megadása a kvázi-statisztikus oldalgyorsulás-változás megengedett értékétől függ. Közúti vasúton, a járművön álló utasoknak is a legjobb utazási komfortot kell biztosítani, ebből a feltételből a minél szigorúbb, kisebb h -vektor érték következik. Ha nagyon szigorú a h -vektor értéke, akkor nagy átmeneti ívhosszakat kell betervezni, ami közúti vasúton nem minden esetben fér el a kötöttségek és a rendelkezésre álló szűk hely miatt. Ilyenkor vagy a tervezési sebesség csökkentése mellett döntenek a tervezők (ami utazási komfort szempontjából nem javasolt), vagy felmentést kérnek a hatóságtól.

A hazai közúti vasúti pályatervezési előírásokban (OVSZ, „Sárga könyv”) ugyan van határérték a kinematikai mozgásjellemzőkre, azonban ezek nem határozzák meg azok pontos mérési körülményeit és az adatfeldolgozási módszereket sem.

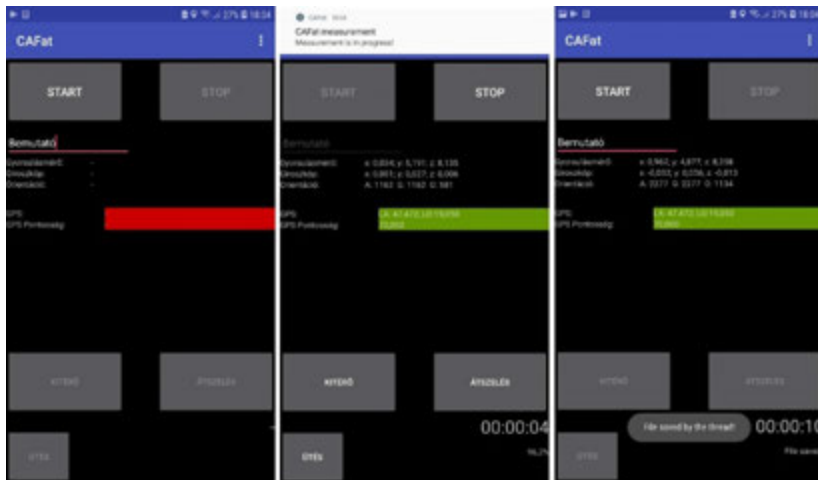
Az uniós előírások közül fontos megemlíteni az EN 12299:2009 szabványt, ahol tisztázott a mérés folyamata, helye és a kiértékelés módja is. A szabvány kitér a jármű mértékadó keresztmetszetének meghatározási módszerére és a mérés magassági pozíciójára (ülő, vagy álló utas esetében mért pontok) is. Fontos megjegyezni, hogy a fenti szabványban leírt mérési feltételek csak

nagyvasúti járművek esetén lettek validálva. A közúti vasúti járművek nagyvasúttól eltérő sajátosságai miatt csak iránymutatásként alkalmazhatók a szabványban megfogalmazott kritériumok, azok közúti vasúti alkalmazhatóságát vizsgálni kell! A fentiekben túlmenően a kinematikai mozgásjellemzők határértékeinek pontosabb megállapításához célszerű lenne figyelembe venni a Budapesten közlekedő összes jármű méréssel meghatározott futásjellemzőit is.

2. A jármű kinematikai mozgásjellemzőinek alkalmazott mérési módszere

2.1 A mérő applikáció bemutatása

Napjainkban, a középkategóriás okostelefonokban olyan szenzorok sokasága is megtalálható (többek között a *gyorsulásmérő*, *giroszkóp*, *dőlésmérő*), melyek adatait a kinematikai mozgásjellemzők méréséhez is fel lehet használni. A szenzoradatok rögzítéséhez szükséges volt egy jól megtervezett adatlekérő szoftver, a **CAFat applikáció**, amelyet *Csikós Attila* szoftverfejlesztő közreműködésével dolgoztam ki. A **CAFat**-ba számos felhasználást könnyítő funkció is bekerült a mérések rögzítése mellett. Küllemét tekintve a lehető legegyszerűbb kinézetre törekedtünk (*1. kép*).



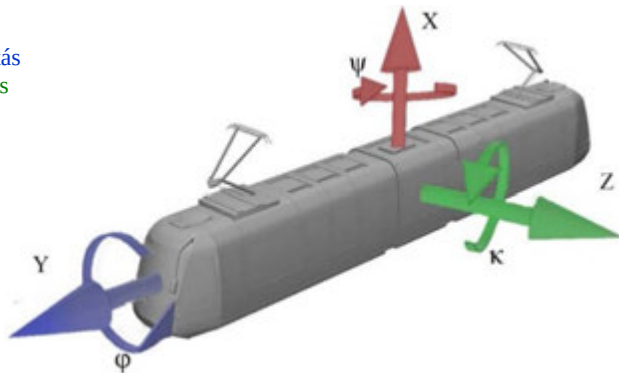
1. kép: A CAFat mérőprogram működéséről készült képernyőfelvétel (a.) a program indítása előtt, b.) mérés közben c.) fájl mentésekor

A szolgáltatott adatok egy *.csv fájlban kerülnek kiírásra, a mért paraméterek az alábbiakban kerülnek felsorolásra:

- A mérés kezdetétől eltelt idő.
- **Jármű sebesség** [m/s], mely adott időpontban a GPS adatokból meghatározott pillanatnyi sebességet mutatja.
- A **földrajzi szélesség és hosszúság**, melyek alapján földrajzi koordináta rendszerben megkapjuk a mérés helyét.
- A **GPS helyadatok meghatározásának pontossága** [m].
- A **három mérési tengelyhez tartozó gyorsulás adatok** [m/s²]. Jelen kutatómunkában az oldalgyorsulás, vagyis a keresztirányú komfortérzet fő befolyásoló tényezőjének kimutatásában nyújt segítséget.
- Az **orientációs adatok** [°] (továbbiakban Dőlésmérő): a telefon térbeli elfordulását mutatják a mágneses északhoz és a gravitációs vektorhoz képest.
- A **háromtengelyű giroszkóp adatai** [rad/s] Az orientációhoz hasonlóan a kötöttpályás közlekedés kinematikai vizsgálatánál, az ívviszonyok illetve a túlemelés kimutatásánál nyújt segítséget.
- A **markerezés**, mely a mérő applikáció beépített gombjainak adott időhöz tartozó megnyomásakor megjelenő információk helyei.

Az **1. ábra** a mérési irányokat és a rajtuk azonosítható szabálytalan járműmozgásokat szemlélteti.

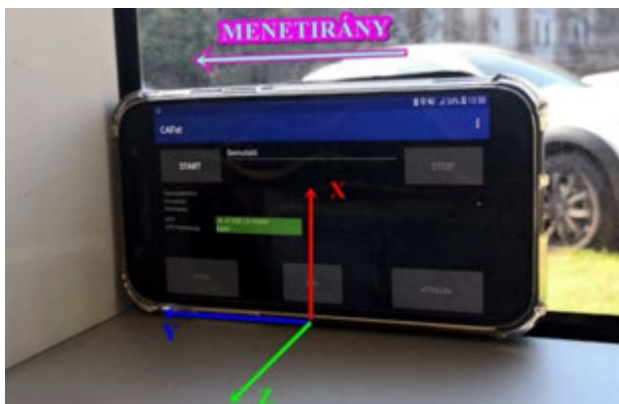
X tengely: rázás
Y tengely: rángatás
Z tengely: szitálás
 ψ : kigyózás
 ϕ : támolgás
 κ : bólintás



1. ábra: CAFat applikáció mérési tengelyeinek értelmezése és a szabálytalan járműfutás kapcsolata

2.2. Mérési elrendezés

Az okostelefonokban lévő szenzorok tengelyelrendezése teleföntípustól független, szabványosított elrendezés. A gyorsulásmérő, mágneses iránytű és a giroszkóp alkalmasak a térbeli mozgás leírására (3 mérési tengely). A mérési tengelyeik jobb kezes koordináta rendszert követnek. A tengelyek pontos elhelyezkedését a **2. ábrán** láthatjuk. Ezen tengelyek körüli elfordulások pozitív irányát is a jobbkezes-szabály határozza meg. A mérések során a telefont a hosszú oldalával fektetve helyeztem a kocsiszekrény falára úgy, hogy az y-tengely pozitív iránya megegyezzen a menetiránnyal. A mérések túlnyomó részében egy szilikon pad segítségével rögzítettem a jármű ablakához a készüléket, ezzel elkerülhetővé vált, hogy valamilyen emberi hiba által okozott mozgás rossz eredményt adjon.



2. ábra: Célszerű mérési elrendezés a CAF villamos ablakának alsó sarkában (gumipaddal rögzítve)

2.3 A mért és szolgáltatott paraméterek értelmezése

Kiemelt példaként a *giroszkóp* és az *oldalgyorsulás* adatainak kapcsolatát részletezem, mely a kiértékelésem szerves részét képezte.

Oldalgyorsulás és giroszkóp adatok kapcsolata [5]

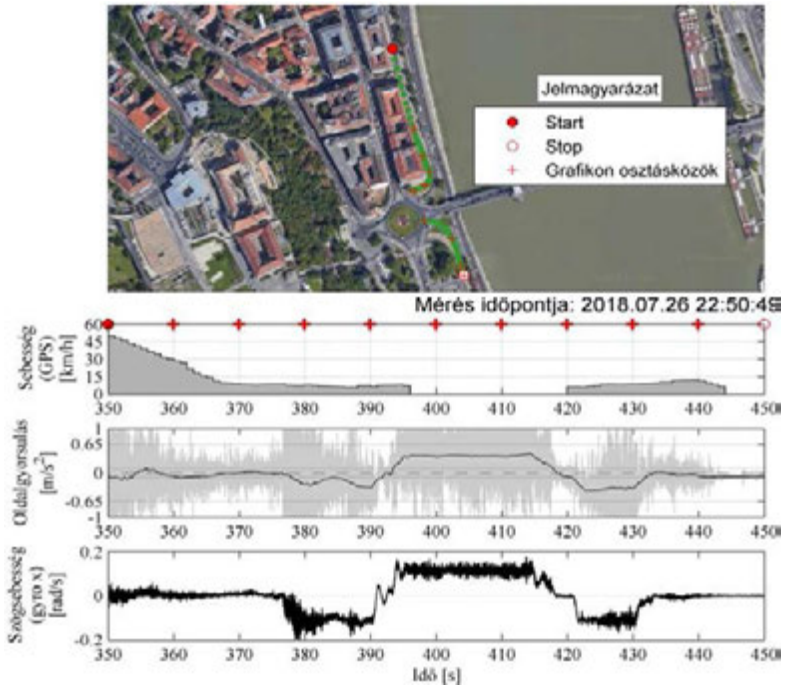
A **3. ábra** az oldalgyorsulás és a giroszkóp adatokat hasonlítja össze. A felső diagram a jármű sebességét, a középső a nyers (szürke) és az ívviszonyokat jellemző szűrt oldalgyorsulás komponensét (fekete), míg az alsó a szűrés nélküli giroszkóp adatot ábrázolja. A mérés során egy CAF Urbos3, 5 modulós villamos jobb hátsó ablakánál végzett mérés látható a Lánchíd alagútban. Az oldalgyorsulás és giroszkóp adatok láthatóan jól hasonlítanak

(3. ábra 2. és 3. grafikon), melynek oka, hogy a giroszkóp által szolgáltatott adatokból, a (2.1) összefüggés alapján számolható az oldalgyorsulás.

$$a_0 = v \cdot \omega = v \cdot \frac{v}{R} = \frac{v^2}{R} \quad (2.1)$$

ahol a_0 [m/s²]: oldalgyorsulás,
 v [m/s]: mért járműsebesség,
 ω [rad/s]: szögsebesség,
 R [m]: ívsugár,

Fontos megjegyezni, hogy a (2.1) összefüggés csak túlemelés nélküli pályaszakaszon és állandó járműsebesség mellett alkalmazható eredményesen.



3. ábra: Az oldalgyorsulás és a giroszkóp adatok kapcsolata (CAF villamoson - Samsung Galaxy S8 készülékkel mérve)

2.4 A vizsgált jármű utazási komfort szempontjából mértékadó keresztmetszetének meghatározása [6][7][8][9]

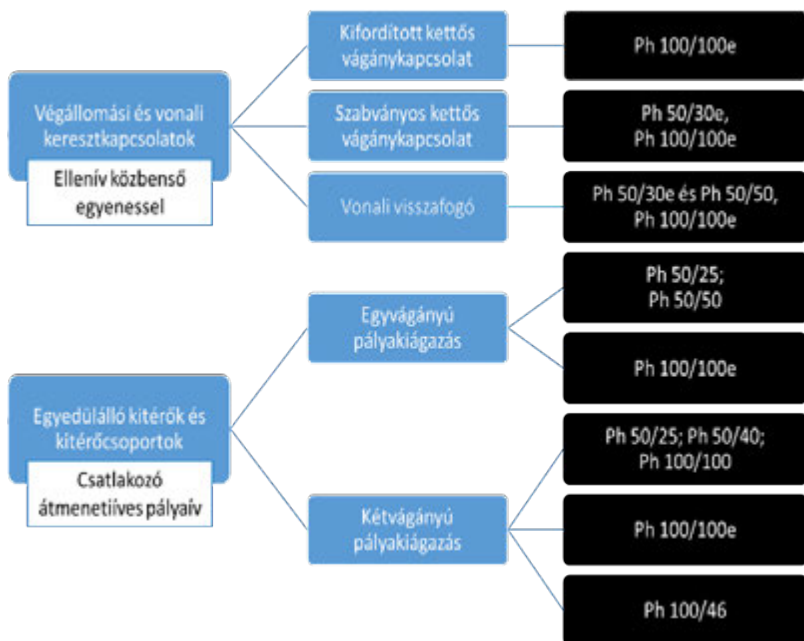
Budapesten a jelenleg üzemszerűen közlekedő járműpark nem tekinthető homogénnek, illetve az OVSZ (Országos Vasúti Szabályzat) sem tér ki arra, hogy a kinematikai mozgásjellemzőket a jármű kocsiszekrényén belül pontosan hol kellene értelmezni. A gyakorlatban alkalmazott közelítő képletekben a jármű tömegközéppontjában értelmezzük őket. A mozgásjellemző vektorok értékei azonban a súlyponttól távolodva jelentősen változhatnak. Különösen igaz ez az állítás a multicsuklós járművek esetén, ahol a „forgóvázak” és a járműszekrények között elhelyezett csuklók konzolosan kapcsolódnak egymáshoz. Ez a szerkezeti kialakítás jelentős többlet igénybevételt jelent a pálya számára, így a vizsgálatok során egy új beszerzésű multicsuklós villamos, a CAF Urbos3 típusú jármű futási tulajdonságait vizsgáltam. Jelenleg 35 darab rövid, azaz 5 modulos és 12 darab hosszú, azaz 9 modulos CAF villamos közlekedik Budapesten. Ezek a járművek befüggesztett (hajtás nélküli) és hajtott kocsiszekrényrészekből állnak, ugyanakkor minden kerék hajtott és egymástól függetlenül képesek ívben, kis mértékben sugárirányba befordulni. A vizsgálatok során az elsődleges cél az utazási komfortérzet meghatározása volt, ezért a járművön belüli mérési keresztmetszetek kiválasztásakor az utasok lehetséges szélső helyzete volt a mértékadó. A kritikus keresztmetszet meghatározása során, egy járművön, egy időben, több keresztmetszetben és a hálózaton több helyen végeztünk méréseket. A vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy a jármű eleje vagy a vége a mértékadó keresztmetszet, és a kitérőméréseket már csak ebben a mérési keresztmetszetben végeztem el.

3. Kitérőcsoportok, vágánykapcsolások és csatlakozó pályaívek mozgásgeometriai vizsgálata

3.1 A mérési és vizsgálati helyszínek kiválasztásának szempontjai [4] [10]

Jelen kutatómunkában csak a CAF típusú villamosok által üzemszerűen járt Phoenix típusú kitérőkkel foglalkoztam.

A vizsgált kitérők kiválasztása során (**4. ábra**) igyekeztem minden járatos típust figyelembe venni. A különböző szerkezeti és geometriai kialakítású kitérők összehasonlítása során az elsődleges szempont a szabálytalan járműmozgás (oldalirányú lökések és keresztirányú lengések) mértékének számszerűsítése és a kitérő paramétereivel való kapcsolat keresése volt.



4. ábra: A vizsgálati helyszínek csoportosítása

3.2 Mérések kiértékelése

Az *oldalgyorsulás* kiértékelése során a mért és a (3.1) összefüggéssel számolt értékek eltérését vizsgáltam.

$$a_0 = \frac{v^2}{R} \quad (3.1)$$

ahol: a_0 : kiegyenlített szabad oldalgyorsulás [m/s²]
 v : a mérés során rögzített járműsebesség [m/s]
 R : körívsugár [m] (kitérők esetében R_{k1} és R_{k2} jelölése)

Abban az esetben, ha az eltérés nem haladta meg a 20%-ot úgy megfelelő az oldalgyorsulások eltérése. Ezt zöld színnel emeltem ki az 5/2. ábrán látható kiértékelési táblázatban. Ha minimálisan lépte túl, azt sárgával emeltem ki, míg ha a többszöröse a 20%-os eltérésnek, azt piros kiemeléssel jeleztem. Az *oldalgyorsulás változás* esetében a BKV Zrt. által használt „Sárga könyv” határértékeit vettem alapul, ehhez hasonlítottam a mért értékeimet

(1. táblázat). A 2. táblázatban pedig az alkalmazott adatfeldolgozási módszert, a szűrők és mozgóátlagok paramétereit mutatom be.

1. táblázat: A "Sárga könyv" alkalmazott határértékei

$h=0,40 \text{ m/s}^3$ pályáívekben és folyópályában megengedett legnagyobb érték

$h=0,80 \text{ m/s}^3$ kitérőben megengedett legnagyobb érték

2. táblázat: Az alkalmazott kiértékelési módszer paraméterei

<u>SEBESSÉG adatok „simítása”</u> A GPS sebesség adatok ugrása miatt kialakuló lépcsőzetes jelalak simítása szükséges $T=1,5 \text{ s}$ ablakszélességű mozgóátlag alkalmazásával: $v \text{ [m/s]}$	<u>GIROSKÓP</u> A jármű függőleges tengely körüli szögsebességet jellemző giroszkóp esetében a zajok leszűrése, 2 Hz-es alul áteresztő szűrővel (EN 12299): $gyro_{x,LPF} \text{ [1/s]}$
<u>OLDALGYORSULÁS</u> A rögzített nyers oldalgyorsulás adatok esetében mozgóátlagolást alkalmaztam, melynek időköze: $T=0,5 \text{ s}$ A már szűrt giroszkópból pedig oldalgyorsulást számoltam: $a_{gyro} = v \cdot gyro_{x,LPF} \quad (3.2)$ ahol: a_{gyro}: a szűrt giroszkóp adatokból számított oldalgyorsulás $[\text{m/s}^2]$ v: a mozgóátlagolt sebesség $[\text{m/s}]$ $gyro_{x,LPF}$: az aluláteresztő szűrt x-tengelyű giroszkóp $[\text{rad/s}]$	
<u>OLDALGYORSULÁS - VÁLTOZÁS</u> Numerikus deriválás segítségével számítottam az oldalgyorsulás változást a már előzetesen mozgóátlagolt oldalgyorsulásból, illetve a giroszkópból származó oldalgyorsulásból is a (3.2) összefüggés szerint. $h_{acc} = \frac{da_0}{dt} \quad (3.3)$ ahol: h_{acc}: a (3.3) összefüggés szerint meghatározott, mért oldalgyorsulás idő szerinti deriváltjából származó oldalgyorsulás-változás $[\text{m/s}^3]$ a_0: a készülékkel rögzített, mozgóátlagolt oldalgyorsulás $[\text{m/s}^2]$ $h_{gyro} = \frac{da_{gyro}}{dt} \quad (3.4)$ ahol: h_{gyro}: a (3.4) összefüggés szerint meghatározott oldalgyorsulás-változás, az (3.2) összefüggés szerint a_{gyro}: az (3.2) összefüggés segítségével meghatározott oldalgyorsulás Majd a kapott értékeket (azok zajossága miatt) szintén mozgóátlagoltam, mely esetében a $T=0,5 \text{ s}$ mozgóátlagot alkalmaztam.	

A mozgásérzékelő hossz megállapítása során a **2. táblázat**ban látható kiértékelési módszert alkalmaztam, illetve a **(3.1) összefüggést**.

Az **5/1. ábrán** láthatók a mérés körülményei, a vizsgált helyszín geometriai adatai, az egyes elemekhez tartozó szelvényszámok, illetve a helyszínrajz.

Az **5/2. ábra** esetében pedig a C2 jelű modulban rögzített és számított adatokat mutatom be részletesen, az iterációs folyamat segítségével pedig, az **5/3. ábra második grafikonján** látható feltételezésem kívánom igazolni.

Az **5/3. ábrán** láthatók a vizsgált szakasz egyes geometriai elemei szerinti szakaszokra bontása, a kitérő elhelyezkedése, illetve a **2. táblázat**ban meghatározott módszer szerinti mozgásgeometriai jellemzők grafikonjai. Sorrendben haladva a következő adatokat ábrázolva: *járműsebesség*, *görbületi függvény* (elméleti-fekete, felvett-zöld szaggatott), *oldalgyorsulás* (gyorsulásmérőből-piros, giroszkópból-fekete, számított-kék) és *oldalgyorsulás változás* (gyorsulásmérőből-piros, giroszkópból-fekete).

A szakaszhatárok kijelölésekor a kitérőn és a hozzá csatlakozó pályáiven áthaladáskor rögzített legnagyobb sebességet vettem alapul, majd az egyes geometriai elemek hosszát ismerve számoltam az áthaladásukhoz szükséges időtartamot másodpercben, ennek segítségével pedig előállítottam az időalapú görbületfüggvényét a mérésemnek.

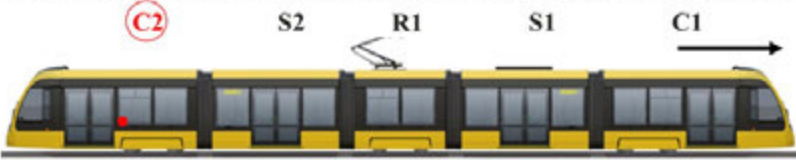


5/1. ábra: 17-es villamos, Margit híd, budai hídfő, VPh50/25 vonali kiágazó kitérő és csatlakozó átmenetiíves pályáiv vizsgálata (CAF Urbos3, 5 modulós, 2219)

Ez után az egyes szakaszokon található, giroszkópból származó oldalgyorsulás maximumát határoztam meg, ezzel vettem össze a számított oldalgyorsulás maximumát (melyet már a **(3.1) összefüggés** felhasználásával számoltam és ábrázoltam).

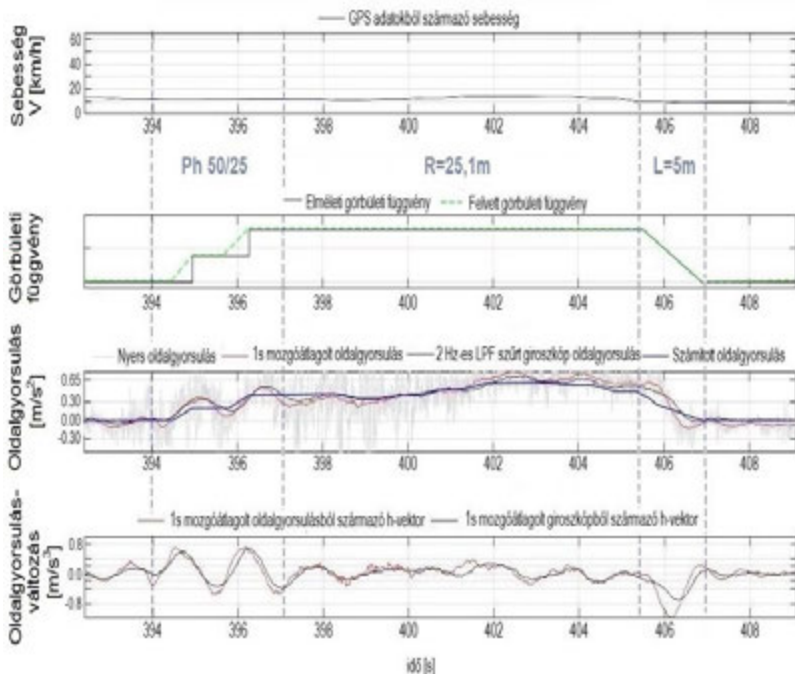
Ezzel az iterációs folyamattal bizonyítottam, hogy az **5. ábrán** látható mérés esetén a jármű mozgásérzékelő hossza a C2 modul esetében 1,8 méternek felel meg, amely a tengelytávolság. Az egyes szakaszokon található eltérések a nem egyenletes sebességből adódtak.

5/2. ábra: 17-es villamos, Margit híd, budai hídfő, VPh50/25 vonali kiágazó kitérő és csatlakozó átmenetiíves pályáiv vizsgálata a CAF (2219) jármű C2 moduljában



Szakasz-határ [s]	Ph50/25				ÍV	ÁÍV
	394,00-394,46	394,46-395,33	395,33-395,79	395,79-397,38	397,38-405,17	405,17-406,46
R [m]	50,0		25,0		25,1	
v _{max} [m/s]	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90	3,90
Oldalgyorsulás adatok [m/s²]						
mért:	0,34	0,37	0,35	0,54	0,72	0,51
számított (3.1):	0,24	0,24	0,40	0,43	0,61	0,40
eltérés:	28,6%	35,2%	15,2%	20,8%	14,8%	21,0%

Az **5/3. ábrán** található oldalgyorsulást ábrázoló grafikonon látható a **(3.1) összefüggés** szerint számított oldalgyorsulás (kék), melyet ezen az ábrán az egyes geometriai elemek határainak szemléltetése céljából jelöltem. Az **5/3. ábra** oldalgyorsulás-változást ábrázoló grafikonján látható, hogy hol helyezkednek el a görbületváltozások helyek, melyek esetében a „Sárga könyv” értékeit vettem alapul és az annak való megfelelést vizsgáltam. Kirajzolódik, hogy az értékek csak néhány esetben lépik át a 20%-os eltérést a számítotthoz képest, ugyanakkor az is megfigyelhető, hogy a gyorsulásmérőből származó és a giroszkópból származó grafikonok jól közelítik egymást a C2 jelű modulban.



5/3. ábra: 17-es villamos, Margit híd, budai hídfő, VPh50/25 vonali kiágazó kitérő és csatlakozó átmenetives pályáiv vizsgálata a CAF (2219) jármű C2 moduljában

4. Összefoglalás

4.1. Mérési eredményeket befolyásoló tényezők:

A pálya-jármű rendszer műszaki állapota és szerkezeti kialakítása

A vizsgálati helyszíneknél fontos szempont volt a jó műszaki állapot, hiszen avult pálya esetén a fellépő járulékos többlet-igénybevételek jelentősen torzíthatják a hasznos gyorsulás jelet.

A jármű ívekben való behaladásakor a kétoldali gumirugók (jármű-felfüggesztés) eltérő aszimmetrikus összenyomódása miatt a kocsiszekevény az ív irányultságának megfelelően bedől. Ez a hatás az aktuális sebesség függvényében jelentősen növelheti a mért oldalgyorsulás adatokat.

Közelítő képlet alkalmazhatósági korlátai [11]

A gyakorlatban alkalmazott közelítő képletek jelentős egyszerűsítéseket tartalmaznak. A járművet tömegpontként, a vasúti pályát pedig térgörbéként

jellemzik. A jármű súlypontpályája eltér a vágánytengely tényleges vonalvezetésétől. Különösen jelentős ez az eltérés kis sugarú ($R < 40$ m), átmeneti ív nélküli pályáívek esetén. A szabad oldalgyorsulás közelítő képletében a változó sebesség figyelembe vehető, de a jármű ívérzékelését jelentősen befolyásoló mozgásérzékelő hosszt nem tartalmazza. A közelítő képlet nem veszi figyelembe a járműdinamikai jellemzőket, sem azt, hogy a jármű melyik pontjában végeztem a mérést.

4.2. Kitérő vizsgálatok tapasztalatai

Az egyenes és ív közvetlen csatlakozásánál fellépő dinamikus oldalgyorsulás-változás összevetése a szabványokban meghatározott kvázi statikus határértékekkel [12]

A közúti vasúti pályatervezési előírásokat tekintve a megkívánt tervezési sebességhez tartozó átmenetiív és minimális ívsugar paraméterek megadása az oldalgyorsulás-változás megengedett értékétől függ. A már nem hatályos EN 13803 - 2:2006 szabvány figyelembe veszi az egyenes és körív közvetlen csatlakozásából („ugrásos” görbületváltozás) adódó tranziens értékeket is. Az általam elvégzett mérések alapján megállapítható, hogy a tranziens hatás elhanyagolása miatt az – egyébként tervezéshez használt – Sárga könyv csak korlátozottan alkalmas a pályáívek mérések alapján történő utólagos megfelelőségi besorolásához.

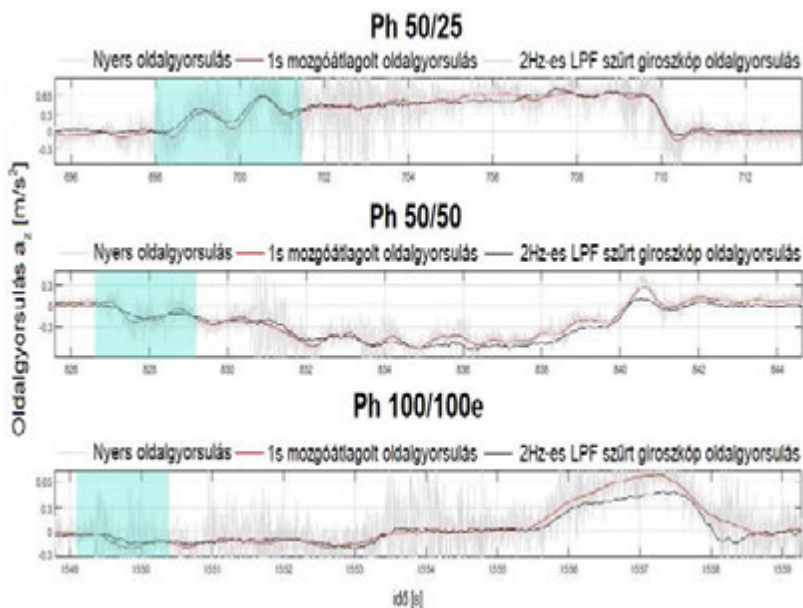
A rögzített gyorsulás jelalak kiugró értékeinek és jellegzetességeinek vizsgálata különböző szerkezeti és geometriai kialakítású kitérők esetén

Az elvégzett és kiértékelt mérések esetében a kiugró értékek és a végérintő szögek összefüggésének tekintetében (6. ábra) megállapítottam, hogy:

- Állandó mérési sebesség mellett a **Ph 50/25** (20-36-37) és a **Ph 50/40** (16-24-25) típusú kitérőkön egyértelműen beazonosítható a kitérőbe való behaladáskor a szabálytalan, kigyózó jellegű járműmozgás,
- A **Ph 50/30e** (14-48-14) típusú kitérőt végállomási kettős vágánykapcsolatban vizsgáltam. Elleníves ágon történő haladás esetén a közbenső egyenesnél jelentős kiugró értékeket tapasztaltam. Vélhetően a rövid közbenső egyenes a nagy végérintőszög és kis sugar együttesen okozza ebben az esetben a szabálytalan járműfutást
- **Ph 50/50** (14-48-14) típusú kitérők esetén már csak minimálisan jelenik meg a kigyózó mozgás a kitérőbe való behaladáskor,
- A **Ph 100/46** (14-48-14), **Ph 100/100** (12-00-00) és a **Ph 100/100e** (8-37-00) esetében már nem figyelhető meg a kigyózó mozgás a kitérőbe való behaladáskor.

A vizsgálataim alapján megállapítható, hogy nagy végérintő szögű és kis sugarú kitérők esetén a kigyózó jellegű szabálytalan járműmozgás minden

esetben megfigyelhető volt, a kisebb végérintőszögű és nagyobb sugarú kitérők esetén ez a kigyózó jellegű járműmozgás csökkent, míg a Ph 100/100e kitérő esetén szinte teljesen megszűnt.



6. ábra: Szabálytalan járműmozgások mértékének összehasonlítása különböző sugarú és végérintő szögű kitérők esetén

Irodalomjegyzék

- [1] ENV12299, „Railway applications - Ride comfort for passengers - Measurement and evaluation,” in *ENV Code 12299*, Brussels, Belgium, European Committee for Standardization, 1997.
- [2] MSZEN12299:2009, MSZ EN 12299:2009, Brussels: European Committee for Standardization, 2009.
- [3] F. Dr. Horváth, „Vasútépítés és pályafenntartás II. kötet,” in *Korszerű vasút- Korszerű vasúttechnika*, Budapest, Magyar Államvasutak Rt., 1999.
- [4] B. K. R. BKV Zrt., Közúti vasúti pályaeépítési és fenntartási műszaki adatok és előadások, Budapest: Fővárosi Közlekedési Felügyelet, 2007.
- [5] K. Academy, „Uniform circular motion and centripetal acceleration review,” [Online]. Available: <https://www.khanacademy.org/science/ap-physics-1/ap-centripetal-force-and-gravitation/introduction-to-uniform-circular-motion-ap/a/circular-motion-basics-ap1>.
- [6] V. Gáspár, Közúti vasúti pályáívek közelítő kinematikai vizsgálata különös tekintettel az egyes járművek eltérő szerkezeti tulajdonságaira és a megengedhető maximális igénybevételekre, Budapest: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem: Út- és Vasútépítési Tanszék, 2017.
- [7] CAF, „BUDAPEST TRAM,” 2018. [Online]. Available: <https://www.caf.net/en/productos-servicios/proyectos/proyecto-detalle.php?p=268>.
- [8] BKK, „FRISSTÍVE! 37 helyett 47 darab új villamos érkezik Budapestre,” 3 március 2014. [Online]. Available: <https://bkk.hu/2014/03/ujvillamosok/>.
- [9] G. Mészáros, „Lejebb a padlóval! I-VI. rész,” 24. július 2011. [Online]. Available: <http://iho.hu/hir/az-alacsonypadlos-villamosok-kialakulasa-es-tortenete-i>.
- [10] G. Tóth, Phoenix sínekkel készült közúti vasúti kitérő tervezése, Budapest: Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Építőmérnöki Kar Út- és Vasútépítési Tanszék, 2014.
- [11] R. Németh, A közúti vasúti pályatervezési előírások mozgásgeometriai vizsgálata Ganz ipari csuklós villamoson rendszerezített inerciális mérőrendszer alkalmazásával, Győr: Széchenyi István Egyetem: Építész-, Építő és Közlekedésmérnöki Kar, 2018.
- [12] EN13803-2:2006, Switches and crossings and comparable alignment design situations with abrupt changes of curvature, %1. kötetPart 2, London: British Standards Institution, 2006.

Analysis of river bed material composition with Deep Learning based on drone video footages

(Folyami mederanyag szemösszetételének vizsgálata Deep Learning eljárással drónfelvételek alapján)

Benkő Gergely BSc IV. évf.

Konzulensek:

Dr. Baranya Sándor egyetemi docens

Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Dr. Török Gergely tudományos segédmunkatárs

Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék Dr.

Bence Molnár egyetemi docens

Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék

Kulcsszavak Deep Learning; riverbed material; machine learning; riverbed morphology

1. Introduction

1.1 The role of river bed material in river management

The grain size of riverbed sediment is an immensely important attribute of rivers because it is an independent variable of river classification, hydraulic roughness calculation, sediment transport determination and also helps to specify species in the given environment. Therefore, the analysis of the bed material composition of rivers is of primary importance for any sort of hydromorphological assessment. Conventional bed material analysis methods, i.e physical samplings, however, provide only local information about the composition. Innovative indirect techniques, such as using sonars or image based methods could provide a real grain size distribution (GSD), however, these techniques can show high time and cost demand. Here, a

completely new technique in this field will be introduced and tested for the assessment of river bed composition, which is based on artificial intelligence.

1.2 Relevant literature

In geomorphological, earth, ecological and water sciences it has been a longtime research topic how to assess the riverbed and riverbank sediment grain size with adequate accuracy and with a low-cost method.

Langhammer et al. (2017) published a paper where they used a non-invasive technique of granulometric analysis based on the fusion of two imaging techniques, Unmanned Aerial Vehicles (UAV)-based photogrammetry and optical digital granulometry. The granulometric analysis showed an accuracy level comparable to traditional optical granulometry.

There was a study conducted by Hamill et al. (2018), which investigated relationships between substrates and statistical descriptors of bed textures in side scan sonar echograms of alluvial deposits. Their model was quite accurate because the Reach-averaged proportions of these sediment types were within 3%, compared to similar maps derived from multibeam sonar.

Pearson et al. (2017) used Structure-from-Motion (SfM) method for the rapid analysis of the spatial distribution of grain size over entire river reaches. They argue that it provides improved data to drive three-dimensional hydraulic models that would allow rapid geomorphic monitoring of sub-reach river restoration projects and enable more robust characterisation of riverbed habitats. Their model showed significant improvements in mean grain size prediction, however refinement is needed for poorly sorted gravel patches.

SfM methods are popular in this research domain. A recent study published by Detert et al. (2018) also used a similar method. The aim of the paper was to develop airborne photogrammetric methodology that derives grain size characteristics of gravel bed rivers, where data was acquired by an actioncam and a hand-held digital camera. The accuracy of the digital elevation models computed via photos taken by their flexcamera is almost in the same range as the laser data. They also conducted field measurements to test their methodology, and results indicate that their method offers a high potential for generating data from which characteristic grain size parameters can be estimated.

The early methods relied on image segmentation based on a fixed set of images taken from a predetermined height (Graham et al. 2005). After that,

in several scientific fields, segmentation was mainly carried out by calculating a proper Otsu threshold which is able to segment two classes in bimodal distribution. Here, the algorithm first creates a grayscale image from the input, and after that it runs the Otsu algorithm (Otsu, 1979) to separate the classes. The main problem with this method is that it is only capable of segmenting two classes at once, and the only difference between them is the grayscale pixel value they hold.

A major problem with the past methods is that they all strive to determine the grain sizes and their size distribution in an overly precise fashion with a minimised sample size. An inherent property of fluvial river bed compositions is that their variance is high in the time setting. Another problem is that the training is not automated, so it requires one or more highly trained researchers, both in computer vision and geomorphology to determine the most adequate parameters.

1.3 Artificial Intelligence, Deep Learning and their potential

In the past two decades, some groundbreaking changes happened in computer science and in the IT industry. First, the microprocessor sizes and their computational power persistently followed Moore's law (Schaller, 1997), which says that the number of transistors in a dense integrated circuit doubles in about every two years. Another hardware development which occurred in the past 10-15 years is a huge improvement in the performance of GPUs. Beside aforementioned hardware improvements, the internet and startup companies like Google, Facebook and Amazon have conquered the world. With the rise of these companies a new kind of resource appeared: data. The large amount of data, the so called Big Data, is fueling today's AI and Deep Learning revolution. The single most important thing in machine learning and AI is data, which means if there is a sufficient amount of data for training a model, the accuracy of different machine learning algorithms will almost be the same (Banko and Brill, 2001).

The most economically viable application of deep learning and deep neural networks is digital marketing. A few years ago, when online marketing was in its infancy, all user got the same messages and saw the same advertisements. Nowadays, we would easily notice that advertisers know almost exactly what we want or what have been looking for in the past days. Nonetheless, a more scientific application of deep neural networks is a skin cancer detection tool. It was developed by researchers at Stanford University (Esteva et al., 2017)

and it can classify 757 different diseases into two categories: malignant or benign. The developers have used 130 000 images of the skin, and with this large dataset the model was able to make predictions with a 3% margin better than a highly trained dermatologist.

1.4 The aim of this paper

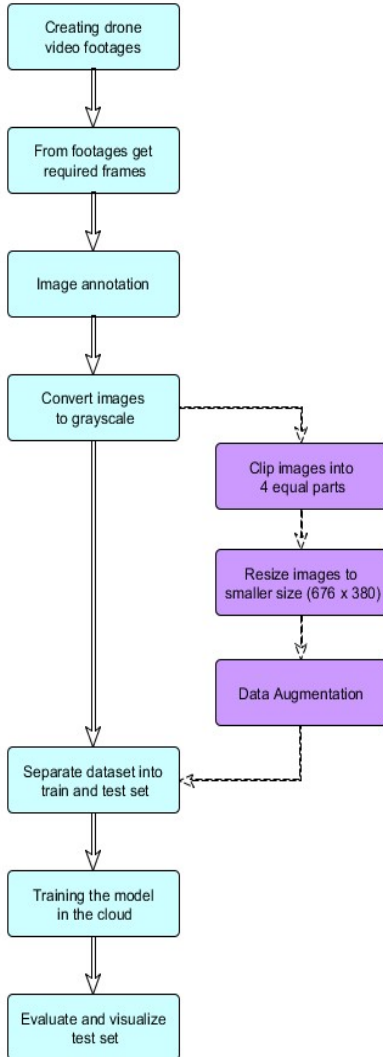
The aim of this paper is to investigate if deep learning is applicable in fluvial river bed composition segmentation or not. If it proves to be applicable, then data driven methods can make it possible to build and train a model that is capable of recognizing and segmenting a large variety of grain sizes and other object classes along riverbanks or coasts. With a properly formed model, additional GIS algorithms and an underlying database system, it should be possible to build large scale material composition maps. An application like this could create these maps within a few hours or even minutes, covering large areas while providing information about the grain size distribution. Obviously, the image type of input data is crucial for this analysis. This could be provided from UAVs for the dry part of the channels, or underwater videos in the river itself. The AI based innovative bed material mapping tested in the present study could, therefore, be an entirely new technique in the field of geomorphology and hydraulic engineering for such purposes, and could greatly contribute to practical river management issues. On the other hand, if this new methodology is not applicable in this field, then we could be certain that a good segmentation model must be somewhere else.

2. Methodology

2.1 The structure of the system

The main steps for the image analysis method are presented in Figure 1. The first step of this research was to create drone footages along the dry sections of the river Danube, to provide input data for the follow-up analysis (see point 3.1 for the description of the study site). The recorded videos were 10 to 14 minutes long and had a 30 FPS, which means that the mean number of images in a footage were around 21500. The resolution of frames was 2704 x 1520. The variance in images, which were taken shortly after each other, is very low so the unrequired frames had to be removed from the dataset with a script. As a result, the number of images was decreased to approximately 390 frames. All 390 images had to be annotated, which means that each of the predefined 8 classes had to be marked with a (preferably easily)

distinguishable colour. This step requires a lot of time, which depends on the variance in the image texture and the number of classes the image holds. The next step is to convert all colour masks, which are the annotated images, to grayscale because this way the computational time will decrease to the third.



There are three optional steps that are not necessary if there is sufficient amount of data and training is conducted at a very powerful cluster, but in our case the amount of data was sparse, and also, computational power was small. The first of the supplementary steps is to crop all images into 4 smaller images of equal size. The second step is to resize the cropped images into dimension 676 x 380, which is the 1/16 size of the original framesize and 1/4 of the clipped image. This transformation is required because the model has to see more variance in training images (shapes, colours, contours etc.) and the easiest way to provide this kind of diversity is resizing. The last one is data augmentation, which is data manipulation that helps to increase the size of the dataset without making the model biased. Here, it means that images should be flipped vertically and horizontally without additional annotation time.

Figure 1. Flowchart of our system with all the important steps. With turquoise color we denote the mandatory steps and with purple the supplementary ones.

Supplementary steps are only necessary if the amount of training data is sparse

The next step, which is the specification of training and test sets, is mandatory. In this case 19.1% of all images will serve as a test set, and 80.9% as a training set. Data has to be shuffled before splitting otherwise it could generate bias in the model during training and validation.

2.2 Deep Learning and Convolutional Neural Networks

The properties that make deep learning and mainly convolutional neural networks (CNNs) so powerful for image recognition are: pooling, shared weights, connections, and the use of several layers (Le Cun et al., 2015) (Figure 2.). These networks process data in form of arrays, where colour images are in 2D form, with 1 or 3 pixel intensity layers. Other forms of data are 1D sequences like natural signals and language, and 3D signals like videos.

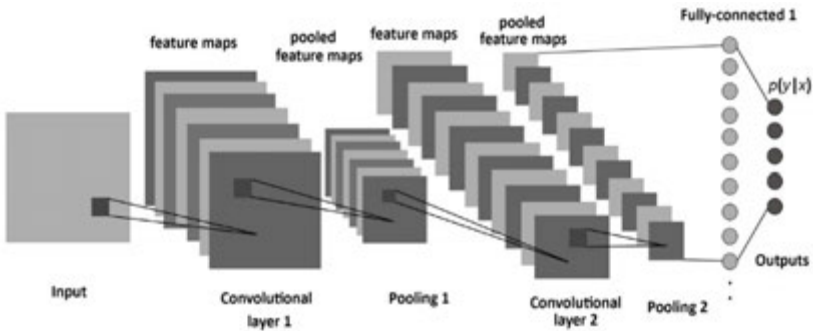


Figure 2. A structure of a usual Convolutional Neural Network (CNN), consisting of convolutional, pooling and fully-connected layers. (figure from Albelwi et al 2017)

These networks usually consist of a series of different modules which perform certain transformations on the input data. The structure of natural signals are the main reason why these networks are working, as there is a strong structural hierarchy in natural signals and with convolving and pooling we can find these hierarchical connections.

2.3 The applied network

In this research we used a model called Deeplabv3+, which is a convolutional neural network architecture designed for semantic segmentation purposes.

The aim of semantic segmentation is to assign semantic labels to every pixel in an image, and in recent years CNNs made a striking improvement in this field. A detailed introduction of Deeplabv3+ architecture will not be given here, but it is important to note that the major improvements are implemented in this model. (Chen et al., 2018).

2.4 Mathematical background

The two main mathematical concepts that are important in CNNs are convolution and backpropagation. Convolution is an operation on two functions of a real-valued argument. When this operation is executed on a 2D image where I is our input image, we also want a 2D kernel for it, this will be K :

$$S(i, j) = (K * I)(i, j) = \sum_m \sum_n I(i - m, j - n) K(m, n)$$

Backpropagation is an algorithm that computes the chain rule of derivatives, with a specific order of operations which is highly effective. In vector notation, this could be written as

$$\frac{\partial z}{\partial x_i} = \sum_j \frac{\partial z}{\partial y_j} \frac{\partial y_j}{\partial x_i}$$

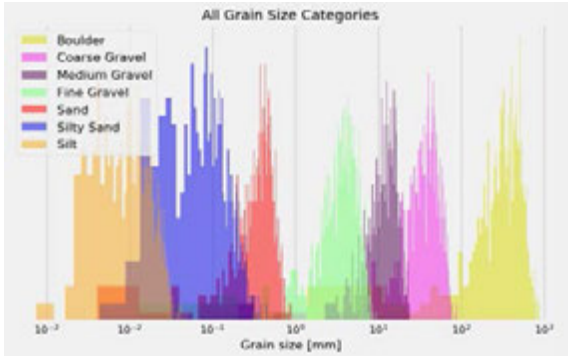
3. Initial data

3.1 Study site

The study site is located in the north-western part of Hungary, close to a settlement called Gönyű. Here, the river Danube shows complex bed morphology with extended shallow zones, and for that reason it is suitable for UAV measurement campaigns. At the measured flow regime we were also able to capture parts of the river bed that are under water most of the time. Aiming for a higher variability in grains, considering shape and composition, we surveyed three different areas during the measurement campaign. Two of them were near to Vének, while the third field was a groyne located across the Danube at Gönyű.

3.2 Grain size assessment

There are 8 distinct categories in our research. 7 of these correspond to grain size categories, and 1 covers all the other features that we do not want to



recognize as a distinct category, for example water surface, humans, plants, etc..

Figure 3. The seven different categories plotted on a single logarithmic graph to show how classes

relate to each other. As it shows, they have overlapping tails with the neighbouring categories, which is important for two reasons: first, potentially the algorithm must be able to pick any values in the examined range and secondly, this is a rough method to overcome annotational and segmentational inaccuracy.

As annotation is a process where the annotator looks at an image and decides which category pixels belong to, it is not feasible to expect high accuracy and therefore categorization is allowed to be rough. This rough estimation also speeds up the working process and makes it less tiresome.

4. Results

4.1 Input data and training



As input for training, we add a pair of images to the network. One of them shows the actual surface, the other is the annotated image.

Figure 4. A single image from the test, similar images were used during the training process.



Figure 5. It shows the annotated pair of Figure 4., a so called ground truth image



Figure 9. It shows the predicted color map of test image Figure 4.

The annotation is the most subjective part of the process. The model will only learn from our data input, so it is a great responsibility for the annotator to do an accurate work. In this study the grain textures for neighbouring classes look almost the same, therefore expertise and domain knowledge are both necessary.

The training took place in the cloud and lasted 7.43 hours, which is not a long period, but it has to be considered that if any parameter was changed, then the whole 7.5 hour training had to be performed from the beginning so the overall process required around a 100 hours of computation.

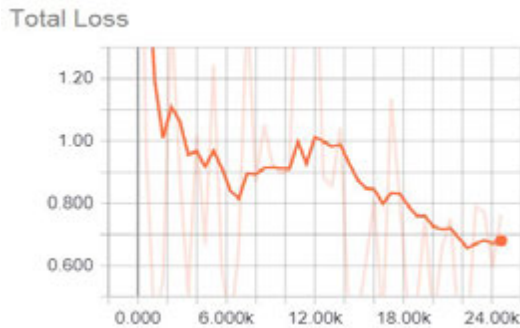


Figure 6. This figure shows how the loss changed during the learning. Pale orange: the actual loss. Orange: The moving average of the loss. It gives a better understanding of the learning process. Over time the loss

decreases and the model becomes more accurate. As the dataset was small, it was not recommended to proceed with the learning due to overfitting.

4.2 Evaluation

Evaluation can be performed by many different methodologies. The most preferred and strictest of these is intersection-over-union (mainly used as IoU), also known as Jaccard index which counts the ratio of correctly classified pixels to the uncorrectly classified ones.

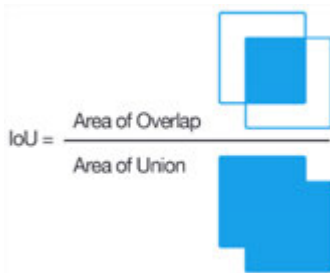


Figure 7. The visualization of intersection-over-union (IoU) computation.

[www.pyimageresearch.com]

For imagesets we usually compute the mean IoU which applies to the whole set. The mIoU for this dataset was 62.3% which is an acceptable result, considering

that it is mainly used for object detection and segmentation, while our aim was texture segmentation.

Another possible method for evaluation is the pixelwise comparison of images. This is better suited for our purposes because at the end of the segmentation process we strive to draw a grain size distribution curve (Figure 27-28.), which would be computed from the ratios of pixels of each category for images. The ratio which indicates the amount of pixels that have equal values in a location is more important for us than the IoU. This pixelwise comparison gives us 81.5% accuracy on this test set, which is rather good compared to the size of the training set.

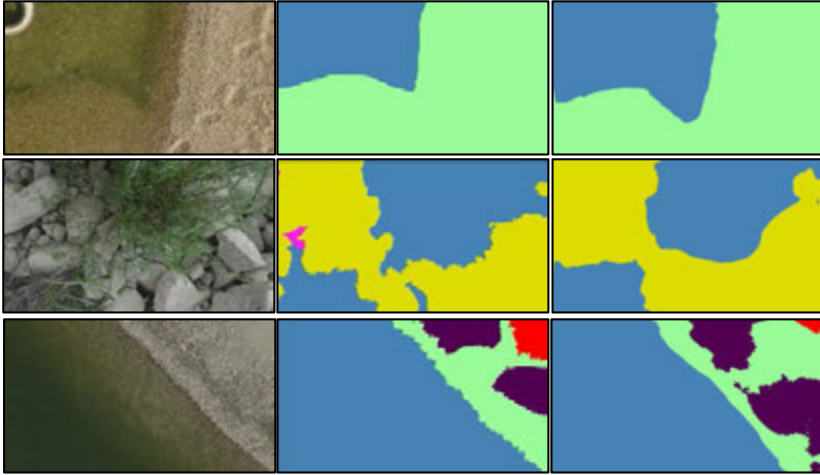
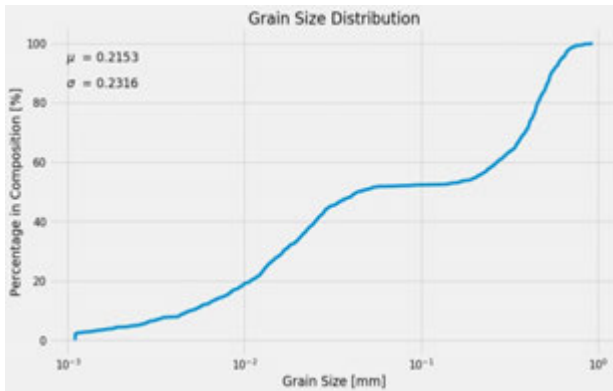


Figure 8. Examples of how accurate the model is to predict size categories. Left: The original image which was added as input. Center: The ground truth colour map. Right: The models output.

4.3 Outcomes of data processing

The main outcomes of the image analysis procedure are the series of grain size classes for each input image. In fact, the colours in each analyzed image will represent one or more grain categories.



Based on this, a grain size distribution (GSD) curve could be constructed for each image. Eventually, a series of GSD curves could be provided along the flying route of the UAV.

Figure 10. Plot of Figure 4. grain size distribution considering only the relevant classes.

5. Discussion

5.1 Most important findings

The most important achievement of this study is that, to our knowledge, this was the first attempt to test if deep learning is adaptable to fluvial grain size segmentation or not. As introduced, the applied model was able to segment the images with high enough accuracy, despite the relatively small size of the dataset. Another important achievement is that the endproduct is not a simple segmented image, but a grain size distribution curve which contains a lot of information for professionals. With the combination of architecture Deeplabv3+ and helper programs which were written for this research, we delivered a convenient solution for a fast river bed material composition analysis.

5.2 Further developments

Apart from the model's inner architecture and feature engineering in the image preparatory process, it is crucial to find the optimal flying speed for UAVs. During the analysis and processing of drone videos, around 30% of the frames proved to be unusable due to their noisy quality. In order to avoid this serious data loss, an optimal flying speed for good image quality and for fast workflow is required.

On the architectural side, there is a rapid improvement in the field of deep learning. Dozens of new studies are published every day with potential groundbreaking results. Because of this, many parts and layers will be changed over time in the architecture. With a larger dataset, we will be able to deepen the model without suffering from overfitting. This gives extra hidden layers to the system, which enables the creation of more complex internal representations and this way further information can be extracted from the images.

6. Bibliography

- Albelwi, S., Mahmood, A.: A Framework for Designing the Architectures of Deep Convolutional Neural Networks, *Entropy*, Vol. 19 (6), pp. 242, 2017
- Banko, M., Brill, E.: Scaling to very very large corpora for natural language disambiguation, *ACL '01 Proceedings of the 39th Annual Meeting on Association for Computational Linguistics*, pp. 26-33., 2001

Chen, L., Zhu, Y., Papandreou, G., Schroff, F., Hartwig, A.: Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation, *ArXiv*, 1802.02611, 2018

Detert, M., Kadinski, L., Weitbrecht, W.: On the way to airborne gravelometry based on 3D spatial data derived from images, *International Journal of Sediment Research*, Vol. 33. (1), pp. 84-92., 2018

Esteva, A., Kuprel, B., Novoa, R. A., Ko, J., Swetter, S. M., Blau, H. M., Thrun, T.: Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks, *Nature*, Vol. 542., pp. 115-118., 2017

Graham, D. J., Rice, S. P., Reid, I.: A transferable method for the automated grain sizing of river gravels, *Water Resources Research*, Vol. 41. (7), 2005

Hamill, D., Buscombe, D., Wheaton, J. M.: Alluvial substrate mapping by automated texture segmentation of recreational-grade side scan sonar imagery, *PLoS ONE* 13 (3): e0194373, 2018

Langhammer, J., Lendzioch, T., Miřijovský, J., Hartvich, F.: UAV-Based Optical Granulometry as Tool for Detecting Changes in Structure of Flood Depositions, *Remote Sens.* Vol. 9, pp. 240, 2017

LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G.: Deep learning, *Nature*, Vol. 521., pp. 436444, 2015

Otsu, N.: A threshold selection method from gray-level histograms, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 9, (1), pp. 62–66., 1979

Pearson, E., Smith, M. W., Klaar, M. J., Brown, L. E.: Can high resolution 3D topographic surveys provide reliable grain size estimates in gravel bed rivers?, *Geomorphology*, Vol. 293., pp. 143-155., 2017

Schaller, R. R.: Moore's law: past, present, and future, *IEEE Spectrum*, Vol. 34. (6), pp. 52-59., 1997

Hidrométeres talajvizsgálat során a diszpergálószer különböző koncentrációban tett hatása a szemeloszlási görbe alakjára

(The effect of the dispersing agent in various concentration on the gradation curve in a hydrometer test)

Lajkó Rebeka MSc II. évf.

Konzulensek:

Dr. Nagy László egyetemi docens

Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék

Dr. Nagy Gábor tudományos segédmunkatárs

Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék

Kulcsszavak: hidrometrálás; diszpergálószer; szemeloszlási görbe

1. Bevezetés

Hidrometrálással a talajok finomszemcse-összetételét határozzuk meg. Az eljárás során a talaj vizes szuszpenziójának a talajszemcsék ülepedéséből adódó időbeli sűrűségváltozását mérjük.

Az ülepítés során ügyelni kell arra, hogy a szemcsék koagulációja ne következzen be, ezért a talaj szuszpenzióhoz diszpergálószerrel adunk, mellyel a desztillált víz sűrűsége megváltozik. Minél magasabb az oldat koncentrációja, annál jobban eltér a sűrűsége a desztillált víztől. Dolgozatomban ezt a sűrűségváltozást mértem a hőmérséklet függvényében, a koncentráció változtatásának hatására.

A kutatás során öt különböző talajt vizsgáltam. Egy-egy vizsgálat alkalmával 5 talajmintát ülepítettem 1000 ml-es menzúrákban, melyekhez különböző koncentrációban adtam diszpergálószerrel. Az öt talaj szuszpenzióhoz öt másik menzúrában talajmentes diszpergáló oldatot kevertem ki olyan koncentrációban, amelyekbe a talajminták is kerültek. Így a vizsgálatok során méréseket tudtam végezni a talajmentes oldatokban is, ezáltal megismerve az

egyes koncentrációk viselkedését a hőmérséklet függvényében.

2. Az elvégzett vizsgálatok ismertetése

Az öt talajminta két homokos agyag és egy-egy iszapos sovány agyag, iszapos homok, valamint lösz volt. Az alkalmazott diszpergáló szer nátrium-hexametafoszfát, más néven Calgon (MSZ EN ISO TS 1:7892-4:2006), nátrium-karbonát (Emeka A. E.), illetve a kettő keveréke (BS 1377: Part 2:1990) volt.

Egy-egy hidrometrálás során öt különböző koncentrációjú diszpergálószeres oldatban mértem a talajszemcsék ülepedését. Az egyes koncentrációk a szabványok által előírt mennyiséghez viszonyítva az alábbiak voltak:

1. táblázat A diszpergálószer mennyisége a talaj szuszpenzióban a szabvány szerinti értékhez viszonyítva

Mérés	Töménység	Mennyiség
1. (szabvány szerinti)	1	1
2.	1	2
3.	0,5	1
4.	0,5	2
5. (csak desztillált víz)	0	0

Példaként nátrium-hexametafoszfát alkalmazásakor a talaj szuszpenzióban az oldat mennyiségét az alábbiak szerint mértem ki:

1. 1 dl a 40 g/l-es oldatból (EC7 szabvány szerinti koncentráció, 4%-os),
2. 2 dl a 40 g/l-es oldatból (8%-os),
3. 1 dl a 20 g/l-es oldatból (2%-os),
4. 2 dl a 20 g/l-es oldatból (4%-os),
5. csak desztillált víz (0%-os).

Az egyes talajmintákat az alábbi rendszer alapján neveztem el:

$$siCl - Cal - 40 \text{ g/l} - 1 \text{ dl}$$

talaj betűkódja – diszpergálószer –oldat töménysége – szuszpenzióhoz adott mennyiség

Az (1) és (2) képleteket alkalmazva az 1. ábrán látható eredményeket kaptam.

$$d_i[mm] = 0,005531 \cdot \sqrt{\frac{\eta \cdot H_r}{(\rho_s - \rho_v) \cdot t}}, \quad (1)$$

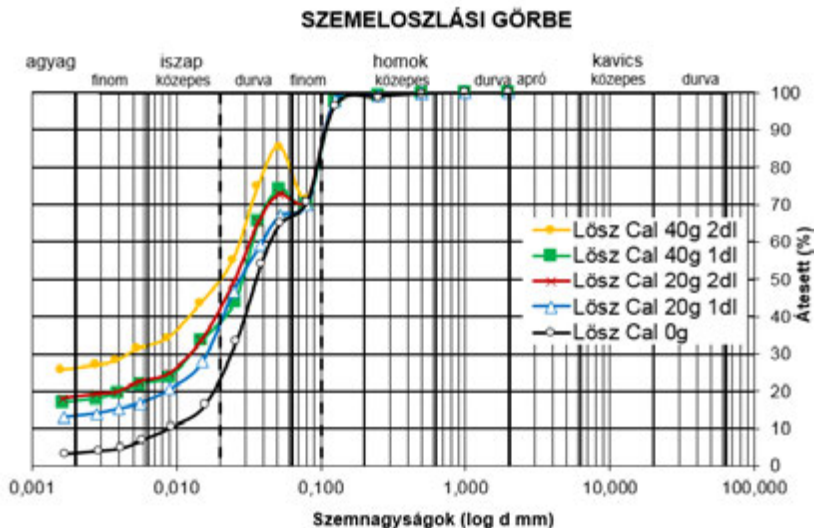
ahol

$d_i[mm]$	a szemcseméret átmérője,
$\eta[mPa \cdot s]$	a víz dinamikus viszkozitása,
$H_r[mm]$	a vízfelszín és a hidrométer súlypontjának távolsága,
$\rho_s[\frac{Mg}{m^3}]$	a szemcse sűrűsége,
$\rho_v[\frac{Mg}{m^3}]$	a víz sűrűsége,
$t[min]$	eltelt idő

$$S[\%] = \frac{V}{m_d} \cdot \frac{\rho_s}{\rho_s - \rho_v} \cdot (R'_h - C_m - C_t - \rho_v), \quad (2)$$

ahol

$S[\%]$	átesett százalék,
$V[cm^3]$	szuszpenzió térfogata (1000 cm ³),
$m_d[mg]$	a minta száraz tömege,
$R'_h[\frac{mg}{cm^3}]$	a hidrométeren tett leolvasás (a szuszpenzió sűrűsége),
$C_m[\frac{mg}{cm^3}]$	meniszkusz korrekció,
$C_t[\frac{mg}{cm^3}]$	hőmérsékleti korrekció.



1. ábra: Nátrium-hexametafoszfáttal diszpergált lösz szemeloszlási görbéi a (1), (2) képletek alapján ábrázolva

Ez a görbesereg azt mutatja meg, hogy minél több diszpergálószer-t adunk a mintához, annál nagyobb az eltérés a diszpergálószer-mentes méréshez képest. Észrevehető továbbá, hogy az egyes mintákhoz tartozó görbék hidrometrált szakasza közel párhuzamosan tolódott el a 0 g/l-es diszpergálószer-mentes mintához képest. Ez azzal magyarázható, hogy a diszpergálószeres oldatoknak nagyobb a sűrűsége a desztillált víznél, és mivel az oldatban a talajszemcsékkel ellentétben az oldott anyag nem ülepszik, a diszpergáló szer állandó hőmérsékleten egy konstans értékkel megemeli a hidrométert. Ez azt eredményezi, hogy a görbe leszálló ága magasabb értékeket vesz fel, így az agyag-iszap tartalom számításakor nem a valós értékeket kapjuk vissza.

A diszpergálószeres oldatok sűrűség-többlete a desztillált vízhez képest a fent használt képleteket alkalmazva magasabb átesett százalékot ($S[\%]$) eredményez, mivel csak a desztillált víz sűrűsége kerül levonásra a talaj szuszpenzió leolvasott sűrűségértékéből. Ez olyan, mintha a minta tömegének mérését és a szítást követően annyi finomszemcsét adnánk a mintához, ami ugyanolyan sűrűség-többletet okoz a szuszpenzióban, mint amit a diszpergálószer okoz. Ebből adódnak a szokatlan grafikonok.

Ahhoz hogy megkapjuk a valós szemeloszláshoz tartozó szemeloszlási görbét, a 2. ábra diszpergált talajmintáinak görbéit korrigálni szükséges. Valós szemeloszlásnak minden esetben az Eurocode 7 szerinti képletekkel kapott eredményt vettem.

A diszpergálószer miatti korrekciót az MSZE CEN ISO/TS 17892-4 szabvány tartalmazza, mely alapján a talaj szuszpenzióban tett leolvasásból le kell vonni a referencia folyadékban tett leolvasás értékét.

$$R_d = R'_h - R'_0, \quad (5)$$

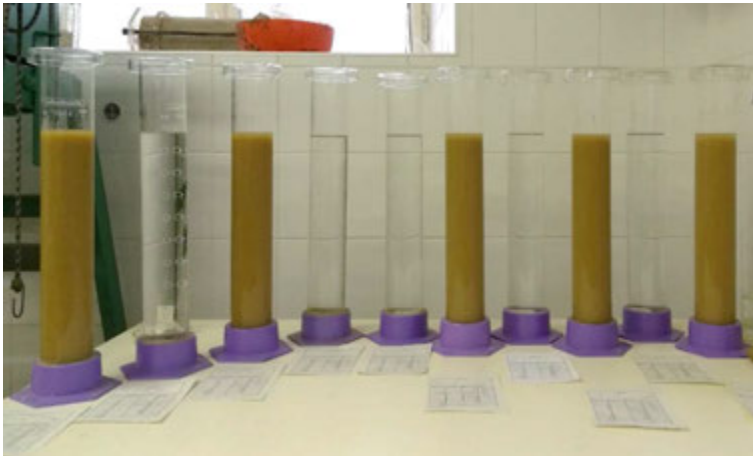
ahol

$$R_d \left[\frac{\text{mg}}{\text{cm}^3} \right] \quad \text{módosított hidrométer leolvasás,}$$

$$R'_h \left[\frac{\text{mg}}{\text{cm}^3} \right] \quad \text{a ténylegesen tett hidrométer leolvasás,}$$

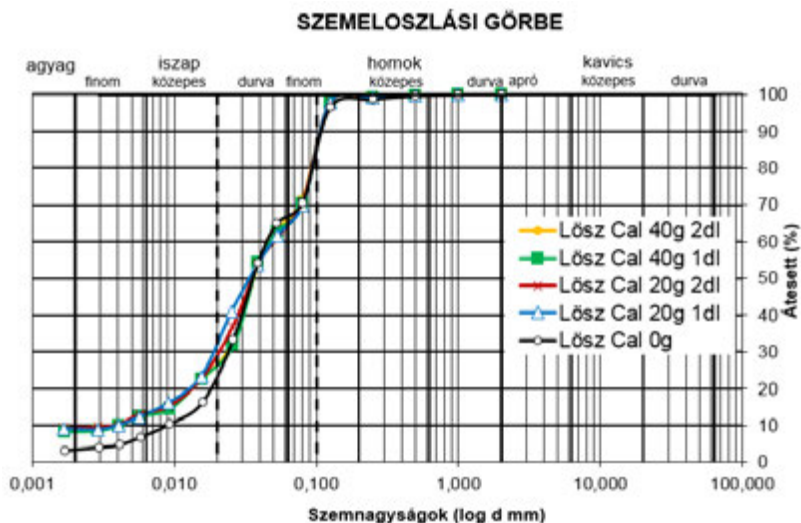
$$R'_0 \left[\frac{\text{mg}}{\text{cm}^3} \right] \quad \text{a referenciafolyadékban tett hidrométer leolvasás.}$$

A valós eredmények megállapításának érdekében a hidrométert kalibrálni kell, vagyis szükséges leolvasni, milyen mértékben emelkedik meg az oldat és a hőmérséklet hatására. Ennek érdekében bevontam a kísérletbe az öt különböző koncentrációjú oldatot talaj nélkül is.



2. ábra: Elindított vizsgálat installációja

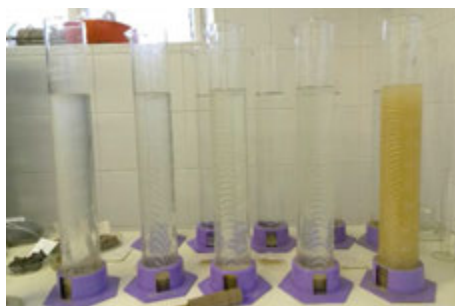
Mivel a kísérletek során nem volt biztosított az állandó hőmérséklet, ezért minden kitüntetett időpontban a talaj nélküli oldatokban is leolvasást végeztem a hidrométeren és a hőmérőn egyaránt. A korrekciót követően a 3. ábrán látható eredményt kaptam:



3. ábra: Nátrium-hexametafoszfáttal diszpergált lösz korrigált szemeloszlási görbéi

Általánosan megfigyelhetőek voltak a lösz eredményei által megjelenített tendenciák a nátrium-hexametafoszfáttal (Calgonnal) vizsgált többi talajminta esetében is. Ilyen a korrekció előtti oldott anyag mennyiségével arányos, párhuzamos eltolódás a hidrometrált szakaszon a diszpergálószermentes mintához képest vagy a korrekciót követően a görbék összesimulása.

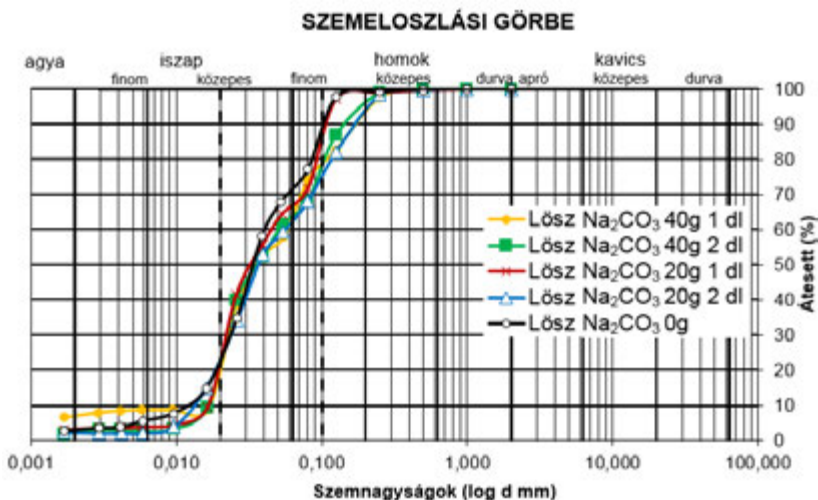
Na_2CO_3 esetében azonban az eredmények azt mutatják, hogy a Na_2CO_3 kevésbé alkalmas hidrometrálásra önmagában, mint a Calgon, mivel a vizsgálat első 2 órája alatt a talajszemcsék ~60-80%-a leülepedett a menzúra aljára, majd a 4. órára szinte teljesen víztiszta volt a leülepedett talaj feletti oldat, mely a 4. ábrán látható. Ez azt jelenti, hogy az oldatban a talajszemcsék összetapadtak, így megnőtt az



4. ábra: A 4. órában már teljesen leülepedtek a szemcsék a menzúrák aljára

ülepedési sebességük. A koaguláció miatt így nem tudjuk a valós szemcseösszetételt meghatározni.

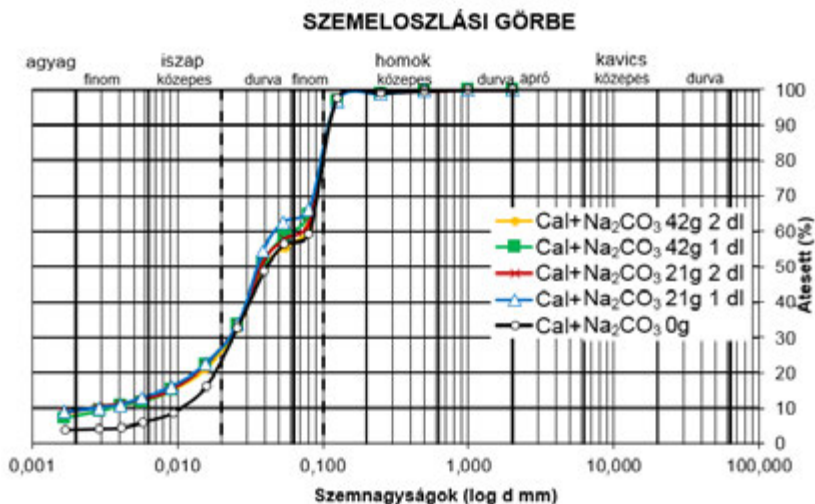
A szemeloszlási görbék a korrekciót megelőzően a korábbiakhoz hasonló mértékben tolódtak el a diszpergálószer-mentes mintához képest, mint a Calgon esetében, azonban a talajszemcsék leülepedését követően az értékek nem változtak. Így a görbék a közepes iszap frakciótól az agyagfrakcióig közel vízszintesek, mely jól látható a korrigált görbéket ábrázoló diagramon is (5. ábra). Ez azt jelenti, hogy a szemcsék 0,012 mm vagy annál nagyobb méretűre tapadtak össze. Az összetapadás a korrigált görbéknél abból is megfigyelhető, hogy ezek a görbék a diszpergálószer-mentes minta fekete színnel jelölt görbéje alá kerültek. Ez azt jelentené, hogy kevesebb agyagot tartalmaznak, amiről tudjuk, hogy nem lehetséges, mert ugyanarról a talajról van szó. Mindezek tekintetében kijelenthetjük, hogy ezen paraméterek mellett a Na_2CO_3 önmagában nem jól alkalmazható hidrometráláshoz.



5. ábra: Na_2CO_3 -mal diszpergált lösz korrigált szemeloszlási görbéi

A British Standard (BS) által előírt diszpergálószer 35 g $(\text{NaPO}_3)_6$ + 7 g Na_2CO_3 1 l desztillált vízben oldva, melyből 125 ml-t kell önteni a talajmintához, majd a menzúra 1000 ml-es beosztásáig felönteni.

A hidrometrálást és a korrekciót elvégezve a 6. ábrán látható görbesereget kaptam.



6. ábra: $(\text{NaPO}_3)_6 + \text{Na}_2\text{CO}_3$ -mal vizsgált lösz talaj korrigált szemeloszlási görbéi

A korrigált görbék mindkét esetben, a csak Calgonnal, illetve Calgonnal és Na_2CO_3 -tal együttesen diszpergált minták esetében szinte teljesen azonos eredményt mutatnak. Kis különbséget fedezhetünk fel azonban az iszapfrakció tekintetében. A csak Calgonnal vizsgált mintáknál kevesebb durva iszap-finomhomok szemcsét tartalmaz az eredmény, míg a British Standard diszpergálószerénél a közepes-durva iszapszemcse frakcióhatáron mutat alacsonyabb értéket a minta. Ez jelentheti azt, hogy két teljesen egyforma minta nincsen, de azt is, hogy az egyes diszpergálószeres hatása ezeknél a szemcsefrakcióknál fejti ki elsősorban a hatását.

3. Mérési eredmények bemutatása

A 2-3. táblázatban összefoglaltam az összes általam elvégzett vizsgálat során mért sűrűség-többséget Calgon és Calgon+ Na_2CO_3 esetében a desztillált vízhez képest az egyes talajokhoz, koncentrációkhoz és hőmérsékletekhez.

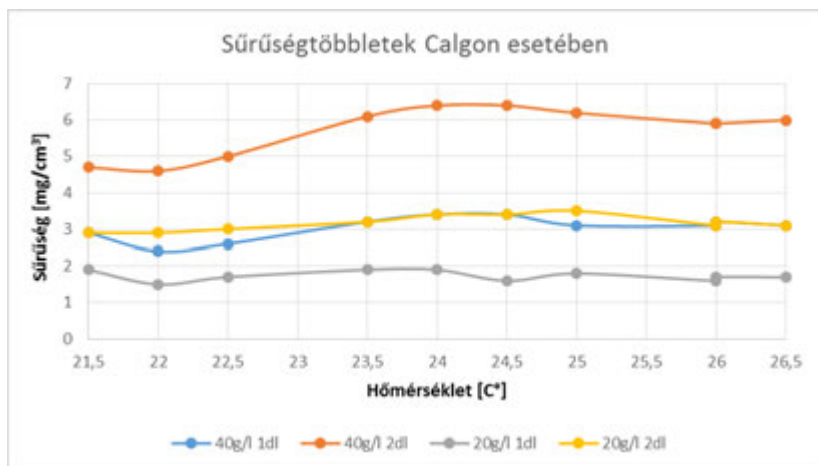
2. táblázat: Calgon+Na₂CO₃ oldatok sűrűségkülönbsége a desztillált vízhez képest

Talajok	Hőmérséklet [C°]	Sűrűségkülönbség			
		Na ₂ CO ₃ + Calgon 42g/l 1dl	Na ₂ CO ₃ + Calgon 42g/l 2dl	Na ₂ CO ₃ + Calgon 21g/l 1dl	Na ₂ CO ₃ + Calgon 21g/l 2dl
lősz	24,5	4,4	8,5	2,3	4,4
	25	4,1	8	2,1	4,1
	Átlag	4,3	8,3	2,2	4,3

3. táblázat: Calgonos oldatok sűrűségkülönbsége a desztillált vízhez képest

Talajok	Hőmérséklet [C°]	Sűrűségkülönbség [mg/cm ³]			
		Calgon 40g/l 1dl	Calgon 40g/l 2dl	Calgon 20g/l 1dl	Calgon 20g/l 2dl
saSi	26	3,1	6,2	1,8	3,5
	26,5	3,2	5,9	1,7	3,2
siCl	21,5	-	-	-	2,9
	22	2,9	4,7	1,9	2,9
	22,5	2,4	4,6	1,5	-
saCl	23,5	2,6	5,0	1,7	3,0
	26	3,1	5,9	1,6	3,1
	26,5	3,1	6,0	1,7	3,1
lősz	24	3,2	6,1	1,9	3,2
	24,5	3,4	6,4	1,9	3,4
	25	3,4	6,4	1,6	3,4
Átlag		3,0	5,7	1,7	3,2

A 3. táblázatban összefoglalt eredményeket diagramon ábrázoltam, mely a 7. ábrán látható.



7. ábra: Sűrűségkülönbségek Calgon esetében desztillált vízhez viszonyítva a hőmérséklet függvényében

A 7. ábrán látható diagram jól szemlélteti azt, hogy minél nagyobb a koncentráció, annál nagyobb a hidrométer leolvasás, valamint minél magasabb az oldat koncentrációja, annál pontosabb viselkedést tudunk megfigyelni, mivel megnő a változások léptéke. A 40 g/l 2 dl, tehát a 8% koncentráció görbét vizsgálva az eredmények azt mutatják, hogy a hőmérséklet növekedése során a sűrűség nem lineárisan növekszik, hanem polinommal közelíthető. A koncentráció csökkentésével a görbék továbbra is változatlanul nem monoton függvények, azonban a változások kisebbek, a görbe ellaposodik.

Célom volt a mért eredmények alapján olyan értékeket találni, melyekkel megspórolhatók a referenciafolyadékokban tett leolvasások, így hatékonyabb munkához vezet. Ennek érdekében a görbék alapján a sűrűségkülönbségeket úgy módosítottam, hogy minél kevesebb értékkel, minél jobban közelíthetőek legyenek. Figyelembe vettem, hogy a mért eredmények és a közelített értékek közötti eltérés 2%-nál kisebb hibát eredményezzen az iszap-agyag tartalmakban. Az eredményeket a 4. táblázatban foglaltam össze.

4. táblázat: Megállapított sűrűségkülönbségek a desztillált vízhez képest Calgon esetében a hőmérséklet függvényében [mg/cm³]

Sűrűségkülönbségek [mg/cm ³]			
Hőmérséklet [°C]	Koncentráció		
	2%	4%	8%
21,5	1,8	2,8	-
22,0			4,7
22,5			4,6
23,0			5
23,5			6,1
24,0		3,2	6,4
24,5			6,4
25,0			6,2
25,5			5,9
26,0			5,9
26,5			6

Megállapítottam, hogy minél nagyobb a diszpergálószer koncentrációja, annál érzékenyebb az eltérésekre. Már 0,5 mg/dm³ eltérés is 5%-os hibát eredményezett az agyag-iszap tartalomban, ezért a mért eredményektől nem lehet eltérni ilyen magas koncentráció esetében.

A Calgon+Na₂CO₃ alkalmazásához, mivel csak egy méréssorozat készült belőle, nagyobb adatmennyiség hiányában ilyen jellegű kalkulációkat nem végeztem.

4. Összefoglalás, konklúzió

A kutatás során szerzett tapasztalataim azt mutatják, hogy a vizsgált szabványtól eltérő koncentrációjú bármilyen töménységű diszpergálószeres oldatban végezhetünk hidrometrálást, ha a hőmérsékletet és a referenciafolyadék sűrűségét a leolvasási időpontokban rögzítjük, majd a számítás során a sűrűségtöbbletet levonjuk a hidrométer leolvasásainkból.

Diszpergálószerként a nátrium-hexametfoszfát és a nátrium-hexametfoszfát+nátrium karbonát egyaránt jól alkalmazható volt, azonban a nátrium-karbonát önmagában nem bizonyult megfelelőnek, mivel a szemcsék koagulációját okozta a mintában.

A hőmérsékletváltozással a mérések során a diszpergálószeres oldat sűrűsége önmagához és a desztillált víz sűrűségéhez képest is folyamatosan változott. A sűrűségkülönbséget a diszpergálószeres oldatok és a desztillált víz között

21,5-26,5°C-ok között regisztráltam, és meghatároztam a hőmérséklet-sűrűségkülönbség értékeit az egyes diszpergálószer-koncentrációkhoz. Ezekkel az értékekkel kell csökkenteni a talaj szuszpenzióban tett leolvasások értékét, hogy valós eredményeket kapjunk a szemeloszlási görbe meghatározásához.

5. Hivatkozások

Emeka A. E. (2015): Effect of Different Dispersing Solution on the Properties of Soil Particle during Hydrometer Test, *Civil&Environmental Engineering*.

MSZ EN ISO 14688-1:2003. Geotechnikai vizsgálatok. Talajok azonosítása és osztályozása.

MSZE CEN ISO/TS 17892-4, 2006.

BS 1377: Part 2:1990

