



SOPRONI
EGYETEM |

ERDŐMÉRNÖKI
KAR



JANKÓ SÁNDOR EMLÉKÜLÉS

KONFERENCIAKIADVÁNY

Szerkesztők: Zagyvainé Kiss Katalin Anita, Gribovszki Zoltán

Technikai szerkesztő: Zagyvainé Kiss Katalin Anita



JANKÓ SÁNDOR EMLÉKÜLÉS

KONFERENCIAKIADVÁNY

Jankó Sándor Emlékülés, Sopron, Hungary, 2024. június 18.

Szerkesztők: Zagyvainé Kiss Katalin Anita, Gribovszki Zoltán

Technikai szerkesztő: Zagyvainé Kiss Katalin Anita



SOPRONI EGYETEM KIADÓ

SOPRON, 2024

Geomatikai és Kultúrmérnöki Intézet (SoE)

Felelős kiadó: Prof. Dr. Fábián Attila

a Soproni Egyetem rektora

Szerkesztők: Zagyvainé Dr. Kiss Katalin Anita, Prof. Dr. Gribovszki Zoltán

Technikai szerkesztő: Zagyvainé Dr. Kiss Katalin Anita

Lektorok: Dr. Brolly Gábor Béla, Dr. Herceg András, Szalai Áron

Fotó: Dr. Herceg András

ISBN 978-963-334-547-4 (pdf)

<https://doi.org/10.35511/978-963-334-547-4>

Támogató: Jankó Péter

A konferencia kiadvány a TKP2021-NKTA-43 azonosítószámú projekt keretében az Innovációs és Technológiai Minisztérium (jogutód: Kulturális és Innovációs Minisztérium) Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NKTA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Creative Commons license: CC BY-NC-SA 4.0 DEED



Nevezd meg! - Ne add el! - Így add tovább! 4.0 Nemzetközi
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International

Tartalom

A Jankó Sándor Díjról.....	5
Állócseppkövek tanulmányozása vibrációméréssel és az eredmények geoinformatikai rendszerben való tárolása, megjelenítése	6
Úrfelvétel idősorozatok alkalmazása a hazai erdőmonitoringban ..	14
A soproni botanikus kerti meteorológiai állomás adatainak erdészeti célú elemzése	20
Jankó Sándor szobra a soproni Botanikus Kertben	30

A Jankó Sándor Díjról

A konferencia keretében emlékeztünk meg Intézetünk, a Geomatikai és Kultúrmérnöki Intézet, jogelődje az egykori Erdészeti Földméréstani Tanszék vezetőjéről Jankó Sándorról.

A Jankó Sándor díjat Jankó Péter egykori professzorunk unokája alapította. A Díj alapításának célja Jankó Sándor professzor emlékének megőrzése, az Erdőmérnöki Karon, a geomatika, az erdőfeltárás és a vízgazdálkodás területén jó tanulmányi eredményt elért hallgatók jutalmazásával. A kitüntetésre azok pályázhatnak, akik:

- mesterszintű vagy osztatlan képzésben, az adott tanulmányi évben fejezik be tanulmányaikat és diplomamunkájukat a Geomatikai és Kultúrmérnöki Intézetben készítették;
- doktorjelöltként az adott tanulmányi évben védtek meg a geomatika, vagy erdőfeltárás vagy a vízgazdálkodás területén készített PhD értekezésüket.

A Jankó Sándor Díj nyertesei előadásaiból az említett szakterületek jelenlegi kutatási témáiról tájékoztatást kaptunk, fókuszálva természetesen azokra az eredményekre, amelyeket a díjazottak értek el.

A konferencia menete

Köszöntő

A díjban részesülő végzős hallgatók előadásai:

Gyökeres István Dénes: Állócseppkövek tanulmányozása vibrációméréssel és az eredmények geoinformatikai rendszerben való tárolása, megjelenítése

Molnár Tamás: Űrfelvétel idősorozatok alkalmazása a hazai erdőmonitoringban

Muraközy Lili: A soproni botanikus kerti meteorológiai állomás adatainak erdészeti célú elemzése

ÁLLÓCSEPPKÖVEK TANULMÁNYOZÁSA VIBRÁCIÓMÉRÉssel ÉS AZ EREDMÉNYEK GEOINFORMATIKAI RENDSZERBEN VALÓ TÁROLÁSA, MEGJELÉNÍTÉSE

Study of stalagmites with vibration measurements, and storage and display of results in GIS

GYÖKERES ISTVÁN DÉNES¹, DR. GRIBOVSKI KATALIN ESZTER², DR. CZIMBER KORNÉL¹

¹Geomatikai és Kultúrmérnöki Intézet

²HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutató Intézet
nbvc025@gmail.com

Kivonat

A Kis-Kárpátokban (Szlovákia) található Detrekői-zsombolyban (Plavecká priepast) sajátfrekvencia meghatározására végzett adatgyűjtés történt a barlang legmagasabb cseppkövének vibráció-méréseivel. A terepi mérést Polytec VibroGO műszerrel végeztük. A mérési eredményeket az Obspy szoftver segítségével dolgoztuk fel, és jelenítettük meg. Összehasonlítást is végeztünk egy korábbi méréssel, továbbá a mérések eredményeit összehasonlítottuk az egyszerű elméleti számítások eredményeivel.

Abstract

Data collection to determine the natural frequencies of the highest stalagmite in the Plavecká priepast in the Little Carpathians (Slovakia) has been done. Field measurements were performed using a Polytec VibroGO portable instrument. The measurement results were processed using Obspy software and the results were displayed also in the Obspy. A comparison was also made with a previous measurement and the results of the measurements were compared to the results of simple theoretical calculations.

Bevezetés

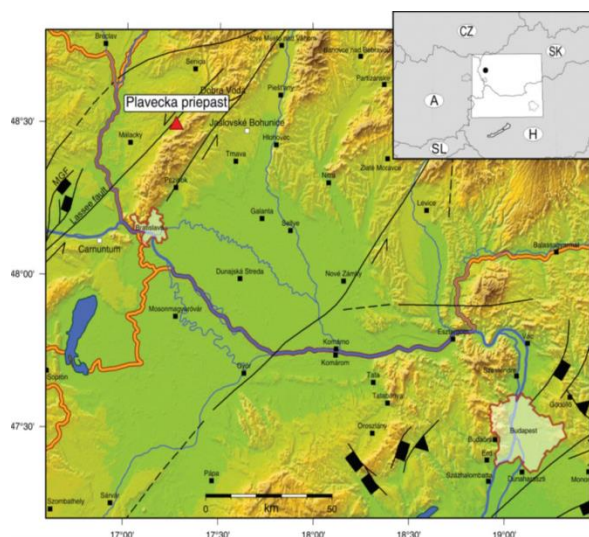
Kutatásunk tárgya egy bizonyos sértetlen, de sérülékeny gyertyaszál alakú álló cseppkő volt. Alapfeltételezésünk az volt, hogy ezek a speciális alakú cseppkövek túléltek „életük” (fejlődésük és létezésük) során az összes addig keletkezett földrengést, ebből következőleg ezek a cseppkövek képesek arra, hogy segítségükkel felső becslést adhassunk a környezetükben előfordult földrengések által keltett maximális horizontális talajmozgás mértékére vonatkozólag akár több ezer évre visszamenőlegesen is. Vizsgálati céljainkra alkalmas álló cseppkövek fontos paramétere a nagy magasság-átmérő arány ($H/D \geq 50$) és az, hogy ezen cseppkövek alakja többé-kevésbé hengeres legyen. Az ilyen alakú cseppkövek speciális neve a gyertyaszál alakú állócseppkő. Tapasztalataink szerint az ilyen típusú cseppkövek már alacsony horizontális talajgyorsulás-értékeknél is eltörnének. Ebből következőleg megfelelő jelző-eszközei lehetnek annak, hogy egy bizonyos nagyságú paleorengésnél (több ezer évvel ezelőtt) nagyobb nem keletkezhetett egy adott területen. A részletes cseppkővizsgálatokat végző kutatók (SZEIDOVITZ et al., 2008; GRIBOVSKI et al., 2013; 2017 stb.) által alkalmazott technika során megmérjük a barlangban talált, törött cseppkövek geo-mechanikai és rugalmassági paramétereit (sűrűség, Young-modulus, törőszilárdság), továbbá a cseppkő alakjának legfontosabb paramétereit. Ezek felhasználásával elméleti számításokkal meghatározzuk azt a kritikus talajgyorsulás-értéket, amelynek hatására a cseppkő már eltört volna. Továbbá geofizikai módszerekkel megmérjük a helyszínen a cseppkő vibrációját, melyből adatfeldolgozással meghatározzuk a cseppkő sajátfrekvenciáját és annak felharmónikusait majd ezeket összehasonlítjuk a geo-mechanikai paramétereiből és a cseppkő-alakból kiszámított elméleti értékkel (SZEIDOVITZ et al., 2008; GRIBOVSKI et al., 2013; 2017).

Jelen diplomamunkában ismertetett lézer-vibrométeres mérések a korábban a Detrekői-zsombolyban már vizsgált állócseppkő (vagy állócseppkövek) további vizsgálatát jelenti egy olyan vibráció-mérési eljárással, amit az előzőekben még nem alkalmaztak a cseppkő-vizsgálatok során ebben a barlangban. Jelen lézer-vibrométerrel történt adatgyűjtés, adatfeldolgozás végső célja, hogy ezen kutatások számára a jövőben felhasználható adatként szolgáljon további elemzések céljára, úgymint pl. a cseppkő belső struktúrája, annak esetleges inhomogén szerkezete vagy nem tengely-szimmetrikus alakja stb.

Anyag és módszer

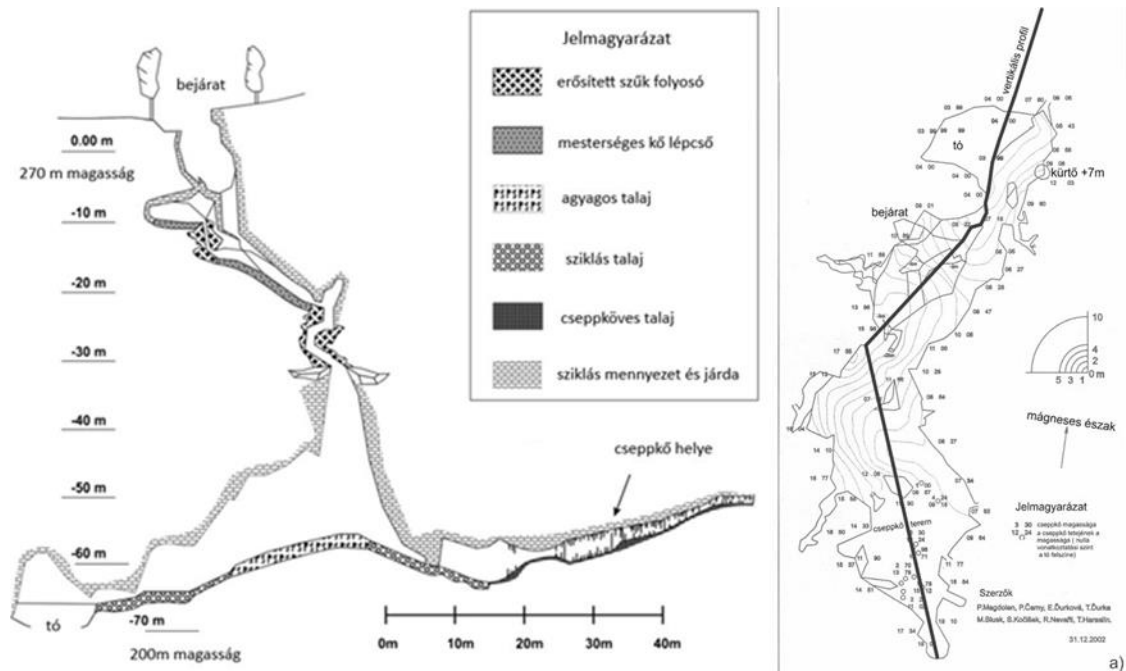
A vizsgált cseppkövek alacsony sajátfrekvenciájának azért van jelentősége, mert ha a cseppkő sajátfrekvenciája a közeli rengések frekvenciatartományába esik, akkor a cseppkő a rezonancia hatására, az általunk jelenleg csak a statikus esetre kiszámított kritikus horizontális gyorsulásértéknél kisebb gyorsulásra is már eltörne (GRIBOVSKI et al., 2017).

A vizsgált álló cseppkő a Detrekői-zsombolyban található (1. ábra). A Detrekői-zsomboly a Kis-Kárpátokban, Szlovákia nyugati részén helyezkedik el, közel a Bécsi-medencéhez és Bécs és Pozsony fővárosokhoz. A Kis-Kárpátok középső részének nyugati peremén található karszterület a Detrekői-karszt. A barlang a Detrekői-karsztnak pontosan azon kiemelkedése alatt foglal helyet, melynek csúcsán a XIII. században épített Detrekő vára áll. A barlang bejárata a várhegy nyugati felén található, Detrekővárálja (Plavecké Pohradie) településhez közel.



1. ábra A vizsgált barlang, a Detrekői-zsomboly elhelyezkedése (ZEMBATY et al., 2023)

A 30 m mély, vertikális szakadékon keresztül megközelíthető barlang, turisták által nem látogatható (2. ábra, keresztmetszet). A vizsgált állócseppkő a barlangnak a 'Cseppkő terem' elnevezésű részén található (2. ábra, alaprajz). Ez a terem kb. 400 db nyúlánk gyertya-szál alakú cseppkövet, vagy cseppkőoszlopot tartalmaz. Ezen álló cseppkövek átlagos magassága kb. 1,5-2,5 m, az átlagos átmérőjük pedig maximum 10 cm. Jelen diplomamunkában egy 4,3 m magas cseppkövet vizsgáltunk lézer-vibrométerrel.



2. ábra A Detrekői-zsomboly keresztmetszete (GRIBOVSZKI et al., 2017b) és alaprajza (BUTÁŠ, 2003)

A barlang teljes hossza mindössze 335 m, a szélessége pedig 15-20 m (2. ábra). A vertikális kiterjedése 70 m (2. ábra). A barlangról és a cseppkőképződményekről szóló további részletes leírások megtalálhatóak Butáš (BUTÁŠ, 2005) és Šmída (ŠMÍDA, 2010) munkáiban.

Jelen diplomamunka arról a nyúlánk és sérülékeny, 4,3 méter (3. ábra) magas állócseppkő sajátfrekvenciájának a meghatározása céljából készült, amelyet a HUN-REN FI (korábban MTA GGKI) munkatársai már évek óta vizsgálnak. Ezen vizsgálatok célja a terület földrengés-veszélyeztetettségének meghatározása volt.



3. ábra A 4,3 méter magas álló cseppkő, a cseppkő magasságának mérése során (GRIBOVSZKI et al., 2017)

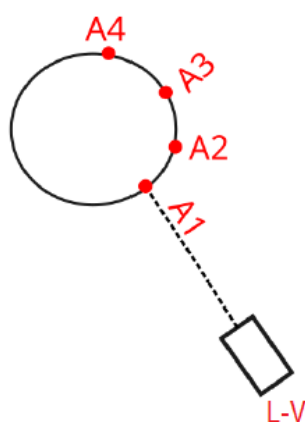
A terepi mérések során a sajátfrekvencia meghatározására használtuk a VibroGo VGO-200 lézer-vibrométert (lézeres rezgésmérő), a vibrációmérések feldolgozására pedig az Obspy-t, ami egy Python kódban íródott szeizmológiai obszervatóriumi gyakorlatban használt feldolgozószoftver.

Ugyanebben a barlangban a 4,3 méter magas cseppkőn korábban (2013-ban) már végeztek vibrációmérést és sajátfrekvencia-meghatározást egy speciális, alacsony frekvenciájú geofonnal (típusa LF-24). Az akkori mérési eredményeket is felhasználjuk most viszonyítási alapként a 2023.05.12-én elvégzett lézer-vibrométeres mérés eredményeinek értékelése során, melyet itt közlünk először.

A mérést az Opolei Műszaki Egyetem (TU Opole, Poland) oktatói (Piotr Bonkowski, Piotr Bobra) és doktorandusza (Marcin Jaworski) és a HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet tudományos főmunkatársa, Gribovszki Katalin végezték. Mivel a helyben (a barlangban) végzett mérések a sértetlen állócseppkövek esetében kizárólag roncsolásmentes mérések lehetnek (Szlovákia teljes területén is természetvédelmi oltalom alatt állnak a cseppkövek ugyanúgy, mint hazánkban), ezért az *in situ* (természetes helyén vagy helyzetében) vizsgálatainkban kizárólag a cseppkővibrációs-mérésekre és a cseppkövek méretének meghatározására szorítkozhattunk.

A 4,3 méter magas cseppkő, amelynek vibrációját rögzítettük az, amelynek a vibrációját már korábban is megmérték 2013-ban egy alacsony frekvenciájú geofonnal (LF-24), amelyet rárögzítettek a cseppkőre.

A VibroGo műszerrel a mérés menete ugyanolyan módon történt, mint ahogyan azt mi a próbaméréseink során is végeztük (lásd GYÖKERES, 2024 első 2 fejezetét), annyi különbséggel, hogy a retro-reflektív szalag nem ragadt meg a cseppkő felületén, így azt használni a barlangi méréseink során nem tudták. A lézert úgy irányozták rá a cseppkőre, hogy a lézerfény a lehető legvízszintesebb legyen (a műszerlábakat ehhez magasra kellett emelni). A cseppkővet modális kalapáccsal gerjesztették (ütötték meg) az alap közelében és körülbelül 80 cm magasságban (a cseppkő lábától mérve), ez a H1 jelű szint. A H1 szintnél 4 különböző szögben (kb. 45 fokos különbséggel) történt a gerjesztés, A1-A4 jelekkel, és az alábbi rajz szerint (4. ábra) minden szögben kb. 3 ütés volt. (Bonkowski. Measurement notes 12.05.2023.)



4. ábra A 4,3 m magas cseppkő mérési elrendezése, a lézer-vibrométer (L-V) és a modális kalapáccsal való ütések helyének (A1-A4) sematikus képe

Eredmények

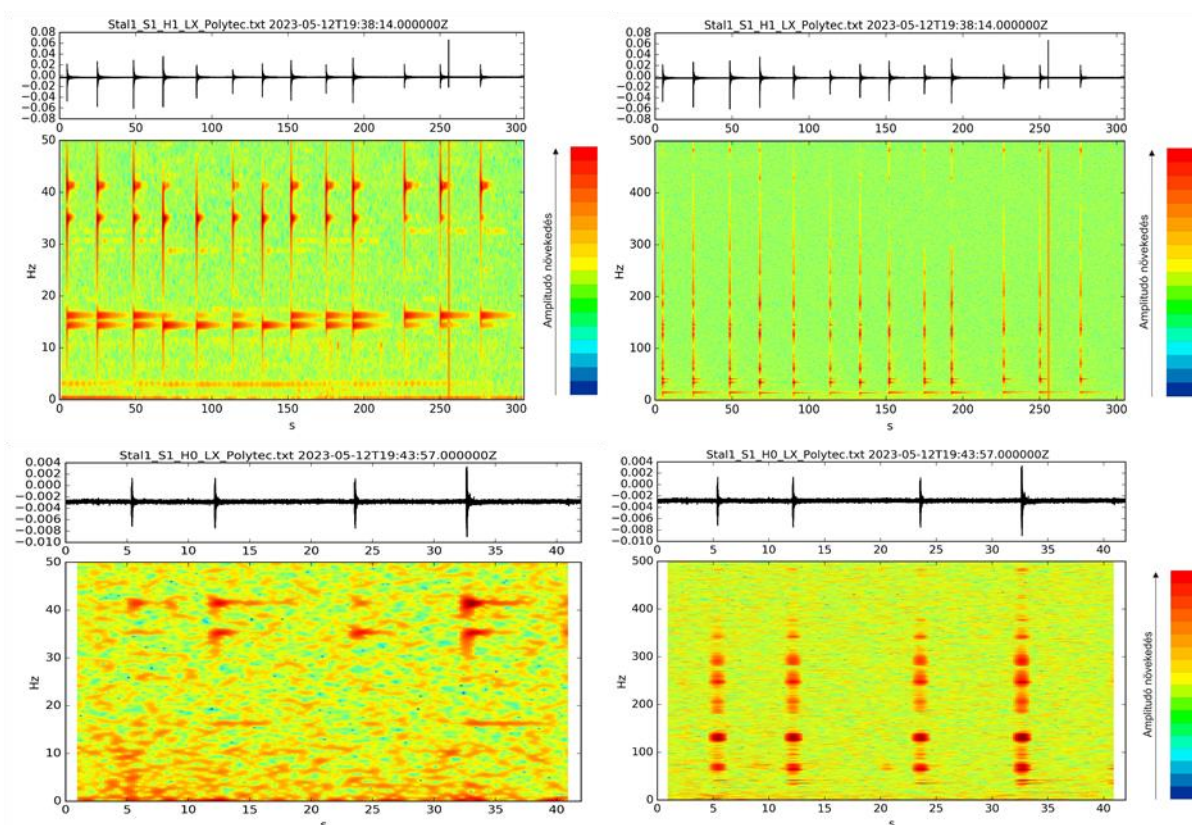
A sajátfrekvencia értékeket először az Obspy szoftver felhasználásával meghatároztuk, majd pedig az eredményeket összevetettük egymással (4,3 m magas cseppkő 2 különböző helyzetű gerjesztése), a korábbi mérésekkel (4,3 m magas cseppkő) és a korábbi egyszerű számítási eredményeinkkel (4,3 m magas cseppkő).

Az 4,3 m magas cseppkő lézer-vibrométeres mérés adatait egy másik módszerrel értékeltük ki, amellyel a következő eredményeket kaptuk.

A mérések kiértékelése adatkonverziót követően az Obspy-programmal történt, amit Mónus Péter (Georisk Mérnöki Iroda) volt szíves elvégezni számunkra. (Szeizmológiai obszervatóriumi kiértékelő program Python kódban.)

A lézer vibrométer analóg jeleit digitalizálón keresztül gyűjtöttük a 4,3 m magas cseppkő esetében, mivel a modális kalapács jeleit össze kellett szinkronizálni a méréseink során a lézer vibrométer által gyűjtött jelekkel. A digitalizálóból érkező adatok konverzióját Surfer program segítségével végeztük el, hogy azok beolvashatóak legyenek az Obspy-ba (5. ábra).

A mért frekvencia csúcsok: **2,5 Hz**; 14 Hz; 16 Hz; 34,5 Hz; 41,5 Hz; 60 Hz; 125 Hz; 145 Hz; 180 Hz; 240 Hz; 280 Hz; 340 Hz; 370 Hz; 475 Hz.



5. ábra A 4,3 méter magas cseppkővön végzett lézer-vibrométeres mérés eredménye az alap közelében gerjesztve (balra), 80 cm-es magasságban gerjesztve (jobbra) az Obspy-programmal kiértékelve

Az alsó gerjesztésből sajnos nehezen, az alsó sajátfrekvenciákat illetően pedig egyáltalán nem lehet meghatározni az értékeket.

A 4,3 méter magas cseppkő sajátfrekvenciája (f_0) a lézer-vibrométeres mérés alapján: 2,5 Hz
A 4,3 méter magas cseppkő sajátfrekvenciája (f_0) a geofonos mérés alapján: 3,0 Hz
A felharmónikusok a lézer-vibrométeres mérés esetén: 14,0 Hz; 16,0 Hz; 34,5 Hz; 41,5 Hz
A felharmónikusok a geofonos mérés esetén: 14,5 Hz; 16,0 Hz; 36,0 Hz; 41,0 Hz
A két különböző mérés alapján kapott frekvencia értékek egymáshoz igen közeli.
A 4,3 méter magas cseppkő sajátfrekvenciája (f_0): 2,5 Hz

Az itt leírtak Gribovszki és szerzőtársai eredményei és számításai (GRIBOVSZKI et al., 2017a, b). Abban az esetben, ha az álló cseppkő ideális alakú (hengeres, azaz állandó a keresztmetszeti átmérője) a következő egyszerű egyenlet, amely az egytengelyű tartók elméletén alapul használható ahhoz, hogy kiszámítsuk a cseppkő sajátfrekvenciáját (1)
Az álló cseppkő sajátfrekvenciája:

$$f_0 \approx \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{3.1ED^2}{16\rho H^4}}, \quad (1)$$

A horizontális talajgyorsulás, amely a cseppkő törését okozná kifejezhető, mint:

$$a_g = \frac{D\sigma_u}{4\rho H^2}, \quad (2)$$

ahol: D: a cseppkő átlagos átmérője;
H: a cseppkő magassága;
 ρ : a cseppkő sűrűsége;
E: a rugalmassági Young-modulusa;
 σ_u : a törőszilárdsága.

A sűrűség értéke, az ultrahangos Vp, Vs és a törőszilárdsági értékek mind mechanikai laboratóriumi méréseken alapulnak. A törőszilárdságot egyszerű laboratóriumi szakítószilárdsági teszttel határoztuk meg. A dinamikus Young-modulust az ultrahanggal meghatározott Vp és Vs értékekből számítottuk ki. A méréseket a Cseh Tudományos Akadémia Geonikai Intézetének (Institute of Geonics) mechanikai laboratóriumában végeztük el. Az eredményeket az 1. táblázat tartalmazza.

1. táblázat A mechanikai laboratóriumi teszt eredményei (GRIBOVSZKI et al., 2017a, b)

	sűrűség, > [kg/m ³]	ultrahang, Vp [km/s]	ultrahang, Vs [km/s]	dinamikus Young modulus, E [MPa]	szakítószilárdság, \hat{f}_u [MPa]
Detrekői- zsomboly	1 940,5 ± 6,4	4,40 ± 0,18	2,10 ± 0,16	25 181,0 ± 3 915,3	0,51 ± 0,13

A számított sajátfrekvencia-érték majdnem azonos volt a geofonnal mért értékkel (2. táblázat). A különbség azzal magyarázható, hogy számításainkban elhanyagolásokkal és általánosításokkal is éltünk. Például a cseppkő valós alakja nem teljesen hengeres és az anyaga sem teljesen homogén, valamint a fizikai paramétereit is azon mechanikai tesztek eredményeiből nyertük, amely teszteket más (törött) cseppköveken hajtottunk végre (GRIBOVSZKI et al., 2017a).

2. táblázat A törést okozó horizontális talajgyorsulás-eredménye az elméleti számítások alapján (GRIBOVSZKI et al., 2017a, b)

ID	MAGASSÁG (m)	ÁTMÉRŐ (cm)	M/Á	mért geofon f_0 (Hz)	elméleti f_0 (Hz)
IVSTM	>4	átlag: 8 (10,5-6)	50	3	2,5

Eredmények értékelése számítás, geofonos vibráció-mérés, lézer-vibrométeres vibrációmérés:

A 4,3 méter magas cseppkő sajátfrekvenciája (f_0) számítással: 2,5 Hz

A 4,3 méter magas cseppkő sajátfrekvenciája (f_0) lézer-vibrométeres méréssel: 2,5 Hz

A 4,3 méter magas cseppkő sajátfrekvenciája (f_0) geofonos méréssel: 3,0 Hz

Ami a legjelentősebb eredmény az az, hogy az elméleti számítások és a lézer-vibrométeres eredmények ugyanazt az f_0 értéket adták 2,5 Hz-et. Valamint a felharmónikusokra is szinte azonos értékeket kaptunk.

A 4,3 méter magas cseppkő felharmónikusai számítással: 14,5 Hz 16,0 Hz 36,0 Hz 41,0 Hz

A 4,3 méter magas cseppkő felharmónikusai lézer-vibrométeres méréssel: 14,0 Hz 16,0 Hz 34,5 Hz 41,5 Hz

Az LF-24 geofon súlya 0,3 kg, ami nem elhanyagolható a cseppkő kb. 55 - 60 kg-os tömegéhez képest (a cseppkő tömege a sűrűségéből és a nagyjából hengeres alakjából kiszámítható). A 0,3 kg az kb. fél %-a a cseppkő tömegének. Kb. olyan 100 cm magasra felszerelve egy ekkora súlyt a cseppkőre az elhangolhatja a cseppkövet, és ez jól látható most, az eltérő sajátfrekvencia-értékben.

Következtetések

- 1) A mérés (azaz a ráhelyezéssel geofon nélküli terepi cseppkővizsgálat) sikeres volt, annak ellenére, hogy a visszaverőfóliát nem sikerült felragasztanunk a cseppkőre, azaz feldolgozható és értékelhető adatokat kaptunk.
- 2) Az elméleti számításokkal kapott sajátfrekvenciához (f_0) közelebb kerültünk, mint a 2013-as, geofonos mérésnél.
- 3) A felharmónikusok (f_0 -nál nagyobb sajátfrekvenciák) esetében a 2013-as geofonos vizsgálati eredmények közelebb voltak a számításokkal kapott értékekhez, mint a lézer-vibrométeres mérési eredmények.

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm az HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet tudományos főmunkatársának, Dr. Gribovszki Katalin Eszternek a terepi munkáját, a rám szánt időt és a szakmai segítséget, amit a dolgozat készítése alatt végig biztosított.

A Detrekői-zsombolyban végzett terepi méréseinket a Földfizikai és Űrtudományi kutatóintézet (Magyar Kutatási Hálózat, HUN-REN) tulajdonát képező VibroGo lézer-vibrométerrel végeztük. Köszönjük a HUN-REN FI-nek, hogy használhattuk a műszert a méréseinkhez.

Nagy köszönettel tartozunk mindazon barlangászoknak, akik a terepi méréseinkben segédkeztek. Ők név szerint a következő személyek voltak: Juraj Littva, Stanik Pavel (Szlovák Barlangászati Felügyeletről), Bazsó Tamás (Soproni Egyetem) és Milan Herz (ő a kis-kárpátokbeli barlangászati szervezettől volt).

Néhány ábra elkészítéséhez az OBSPY programot (BEYREUTHER et al., 2010) használtuk, melyet Mónus Péter (Georisk Mérnöki Iroda) volt szíves a céljainkra használni. A barlangban mért adatok adatkonverzióját Novák Attila (HUN-REN FI) végezte el.

Irodalomjegyzék

- BUTÁŠ, J. (2003): Plavecká priepast' PP-2. Spravodaj Slovenskej speleologickej spoločnosti (Bulletin of Slovak Speleological Society). 34. 1. 35-38.
- BUTÁŠ, J. (2005): Plavecká Abyss PP-2. Bulletin of Slovak Speleological Society. Special edition. Proceedings of 14th Speleological Congress UIS in Greece. 48-50.
- GRIBOVSZKI, K., KOVÁCS, K., MÓNUS, P., SHEN, C.-C., TÖRÖK, Á., BRIMICH, L. (2013a): Estimation of an upper limit on prehistoric peak ground acceleration using the parameters of intact stalagmites and the mechanical properties of broken stalagmites in Domica cave, Slovakia. Slovensky kras. Acta Carsologica Slovaca. 51(1). 5–14.
- GRIBOVSZKI, K., BOKELMANN, G., SZEIDOVITZ, G., VARGA, P., PASKALEVA, I., BRIMICH, L., KOVÁCS, K. (2013b): Comprehensive investigation of intact, vulnerable stalagmites to estimate an upper limit on prehistoric ground acceleration. In: Proceedings of the vienna congress on recent advanced in earthquake engineering and structural dynamics & 13. D-A- CH Tagung, Vienna, Paper No. 445. p. 10.
- GRIBOVSZKI, K., KOVÁCS, K., MÓNUS, P., BOKELMANN, G., KONECNY, P., LEDNICKÁ, M., MOSELEY, G., SPÖTL, C., EDWARDS, R. L., BEDNÁRIK, M., BRIMICH, L., TÓTH, L. (2017a): Estimating the upper limit of prehistoric peak ground acceleration using an in situ, intact and vulnerable stalagmite from Plavecka' priepast cave (Detrekői-zsomboly). Little Carpathians. Slovakia—first results. Journal of Seismology. 21(5). 1111–1130. <https://doi.org/10.1007/s10950-017-9655-3>
- GRIBOVSZKI, K., KOVÁCS, K., MÓNUS, P., BOKELMANN, G., KONECNY, P., LEDNICKÁ, M., MOSELEY, G., EDWARDS, R. L., SPÖTL, C., BEDNÁRIK, M., BRIMICH, L., TÓTH, L., HEGYMEGI, E., KEGYES-BRASSAI, CS., SZEIDOVITZ, GY. (2017b): Hosszú távú földrengés-veszélyeztetettség becslése a Detrekői-zsombolyban (Kis-Kárpátok, Szlovákia) sértetlen állócseppkövének vizsgálatával. Magyar Geofizika. 58(2). 1-16.
- GYÖKERES, I. D. (2024): Állócseppkövek tanulmányozása vibrációméréssel és az eredmények geoinformatikai rendszerben való tárolása, megjelenítése. Diplomamunka. Sopron.
- ŠMÍDA, B. (2010): Geomorfológia a genéza Plaveckého krasu ako modelového územia tzv. kontaktného krasu Západných Karpát s nižšou energiou reliéfotvorby. (Geomorphology and formation of Detrekő karst) Dizertačná práca. Katedra fyzickej geografie a geoekológie. Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského v Bratislave. p. 220.
- SZEIDOVITZ, GY., PASKALEVA, I., GRIBOVSZKI, K., KOSTOV, K., SURÁNYI, G., VARGA, Z. (2008a): Estimation of an upper limit on prehistoric peak ground acceleration using the parameters of intact speleothems in caves situated at the western part of Balkan mountain range. Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica. 43. 249–266. <https://doi.org/10.1556/AGeod.43.2008.2-3.13>
- SZEIDOVITZ, GY., SURÁNYI, G., GRIBOVSZKI, K., BUS, Z., LEÉL-ÖSSY, SZ., VARGA, Z. (2008b): Estimation of an upper limit on prehistoric peak ground acceleration using the parameters of intact speleothems in Hungarian caves. Journal of Seismology. 12. 21–33. <https://doi.org/10.1007/s10950-007-9068-9>
- ZEMBATY, Z., BOŃKOWSKI, P., JAWORSKI, M., GRIBOVSZKI, K. (2022): Seismic Vulnerability of a Slender Stalagmite – Dataset. Mendeley Data. V1. <https://doi.org/10.1080/13632469.2022.2033356>
- ZEMBATY, Z., BOŃKOWSKI, P., JAWORSKI, M., GRIBOVSZKI, K. (2023): Seismic Vulnerability of a Slender Stalagmite. Journal of Earthquake Engineering. 27(4): 878-897. <https://doi.org/10.1080/13632469.2022.2033356>

ÚRFELVÉTEL IDŐSOROZATOK ALKALMAZÁSA A HAZAI ERDŐMONITORINGBAN

MOLNÁR TAMÁS^{1,2}

¹ Soproni Egyetem, Erdészeti Tudományos Intézet, Ökológiai és Erdőművelési Osztály, tudományos munkatárs

² Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Geomatikai és Kultúrmérnöki Intézet, Földmérési, Geoinformatikai és Távérzékelési Tanszék és Roth Gyula Erdészeti és Vadgazdálkodási Tudományok Doktori Iskola
E-mail: molnar-tamas@uni-sopron.hu

Bevezetés

Az elmúlt évtizedekben megnőtt az erdőkárok gyakorisága Magyarországon. A klímaváltozás mind a biotikus, mint az abiotikus károk súlyosságát fokozza, így a szél, aszály, árvíz, rovarok, vírusok, gombák okozta károk száma és intenzitása megnőtt. Ezeket az erdőt ért bolygatásokat úrfelvételeken alapuló távérzékelési technológiákkal monitorozni tudjuk (MOLNÁR, 2017; 2018).

Az erdők fontossága és nagy kiterjedése miatt, illetve az egyre gyakoribb erdőkárok okán ez a módszer a terepi kárfelmérések kiegészítőjévé vált, hiszen nagy pontosságú és gyakran frissülő adatot szolgáltat, sokszor ingyenesen. Jelenleg is elérhető számos új program képi adatbázisa, melyek monitorozásra felhasználhatóak. A szisztematikus és automatizált monitorozás megvalósítható komplex erdőmonitoring rendszerekkel, melyek távérzékelést és terepi adatokat is felhasználnak (MOLNÁR – SOMOGYI, 2019).

A távérzékeléshez kapcsolódó technológia a felhőalapú informatika, ami erőforrásokat és szolgáltatásokat biztosít az interneten keresztül, mely lehetővé teszi monitoring rendszerek futtatását komoly informatikai infrastruktúra, illetve nagy méretű adatok letöltése és feltöltése nélkül, mely által a folyamat gyorsabb és rugalmasabb.

A nagyléptékű erdőmonitoring rendszerek ezen technológiákra támaszkodnak, hiszen az állományok gyakran szétszórta helyezkednek el, és az állapotváltozásukat is csak hosszabb időtávon lehet tanulmányozni (MOLNÁR et al., 2019). A műholdképek felhasználhatóak az erdő kiterjedésének és egészségi állapot-változásának detektálására (BARKA et al., 2019). A műholdképekből számított, fotoszintetikus aktíváson alapuló vegetációs (pl. Normalizált Vegetációs Index - NDVI) és nedvesség indexekkel (Normalizált Nedvesség Index - NDWI) monitorozni lehet ezen változásokat és erdőkárokat. A vegetációs index a fotoszintetikus aktivitásra utal, míg a nedvesség index a lombkorona és a talaj szárazodását mutatja ki. A biotikus és abiotikus károkon túl, az emberi hatásra bekövetkező bolygatásokat is észlelhetjük az úrfelvételeken, melyek az erdőállomány tulajdonságait befolyásolják, pl. a koronazáródás csökkenését egy tarvágás vagy egy gyérítés után. Ezek a bolygatások ideiglenesen csökkentik az index értékeket, így ezek különválasztása fontos feladat. A monitoring rendszerbe beépített mesterséges intelligencián alapuló algoritmus képes észlelni, mind a természetes, mind az antropogén bolygatásokat. Bár a távérzékeléssel nem lehet a bolygatottság okát közvetlenül megmondani, elindíthat egy terepi felmérést, ami már a konkrét okot is azonosítani tudja.

Magyarországon 2017 óta működteti az Erdészeti Tudományos Intézet a Távérzékelésen alapuló Erdőállapot Monitoring Rendszert (TEMRE, www.temre.hu), ami erdeink egészségi állapotát a környezetük, és a klíma változásával összefüggésben monitorozza (SOMOGYI et al., 2018a; 2018b). A rendszer közepes térbeli felbontású (250x250 m) MODIS úrfelvétel idősorozatból készült, 16 naponta frissülő, szűrt és erdőmaszkolt térképek használatán alapszik. Az erdő egészségi állapotát a Z NDVI (Standardizált Normalizált Vegetációs Index) írja le pixelenként, ami az aktuális és a hosszú távú (2000-2022) átlagon, illetve

szóráson alapszik. A Z NDVI térképeken túl, fafaj és termőhelyi térképek is elérhetőek a honlapon.

A jövőben a rendszer lényeges továbbfejlesztésére lesz szükség. Ennek oka, hogy a jelenleg használt műholdak élettartama korlátozott és hogy az új Sentinel műholdakkal jelentősen növelhetjük a feldolgozott műholdképek mennyiségét, információ-tartalmát és pontosságát, tehát a doktori értekezésem első célja kifejleszteni ezt az új, TEMRE-ben is alkalmazható módszertant.

Ezek a fejlesztések lehetővé teszik a nagyfelbontású, rendszeres időközönként frissített űrfelvételek használatát. A PhD értekezés egyik célja a felhőalapú megoldások, a mesterséges intelligencia és a teljes hazai erdőállományra készült terepi adatbázisok használata volt. Ennek a PhD kutatásnak az eredményeit foglalja össze ez a cikk. Továbbá a jövőben hasznos lenne ezt a rendszert egy új, európai léptékű erdőmonitoring rendszerbe beépíteni.

Vizsgálatai anyag és módszer

Három mintaterületet vizsgáltam: a Debreceni Nagyerdőt, a Sárvári Farkas-erdőt és a Központi-Bükköt. Ezek a területek különböznek a méretükben (1092-5665-49152 ha), domborzatukban (síkvídedi ill. hegyvídedi), elhelyezkedésükben (az ország keleti, nyugati és északi részein vannak), és tipikus növénytakarásaikban is (kocsányos-tölgyes (Convallario-Quercetum roboris), gyertyános- kocsányos tölgyes (Quercus roboris-Carpinetum), szubmontán bükkös (Melittio-Fagetum)).

Ezen területek vizsgálatára az Európai Űrügynökség Copernicus programjának Sentinel-2 műholdjait használtam fel. Ezek a műholdak gyakori, (2-5-napos) visszatérési idővel és nagy, 10x10 m-es terepi felbontásban pásztázzák a Föld felszínét.

A Sentinel-2 műholdképek feldolgozására a Google Earth Engine (GEE) felhőrendszerét használtam, melynek interaktív felülete nagy mennyiségű térinformatikai adat feldolgozására lett megalkotva. A többcélú alkalmazás magába foglalja a felszín monitorozását: a felszínborítás és a földhasználat változásait is nyomon lehet követni.

A GEE-ben a program egy virtuális felhőben fut, ami nem igényli a nagy mennyiségű adat letöltését és az ahhoz szükséges informatikai infrastruktúrát. Az általam írt program egy új monitoring rendszer alapja lehet, mely olyan módszertani elemekből épül fel, melyekkel elérhetőek a monitoring céljai.

Az ESA Sentinel-2 MSI L2A (felszíni reflektancia) űrfelvétel mozaikokat kérdeztem le a GEE adatbázisából, melyekből kompozitokat készítettem a 2017-2020 közötti vegetációs időszakokra. Minden felvételen használtam felhőszűrést és erdőmaszkolást, hogy a felhős pixeleket (metaadat és quality band alapján) és a mintaterületen (három terület és Magyarország) kívüli területeket kiszűrjem, hogy csak a valóban erdővel borított területek maradjanak meg, a víz, út, épület, nyiladék, csemetekert, vadföld besorolású részleteket kiszűrtem. Hasonlóképpen az időablakot is beállítottam a vegetációs időszakokra (áprilistól október végéig), amikor az erdők aktívan fotoszintetizálnak.

A maszkolt és szűrt kompozitokból vegetációs (VI) és vízindexeket számítottam minden évre, pl. NDVI-t, NDWI -t és EVI-t. Változástérképeket is készítettem az állapot-térképekből, melyek két év különbségét mutatják kivonással, illetve standardizációval, az NDVI esetében ezek az NDVI változás és a Z NDVI.

A GEE számítási korlátai miatt mintaterület szintű adat-aggregációra is szükség volt az indexek számítása során, amit reduktorokkal (átlag, középérték, átlagtól való eltérés)

oldottam meg, mielőtt megjelenítettem és exportáltam volna a térképeket. Valószínűs (RGB) kompozitokat is készítettem.

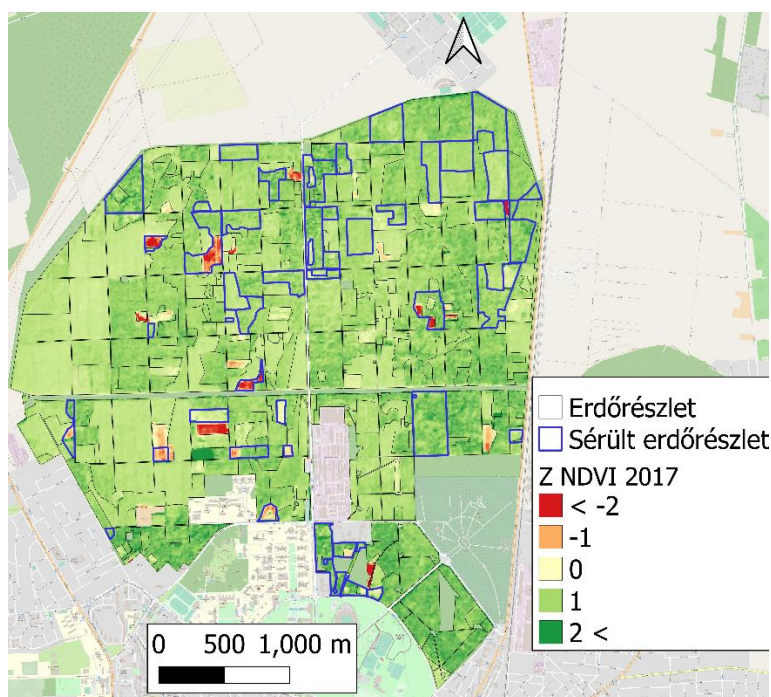
A teljes 2017-2020 közötti idősort felhasználva NDVI grafikonokat állítottam elő, szintén medián reduktorral. Ezekon a görbéken a fő fafajok adatsorai láthatóak, és ezeket exportáltam ki a Google Drive-be CSV formátumban, illetve georeferált TIFF formátumban a képek esetében, melyek további offline elemzési és még részletesebb megjelenítési lehetőséget rejtnek magukban.

A kiexportált VI térképeket a terepi kárbejelentőkkel vettem össze pixel szinten, ahol az erdőkárok a terület (ha), kárgyakoriság (0-100%) és intenzitás (0-100%) alapján vizsgáltam. A kárgyakoriság az adott fafaj sérült egyedeinek számát mutatja az összes egyedhez képest az adott erdőrészletben, százalékban kifejezve. Míg a kárerély a kár súlyosságát jelzi, az egészséges állapottól való eltérés mértékével, szintén százalékban megadva.

Vizsgálati eredmények értékelése, megvitatása, következtetések

A GEE-alapú erdőkármonitoring rendszer űrfelvételekből készült vegetációs index térképek és a terepi kárbejelentők alkalmasnak bizonyultak az erdők egészségi állapotának értékelésére.

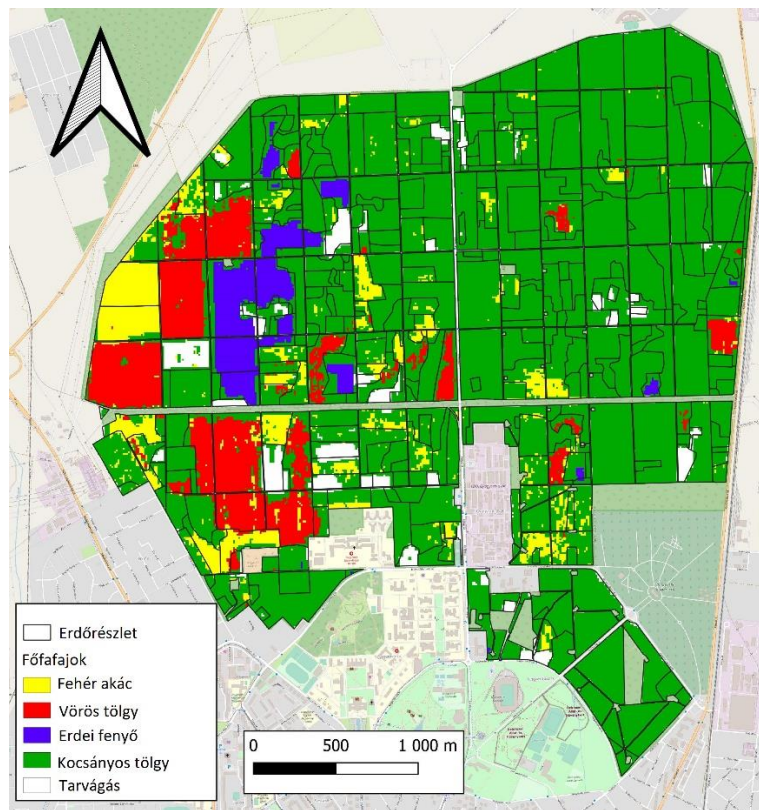
A **Debreceni Nagyerdőn** a távérzékelési módszer 94,3%-os pontosságot mutatott képpont szinten, amikor a terepi kárbejelentőket az újraosztályozott Z NDVI értékekkel vetettem össze (MOLNÁR et al 2021). A Z NDVI térképek elemzésével kimutattam, hogy a 2017-es bázisév kompozitja alapvetően magas Z NDVI értékeket mutatott, egészséges növényzettel, bár látszottak a tarvágások és a gyéren erdősült részletek is.



1. ábra A Debreceni Nagyerdő Z NDVI éves kompozit térképe 2017-ből. Láthatók a tarvágások és az erdőkárok is azokban a foltokban, melyek fotoszintetikus aktivitása jelentősen eltér a többéves átlagtól negatív irányban, bolygatottságot jelezve ezzel. A terepi („sérült erdőrészlet”) és távérzékelte erdőkárok átfedése is látható a térképen.

2018-ban általános Z NDVI csökkenés volt tapasztalható az erdő nagy részén a szárazság és a fagykár miatt. Míg 2019-ben és 2020-ban többnyire pozitív anomáliákat tapasztalhattunk a térképeken a véghasználat utáni felújítás és a gyéribben erdősült területek regenerációja lévén. A többnyire pozitív változások ellenére, negatívakat is észleltem, 2020-ban az erdő északkeleti része kevésbé volt egészséges, alacsonyabb Z NDVI értékeket mutatott, ahol egy nagyobb kocsányos tölgyes tömb van, ami közismerten szárazság-stresszről szenved évtizedek óta.

A **Random Forest (RF)** gépi tanulási módszer felhőrendszerben való alkalmazásával kimutattam a különböző főfafajok elterjedését 82,1%-os pontossággal, amikor a távérzékelte eredményeket erdőrészlet szinten hasonlítottam össze az adattári adatokkal, melyek tartalmazzák a faj adatokat is. A RF módszere megadott tanítóterületeken (esetünkben főfafajadatokat tartalmazó pontokon) és döntési fákon alapszik. A tanítóterületekhez kijelöltünk a Nagyerdőn 104 mintapontot, majd ebből a bemenetből a GEE felhőben futatott program öt féle kimenetet alkotott a megadott mintákhoz való hasonlóság alapján, így készítve el a fafajterképet.



2. ábra A Debreceni Nagyerdő Random Forest osztályozóval készült főfafaj térképe. Jól elkülöníthető a Nagyerdő nyugati tömbjében az akác, a vörös tölgy és az erdei fenyő is, míg a keleti tömb főként tölgyesekkel borított.

A **Farkas-erdőre** készült kompozitok érdekes eredményeket adtak önmagukban és összehasonlításban is, 2017 és 2020 között (MOLNÁR – KIRÁLY 2021). Elmondható a 2017-es Z NDVI térképek elemzése kapcsán, hogy bár számos erdőrészletben tapasztalam alacsonyabb fotoszintézist főként a jégkárok miatt, többnyire egészséges képet mutatott az erdő. A sérült erdőrészletek javulást mutattak 2018-ban és 2019-ben, amit magasabb index

értékek jeleztek, ugyanakkor más részletek az aszály miatt pont csökkenő vitalitást mutattak. 2019-ben újfent jelentkeztek erdőkárok, ami indexérték csökkenéssel is járt. Ez 2020-ban is látható volt, bár kisebb intenzitással, ugyanakkor új károsodások is megjelentek.

A **Központi-Bükkben** a legsúlyosabb erdőkárokat a hótörés és széldöntés okozta 2017 áprilisában (MOLNÁR et al., 2020a, 2020b) de májusban, júniusban, illetve 2018 és 2019 áprilisában is hasonló károkat jelentettek be. Míg az aszály 2017 és 2018 augusztusában és szeptemberében, illetve 2019 és 2020 szeptemberében és októberében jelentkezett.

A **GEE-alapú módszerrel** készült térképek részbeli egyezést mutattak a korábbi tanulmányainkkal, a sérülés 2017-ben látható volt az új térképeken is, bár kisebb kiterjedésben és mértékben. Az új módszer szerint 0,56%-a sérült a Központi-Bükknek, ahol a Z NDVI -0,5 alatt volt, ez kb. 291 hektárnak felel meg. Ez hasonló a kárbejelentőkben regisztráltakhoz, de más módszerekkel korábban 1,8-2,2%-os sérülést kaptunk eredményként (MOLNÁR et al 2019), ami kb. 1040 hektár. Ezeknek a különbségeknek több oka is volt: a Sentinel-2 finomabb felbontása a MODIS-hoz képest, a vizsgálati időszak csak 4 év a korábbi 20 évhez képest, ami a Z NDVI számításakor fontos, ahol a hosszú távú átlag az egyik fő tényező.

Az **eredményeimet** mások tanulmányaival összevetve elmondható, hogy nagy változatosságot lehet tapasztalni: a műholdtól, mintaterülettől és fafajtól függően. Még Közép-Európából is csak elfogadható eredményeket ($R^2=0,5-0,6$) jelentettek hasonló termőhelyi adottságú helyekről származó, Sentinel-2 felvételekből számolt hagyományos indexeken alapuló német, lengyel, cseh, szlovák, stb. tanulmányok, melyek erdőkár felméréssel foglalkoztak.

A **rendszer továbbfejlesztése** a biotikus károkkal való vizsgálattal (MOLNÁR – KIRÁLY, 2022a), illetve lézeres letapogatással készült 3D-s erdőmodellek bevonásával történhet (Molnár – KIRÁLY, 2022b), továbbá az európai szintű kiterjesztés is rendkívül hasznos lenne (MOLNÁR et al., 2022a), hiszen az aszály a 2022-es évben a kontinens egészét sújtotta (MOLNÁR et al., 2022b).

Irodalomjegyzék

- BARKA, I., BUCHA, T., MOLNÁR, T., MÓRICZ, N., SOMOGYI, Z., KOREŇ, M. (2019): Suitability of MODIS-based NDVI index for forest monitoring and its seasonal applications in Central Europe. Central European Forestry Journal. 66. 206-217. <https://doi.org/10.2478/forj-2019-0020>
- MOLNÁR T., KIRÁLY G. (2021): A Sárvári Farkas-erdő Sentinel-2 ürfelvétel alapú erdőmonitoring terve. Erdészettudományi Közlemények, 11(2): 83-94. <https://doi.org/10.17164/EK.2021.009>
- MOLNÁR, T. (2017): A modern finn erdőgazdálkodás az erdőosztályozás megalkotásától a teljes gépesítettségig és a térinformatikáig. Alföldi Erdőkért Egyesület Kutatói Nap XXIII. Tudományos eredmények a gyakorlatban, 184-190., ISBN 978-615-80594-1-1
- MOLNÁR, T. (2018): A térinformatika alkalmazása az erdőállapot monitoringban és a klímaváltozás kutatásában. NAIK Kutatói utánpótlást elősegítő program II. szakmai konferenciája, 88-93., ISBN 978-615-5748-09-7
- MOLNÁR, T., BIRINYI, M., KIRÁLY, G., MÓRICZ, N., KOLTAY, A., HIRKA, A., CSÓKA, GY., SOMOGYI, Z. (2020): Egy bükki hótörés távérzékelési elemzése MODIS és Sentinel-2 műholdképek alapján. Geomatikai Közlemények XXII. (2020). Sopron.
- MOLNÁR, T., BIRINYI, M., SOMOGYI, Z., KIRÁLY, G. (2019): Bükki erdőkárok felmérése és elemzése ürfelvételek alapján in Facskó, F., Király, G. (szerk.) (2019): Soproni Egyetem Erdőmérnöki Kar VII. Kari Tudományos Konferencia – a konferencia előadásainak és posztereinek kivonatai. Soproni Egyetem Kiadó, Sopron. pp 20. ISBN 978-963-334-320-3.
- MOLNÁR, T., BIRINYI, M., SOMOGYI, Z., KIRÁLY, G. (2020): A 2017. áprilisi bükki hókárok felmérése és elemzése ürfelvételek alapján. Soproni Egyetem Erdőmérnöki Kar VII. Kari Tudományos Konferencia. Sopron. ISBN 978-963-334-323-4

- MOLNÁR, T., KIRÁLY, G. (2022a): A Soproni-hegységet 2017-2020 között sújtó szúkárók távérzékelési felmérése Sentinel-2 műholdképeken. in. Erdészeti Tudományos Konferencia Sopron. Szerk. Czímber Kornél. Sopron, 2022.
- MOLNÁR, T., KIRÁLY, G. (2022b): Comparative analysis of ice break damage in 2014 in two valleys of Börzsöny Mountains in Hungary based on Airborne Laser Scanning. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*, Vol. 18, Nr. 2 (2022) 103–117, <https://doi.org/10.37045/aslh-2022-0007>
- MOLNÁR, T., KIRÁLY, G., SOLBERG, S. (2022a): European satellite-based forest monitoring systems. ForestSAT 2022, Berlin, Németország
- MOLNÁR, T., KOLTAY, A., MÓRICZ, N., SOMOGYI, Z. (2018): Távérzékelésen alapuló Erdőállapot Monitoring Rendszer (TEMRE). Alföldi Erdőkért Egyesület Kutatói Nap 2018. Tudományos eredmények a gyakorlatban. Lakitelek, 2018.
- MOLNÁR, T., MÓRICZ, N., BOROVIK, A. (2022b): A Magyarország erdeit 2022 nyarán sújtó aszály távérzékelési felmérése. *Erdészeti Lapok CLVII*: 10. 330-333, 4 p.
- MOLNÁR, T., SOMOGYI, Z. (2019): A távérzékelés alkalmazása az erdészetben és a precíziós gazdálkodásban. in Gyuricza, Cs., Borovics, A. (szerk.) (2019): Lendületben az agrárinnováció. Mezőgazda Kiadó, Gödöllő, 2019, pp. 111-119, ISBN 9786155748134.
- MOLNÁR, T., SOMOGYI, Z., KIRÁLY, G. (2021): A Debreceni Nagyerdő Sentinel-2 úrfelvételeken alapuló erdőmonitoring rendszer terve. in *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában XII.: theory meets practice in GIS: Debreceni Egyetem, XII. Térinformatika Konferencia és Szakkiállítás.* Szerk. Molnár Vanda Éva. Debrecen, 2021. ISBN 978-963-318-977-1
- SOMOGYI, Z., KOLTAY, A., MOLNÁR, T., MÓRICZ, N. (2018a): Forest health monitoring system in Hungary based on MODIS products. *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában IX.: theory meets practice in GIS: Debreceni Egyetem, IX. Térinformatika Konferencia és Szakkiállítás.* Szerk. Molnár Vanda Éva. Debrecen, 2018. ISBN 978-963-318-723-4
- SOMOGYI, Z., KOLTAY, A., MOLNÁR, T., MÓRICZ, N. (2018b): Távérzékelésen alapuló Erdőállapot Monitoring Rendszer (TEMRE). *Erdészeti Lapok CLIII. évf.*, 2018. szeptemberi szám, p. 277-279.

A SOPRONI BOTANIKUS KERTI METEOROLÓGIAI ÁLLOMÁS ADATAINAK ERDÉSZETI CÉLÚ ELEMZÉSE

MURAKÖZY LILI¹, KALICZ PÉTER¹, GRIBOVSZKI ZOLTÁN¹

¹Geomatikai és Kultúrmérnöki Intézet, Soproni Egyetem, Sopron, Bajcsy-Zs. u. 4.

MurakozyL19@student.uni-sopron.hu

Bevezetés

A klímaváltozást és hatásait sokféle módszerrel és méréssel lehet vizsgálni. Az erdő hidrológiai rendszerének megértéséhez nélkülözhetetlenek a hosszú távú meteorológiai megfigyelések (BOLLA-SZABÓ, 2019). A rendelkezésre álló adatok (elsősorban hosszú távú napi levegőhőmérséklet és csapadék adatsorok) felhasználásával a hidrológiai rendszer változásaira összpontosító vizsgálatokat végezhetünk. Sopronban a meteorológiai mérések több mint 300 éves múltra nyúlnak vissza, ezzel jó alapot szolgáltatva a hosszú távú megfigyeléseken alapuló vizsgálatoknak (PÖDÖR, 1985). Bár a nyers adatok különböző féle hibákat tartalmaznak (pl. emberi hibák, műszer hibák), ezek kijavításával egy sokrétűen felhasználható adatbázist kapunk (SEVRUK, 1982). Fontos, hogy az éghajlatváltozás különböző hatásait ne csak regionális, hanem helyi szinten is nyomon kövessük, mivel ezek értékes információkkal szolgálhatnak, ezzel is növelve a helyi beavatkozások sikerességét. Ezért fókuszál a tanulmány a Botanikus kerti meteorológiai állomás adatainak feldolgozására és elemzésére, mivel ezen állomás nem teljesen volt digitalizálva eddig, pedig a belőle származó információk tovább árnyalhatják Sopron klímájáról és a térség erdeiről alkotott képünket. Az erdeink milyenségét nagyban befolyásolják a különböző hidrológiai és meteorológiai viszonyok (GRIBOVSZKI – KUCSARA, 2023). Ezáltal a klímaváltozás hat mind az erdőre, mind a hidrológiai adottságaira (CSÁKI, 2020).

Anyag és módszer

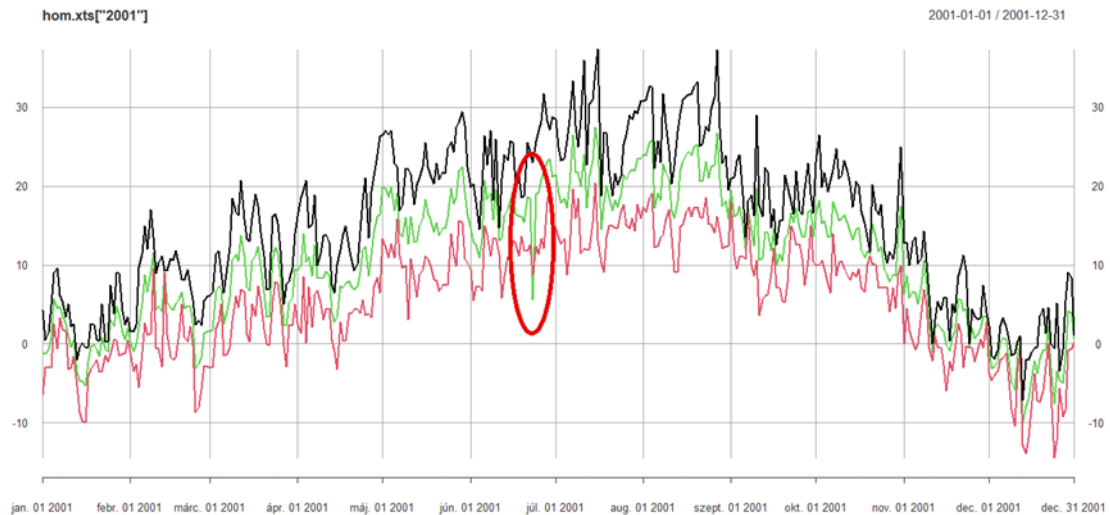
A műszerek, amikkel a méréseket végezték a Soproni Egyetem területén található a Botanikus kertben, ugyanazon típusúak, mint bármely más éghajlati állomáson az országban.

A HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt.-től, az egykori Országos Meteorológiai Szolgálattól kaptam a Botanikus kerti mérőállomás nyers adatait 1980.02.18-tól 2023.07.31-ig bezárólag. Az adatok egy része papír formátumban állt rendelkezésemre (kb. 12,5 év adata), ezeket digitalizálnom kellett először, másik részüket havi bontású Excel táblázatok formájában kaptam meg. A begyűjtött adatokat rendszereztem és létrehoztam egy egységesített adatbázist (GÜNTHER, 1903). Ezenkívül megkaptam az egykori OMSZ-tól a Kuruc dombi nyers és homogenizált középhőmérséklet és csapadékösszeg adatokat 1870-től, ezeket összehasonlításához tudtam használni a Botanikus kerti adatokkal.

Az adathibákat az R program, xts. csomagja segítségével javítottam. Itt vizuálisan és grafikusán derítettem fel a napi hibákat, amiket utána Excelben javítottam egyesével. A hibákat durva és finom hibára osztottam fel.

Példa maximum hőmérséklet hibáira:

1997-08-16 263,0 (263,0 °C van 26,30 °C helyett)

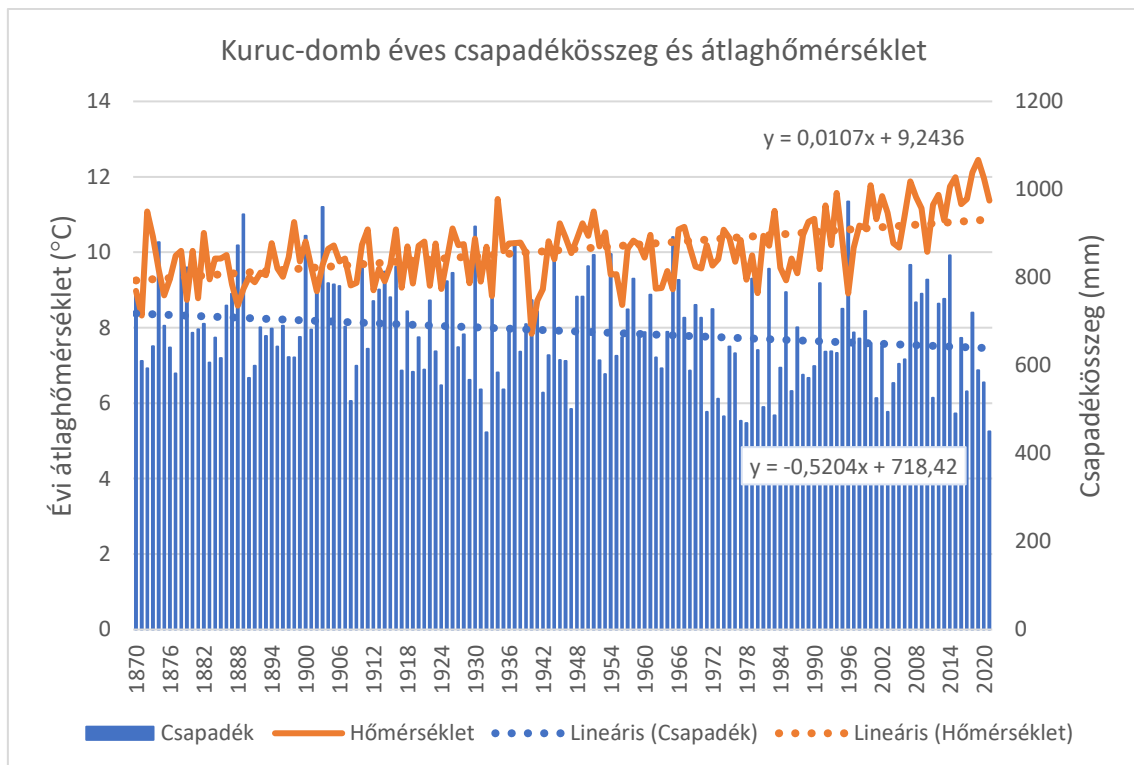


1. ábra Finom hibák ábrázolása

A meteorológiai adatok elemzéséhez különböző statisztikai módszereket: korrelációs számítást, eloszláselemzést és regressziószámítást végeztem. Ezenkívül szignifikanciavizsgálatot is készítettem a hőmérséklet és csapadékváltozás vizsgálatához.

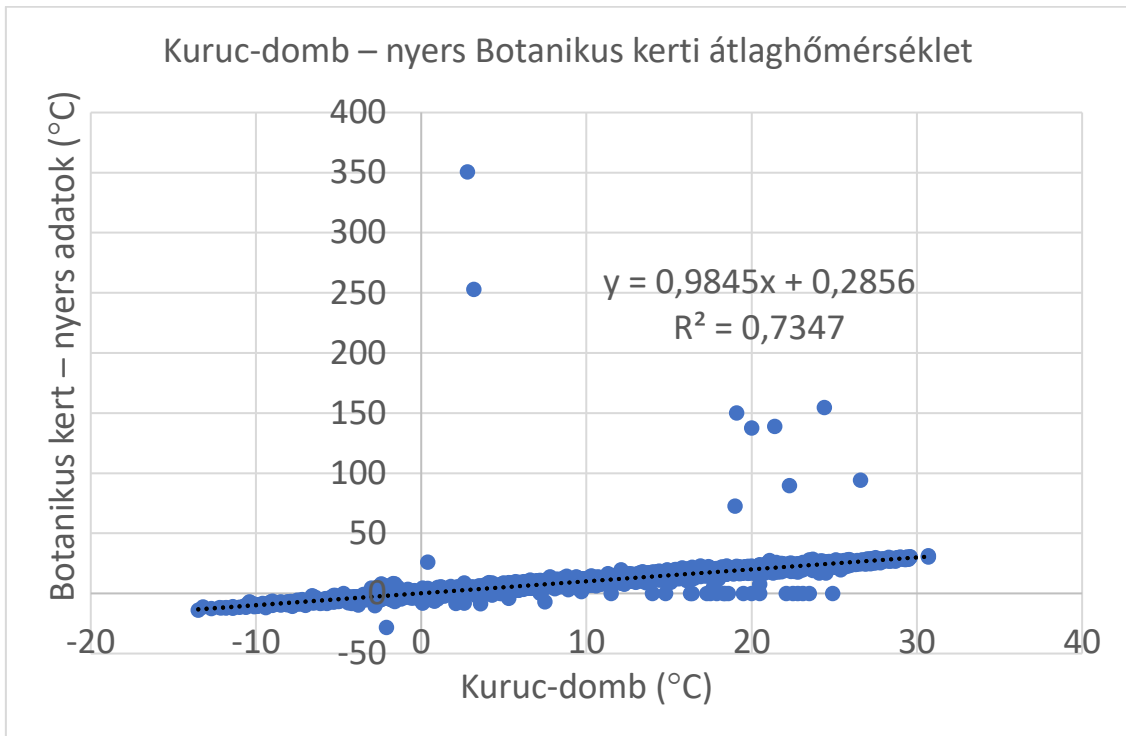
A meteorológiai adatokat ezután különböző statisztikai módszerek segítségével elemeztem. Emellett az erdészeti aszályossági indexet (FAI) és a Thornthwaite-féle havi vízmérleg modellt is alkalmaztam (FÜHRER, 2010; THORNTHWAITE – MATHER, 1955).

Eredmények

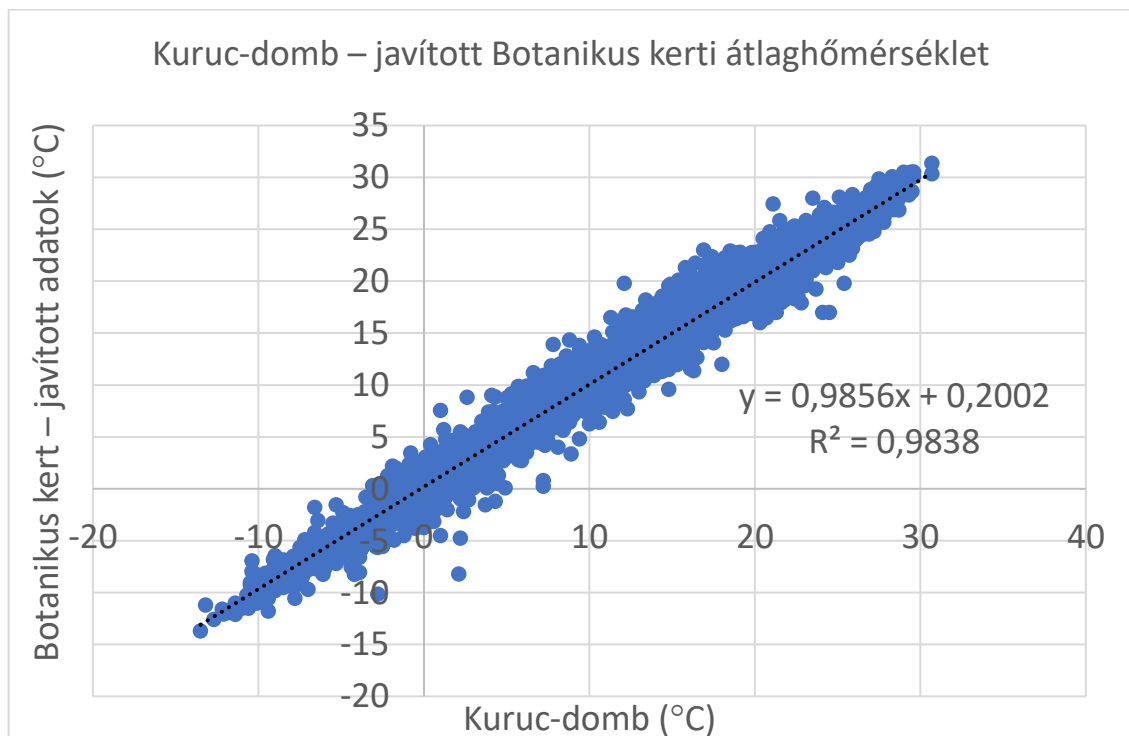


2. ábra Kuruc-dombi homogenizált adatok évi átlaghőmérsékleteinek és csapadékösszegeinek alakulása

A Kuruc-dombi adatokra (1870-2021) készítettem egy diagrammot az éves csapadékösszegek és éves átlaghőmérsékletek alapján. Az eredmények alapján a hőmérséklet 1,61°C-ot emelkedett az elmúlt 150 évben, a csapadék pedig 79 mm-t csökkent. 1990 után megfigyelhető egy jelentősebb emelkedés a hőmérsékletben.



3. ábra Kuruc-domb és a nyers Botanikus kert átlaghőmérsékletének összehasonlítása



4. ábra Kuruc-domb és a javított Botanikus kert átlaghőmérsékletének összehasonlítása

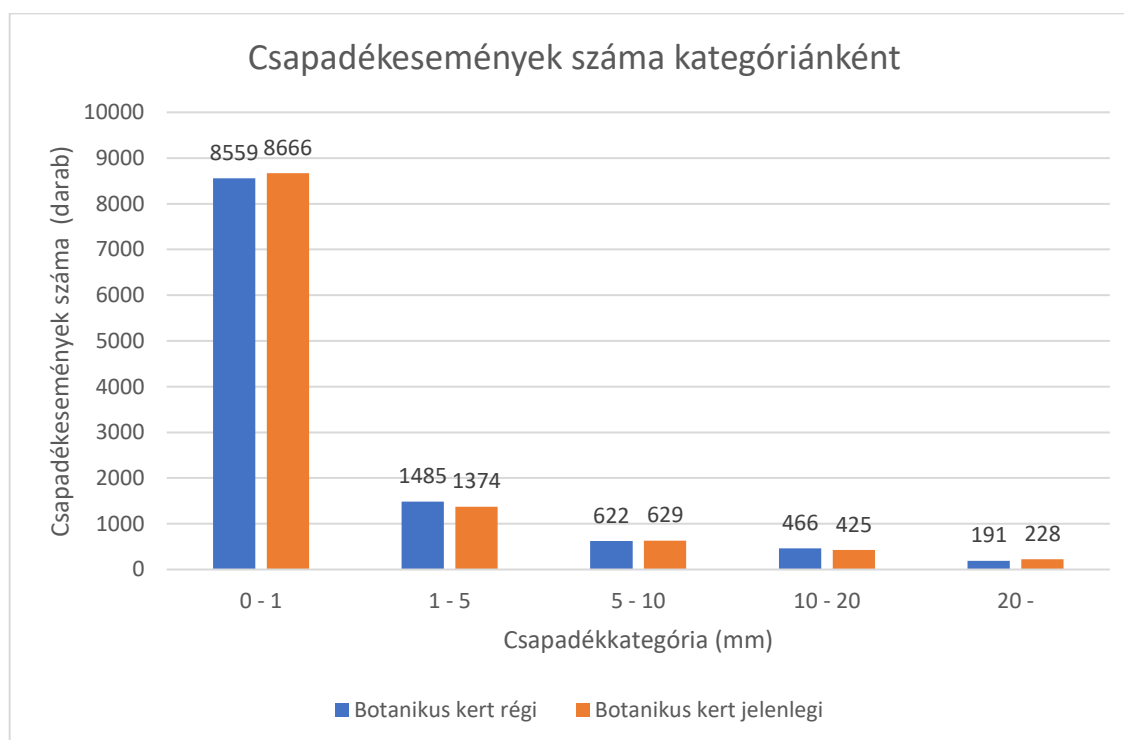
A nyers Kuruc-dombi átlaghőmérséklet adatokkal hasonlítottam össze a három munkafázis (nyers adatok, durva hibáktól javított, és javított adatokat (finom és durva hibák)). Excelben ábrázoltam az eredményeket, majd lineáris trendvonalat illesztettem rájuk a változások szemléltetéséhez (SZENTIMREY, 1989).

A javított adatsorral való összehasonlítás szerint hőmérsékletileg nagyon hasonló a két állomás, bár a Botanikus kert az elmúlt 30 évben kissé melegebb. Az R^2 magas értéke azt jelzi, hogy erős az összefüggés a két adatsor között, és a hibák kiszűrése után láthatjuk, hogy javul az összefüggés szorossága. ($R^2=0,9838$)

Ezután a csapadékokat csapadékmennyiségi kategóriánként összehasonlítottam a Botanikus kerti adatsorra vonatkozóan. A vizsgált 30 éves időszakot (1989-2019) egy múltbeli 30 éves időszakkal (1930-1960) hasonlítottam össze.

1. táblázat Csapadék darabszám kategóriánként

	1930-1960	1989-2019	Változás a régihez képest (%)	Változás a régihez képest (db)
mm	Régi Botan	Jelenlegi Botan		
0-1	8559	8666	+1,3%	+107
1-5	1485	1374	-7,5%	-111
5-10	622	629	+1,1%	+7
10-20	466	425	-8,8%	-41
20-	191	228	+19,4%	+37
Darab össz.:	11323	11322	0%	-1



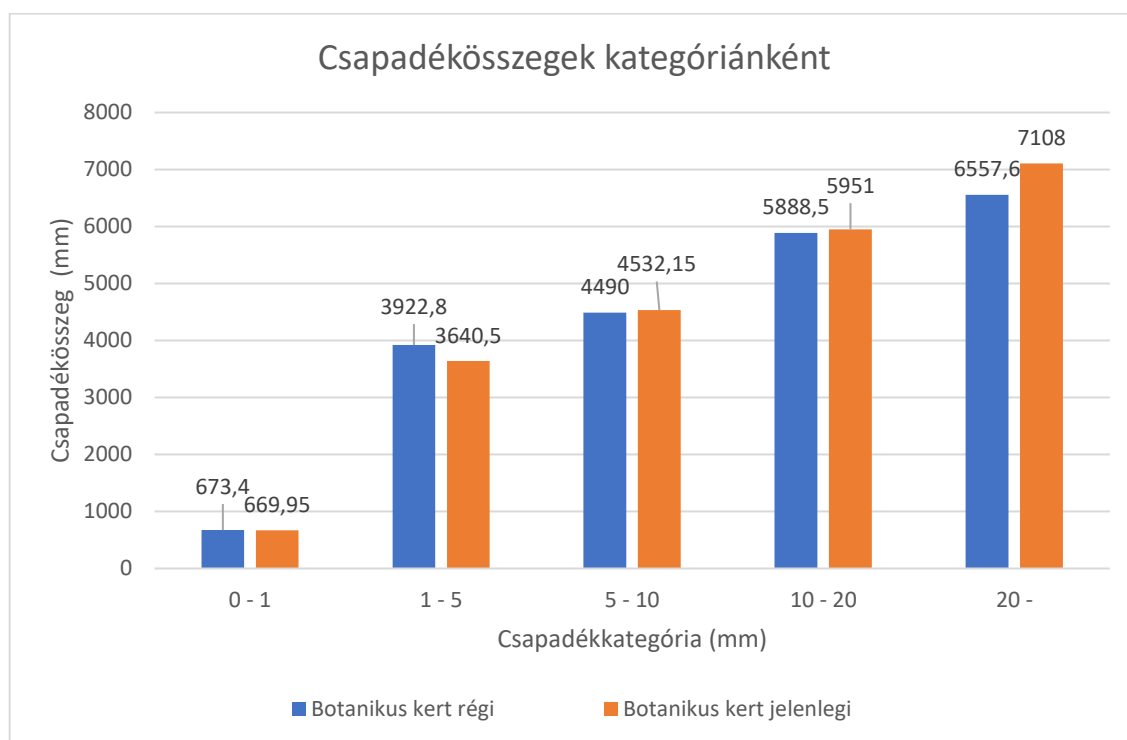
5.ábra 1930-1960 (kék) és 1989-2019 (narancssárga) csapadékesemények darabszámainak összehasonlítása kategóriánként

A jelenlegi 30 évben több nagyobb csapadék volt, így a 20 mm feletti kategóriában nagyobb a csapadékösszeg. A kisebb csapadékokból viszont régen volt több. (1-5 mm-es kategória)

A 20 mm feletti kategóriában jelentős a különbség a két időszak között. Habár összességében kissé több csapadék is volt a jelenlegi időszakban, érdemes az eloszlásokat is figyelembe vennünk, mivel a több, közepes csapadék sokkal előnyösebb egy erdei ökoszisztéma számára, mint a kevesebb, nagyobb intenzitású csapadék.

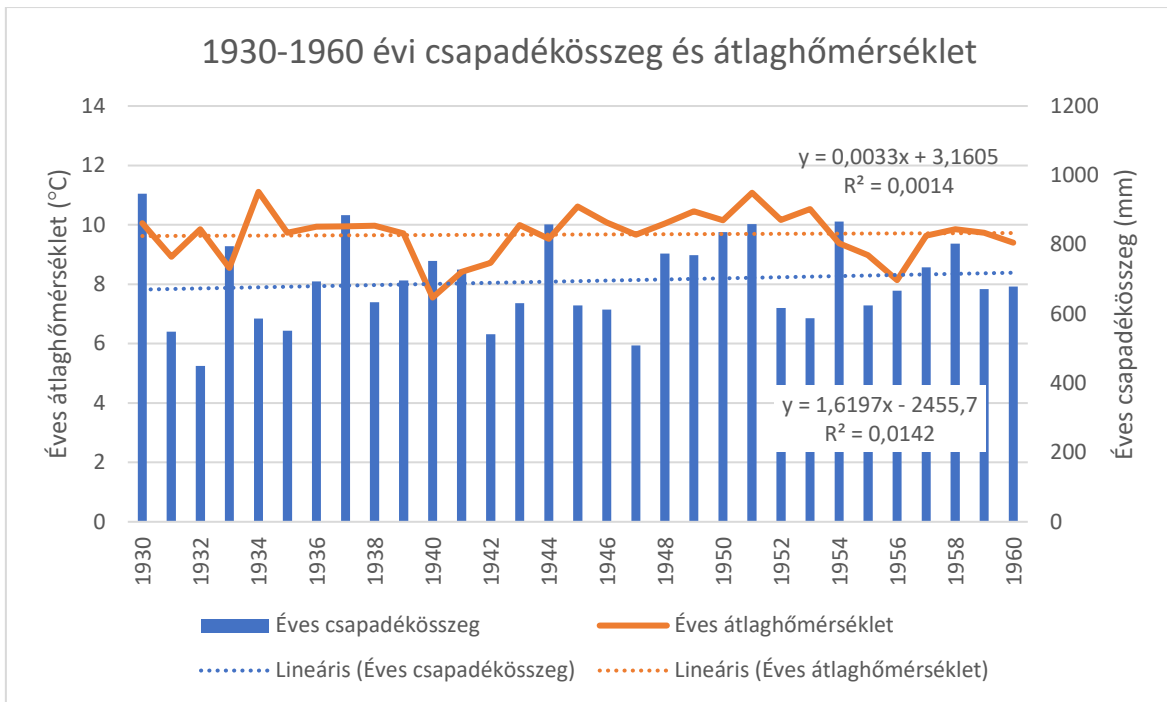
2. táblázat Csapadékösszegek kategóriánként

mm	Régi Botan	Jelenlegi Botan	Változás a régihez képest (%)	Változás a régihez képest (db)
0-1	673,4	669,95	-0,5%	-3,5
1-5	3922,8	3640,5	-7,2%	-282,3
5-10	4490	4532,15	+0,9%	+42,1
10-20	5888,5	5951	+1,1%	+62,5
20-	6557,6	7108	+8,4%	+550,4
Csapadékössz.:	21532,3	21901,6	+1,7%	+369,3

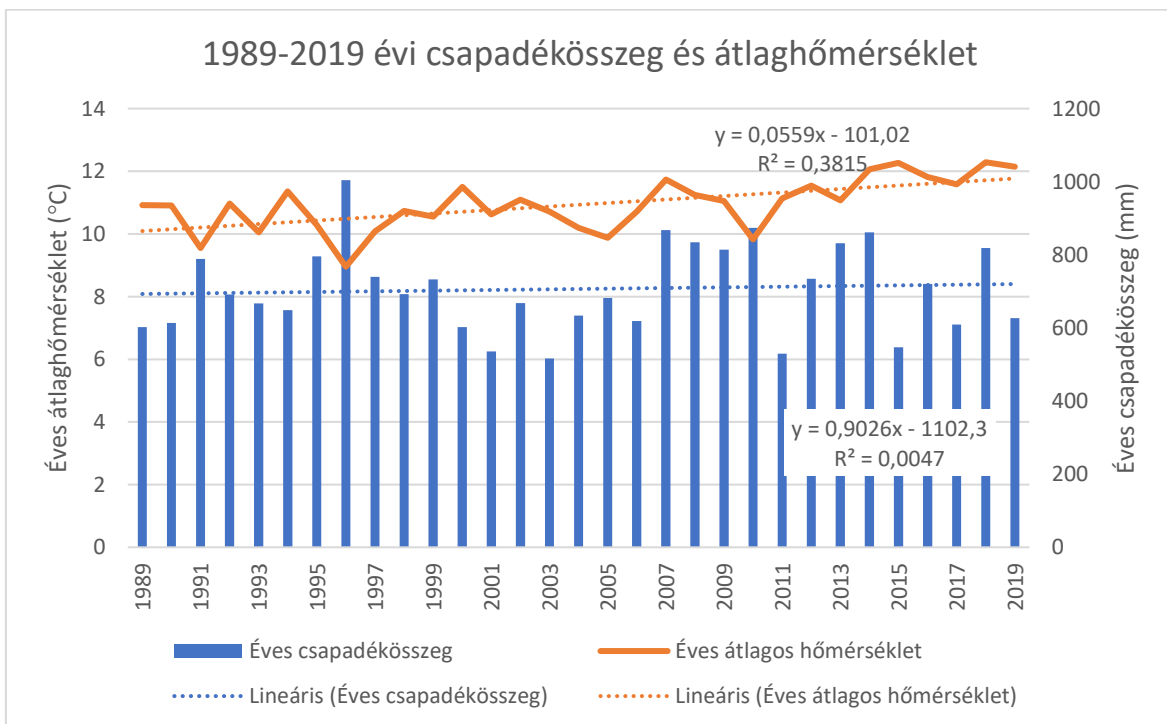


6. ábra 1930-1960 (kék) és 1989-2019 (narancssárga) csapadékösszegeinek összehasonlítása kategóriánként

Ezután a Botanikus kert 1989-2019-es 30 éves adatsorát elemeztem az évi csapadékösszegek és átlaghőmérsékletek összehasonlításával. A hőmérséklet adatsornál 1,68°C emelkedés mutatható ki 30 év alatt.



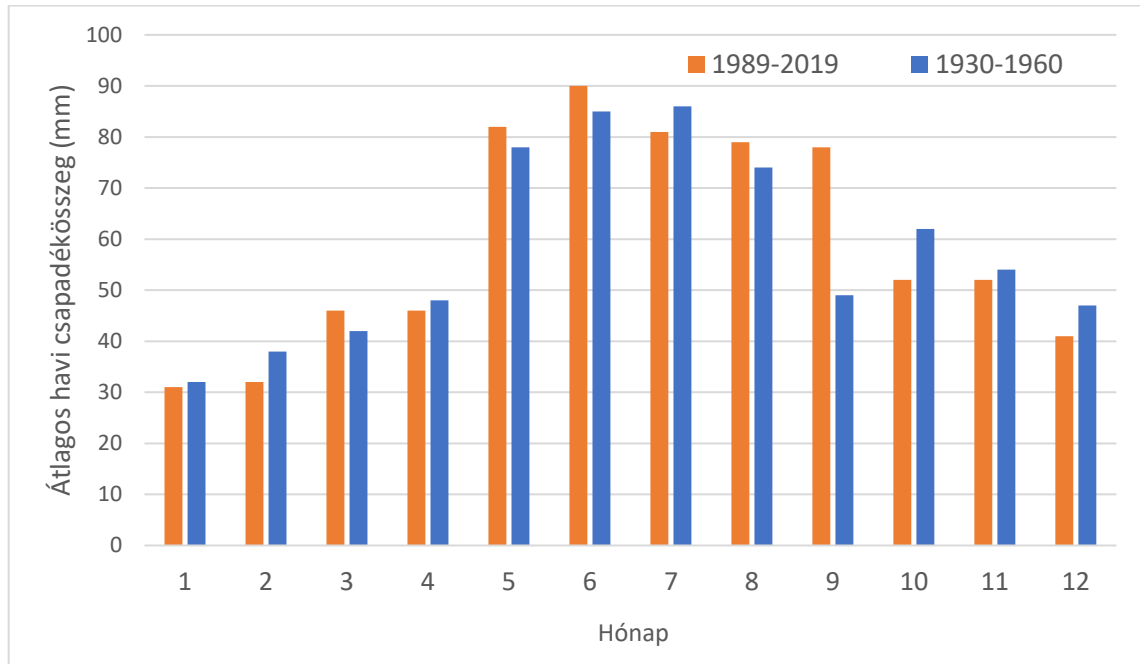
7. ábra Botanikus kert 1930-1960 évi csapadékösszegeinek (kék) és évi átlaghőmérsékleteinek (narancssárga) alakulása



8. ábra Botanikus kert 1989-2019 évi csapadékösszegeinek (kék) és évi átlaghőmérsékleteinek (narancssárga) alakulása

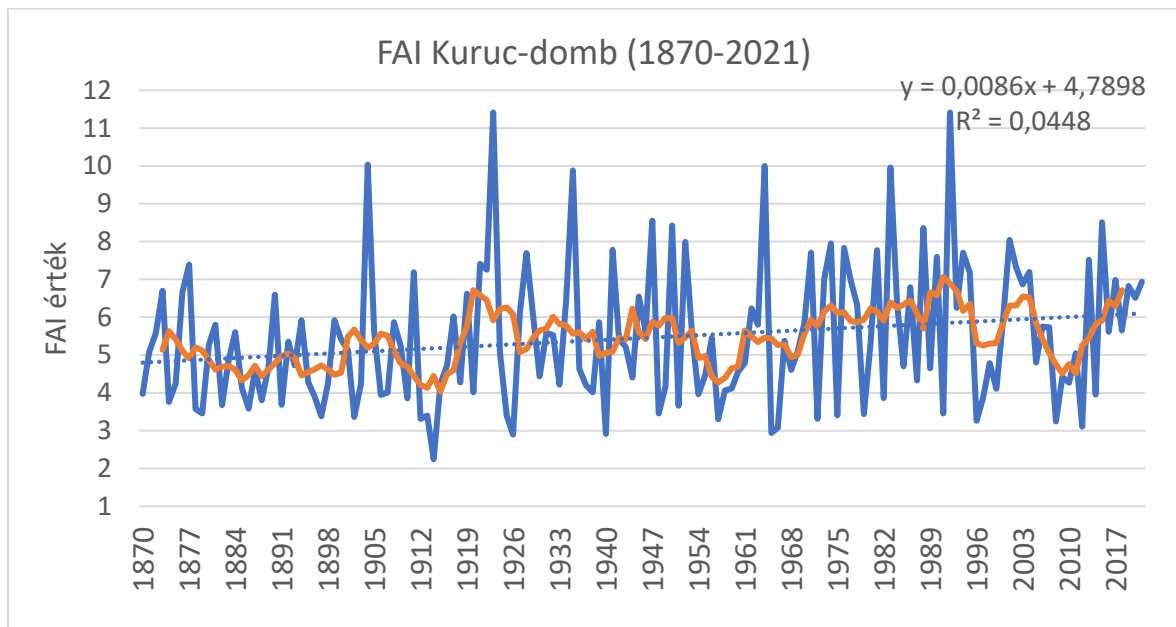
Ezekután a napi adatokat R program segítségével kumuláltam havi csapadékösszegekre és havi hőmérséklet átlagokra. A csapadékösszegeknél megfigyelhetünk az 1930-1960-as időszakban egy második csapadékcsúcsot októberben, azonban ez az őszi csúcs a jelenlegi 30 évben már eltűnt. A legcsapadékosabb őszi hónapnak a szeptember bizonyult (majdnem

30%-os emelkedés). Ennek erdészeti jelentősége, hogy kitolódhat a vegetációs időszak szeptember végéig.

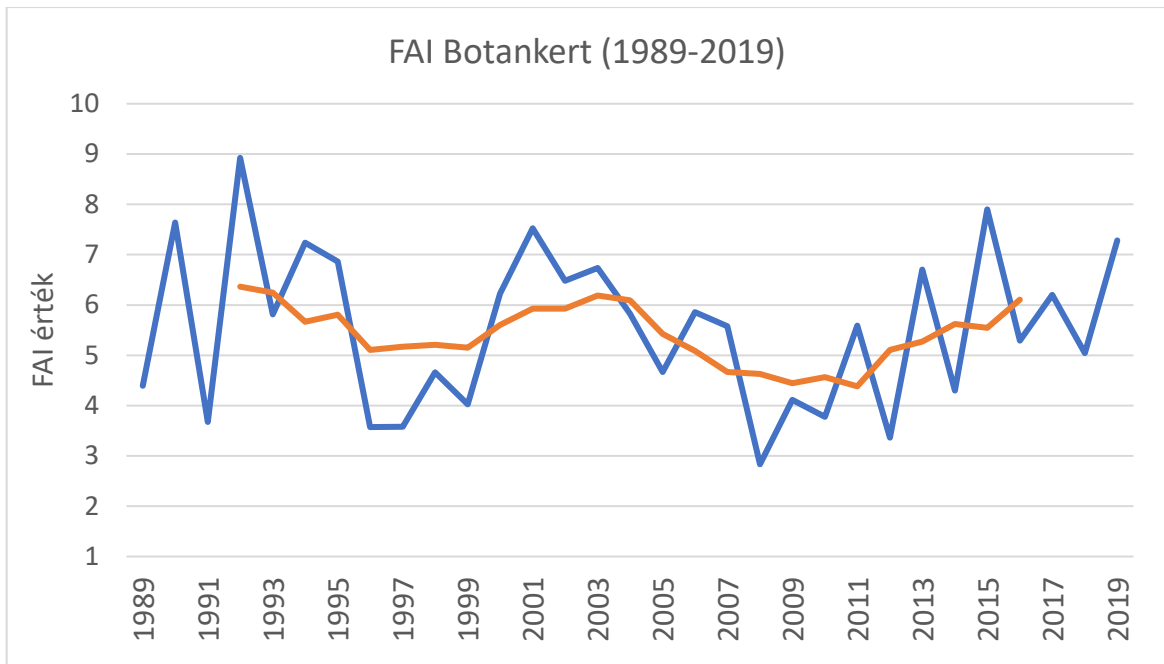


9. ábra Az átlagos havi csapadékösszeg eloszlások összehasonlítása

A havi csapadékösszegek és havi hőmérséklet átlagok segítségével kiszámoltam évenként a FAI (erdészeti szárazsági index) értékeket a Kuruc-dombra és a Botanikus kert két db 30 éves periódusára.

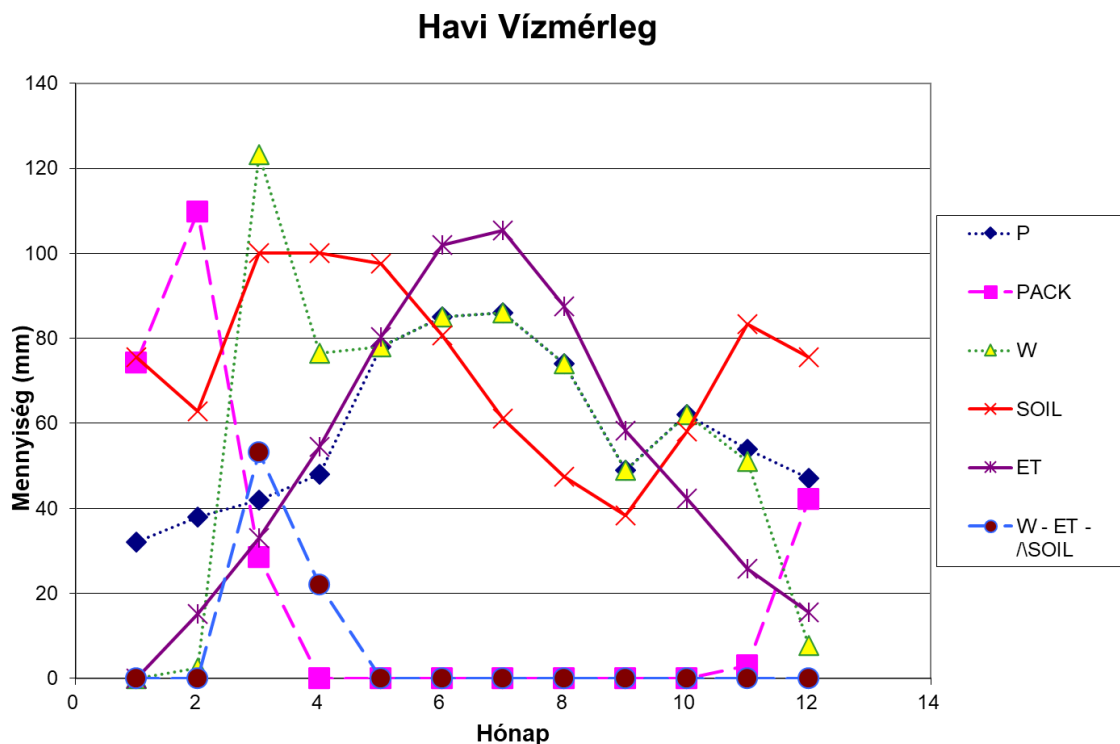


10. ábra A Kuruc-domb éves FAI értékei 1870-2021 között (kék vonal), az erre illesztett trendvonal (pontozott vonal), és a 7 éves mozgóátlag (narancssárga vonal)

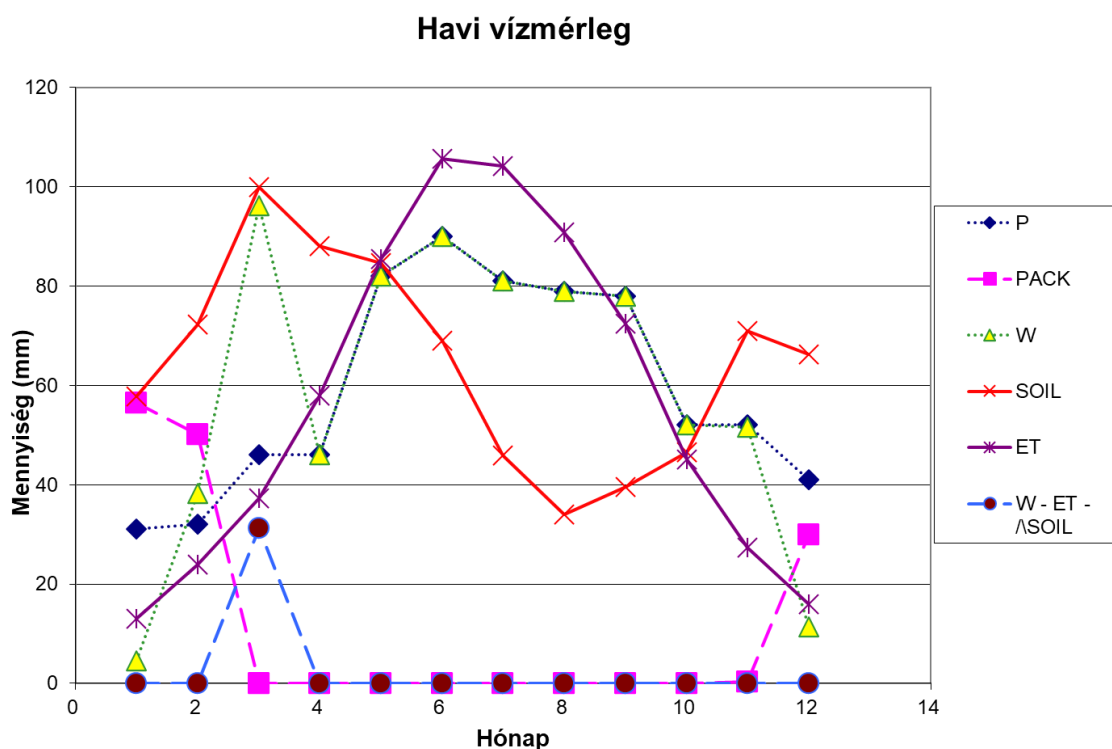


11. ábra A Botanikus kert éves FAI értékei 1989-2019 között (kék vonal) és a 7 éves mozgóátlag (narancssárga vonal)

Végül a Thornthwaite-féle havi vízmérleg modell felhasználásával elemeztem a Botanikus kert talajának vízháztartásában bekövetkezett változásokat. A vízmérleg modell átfogó képet ad havi bontásban a vízbevitelről (W), a hó raktározásáról (PACK), a növények számára felvehető talajnedvességről (SOIL), az evapotranspirációról (ET), és a víz elérhetőségéről a talajvíz visszatöltődéséhez és a lefolyáshoz (W-ET-ΔSOIL).



12. ábra A Thornthwaite-modell 1930-1960-ra lefuttatva



13. ábra A Thornthwaite-modell 1989-2019-re lefuttatva

3. táblázat A lefolyás összetevőinek alakulása

	W	ET	W-ET-ΔSOIL
1930-1960	695	620	75
1989-2019	710	679	31
Eltérés mm-ben	-15	-59	44
Eltérés %-ban	+2,2%	+9,5%	-58,7%

Következtetések

A tanulmány a Sopronban található Botanikus kerti meteorológiai állomás adatainak feldolgozására és elemzésére fókuszál. Az állomás eddig még nem digitalizált adataiból alkottam adatbázis és a különböző adathibákat (amikre lehetőség volt) javítottam. Így létrejött egy, a jövőben sokrétűen felhasználható adatbázis. A munka elsősorban a hőmérséklet és a csapadék adatokon alapszik. A klímaváltozás hatásainak megfigyelésére összehasonlítottam a Botanikus kerti állomás egy régebbi és egy jelenhez közelebb álló 30 éves időszakát. (1930-tól 1960-ig és 1989-től 2019-ig) A hőmérséklet eredmények alapján az elmúlt 30 év drasztikus hőmérsékletemelkedést mutat, 30 év alatt 1,68°C-os növekedést, míg 1930-1960 között nem volt tapasztalható szignifikáns változás. A csapadékok eloszlásában is eltérések mutatkoztak. A 20 mm feletti csapadékok száma és mennyisége is megnövekedett az elmúlt időszakra, ezzel szemben a kisebb csapadékok (1-5 mm) mennyisége csökkent. Célszerű figyelembe venni viszont, hogy az erdeinknek nem feltétlen ezek a hirtelen, heves esők az előnyösek, mivel ebből csak több felszíni lefolyás keletkezik és nem tud hasznosulni minden víz, ellenben a hosszabb lefolyású csendes esőkkel vagy hóval. Az erdészeti aszályossági indexel (FAI) is megvizsgáltam a Kuruc dombi és a Botanikus kerti adatokat. A Kuruc domb 150 éves adatsora alapján Sopron térsége egy klímakategóriát változott, mostanra a gyertyános tölgyes és kocsánytalan tölgyes klíma

határára került. A Botanikus kerti FAI is növekvő tendenciát mutat. Végezetül a Thornthwaite-féle havi vízmérlegmodellel elemeztem a két 30 éves időszakot a Botanikus kert adatain. Az eredmények azt mutatják, hogy a vízmérleg elemeinek legnagyobb változása a lefolyási és visszatöltődési potenciálban volt, 58,7%-os csökkenéssel, ezt követte a hóraktározás 46,8%-os csökkenéssel, a talajnedvességkészlet 12%-os csökkenéssel, a párolgás 9,5%-os növekedéssel, végül a vízbevitel 2,2%-os csökkenéssel. A hőmérséklet és csapadék ilyen mértékű változása egyre növekvő problémákat jelent a mind a földhasználat mind az erőgazdálkodás területén. Ezért fontos hangsúlyozni a lokális vizsgálatok fontosságát, hogy a beavatkozások a helyi erdőgazdálkodást segítsék elő (pl. aszálytűrőbb fajok, vízmegtartás és ellenállóképesség növelése).

Köszönetnyilvánítás

A Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-23-2-III-SOE-176 Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

Jelen munka a 143972SNN azonosítószámú OTKA pályázat és a TKP2021-NKTA-43 számú projekt támogatásával valósult meg. „A TKP2021-NKTA-43 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NKTA pályázati program finanszírozásában valósult meg.”

Irodalomjegyzék

- BOLLA B. – SZABÓ A. (2019): A NAIK-ERTI hidrometeorológiai monitoring rendszerének kezdeti eredményei a 2019. évi mérések alapján, Erdészettudományi Közlemények, 10 (1): 41–54. <https://doi.org/10.17164/EK.2020.004>
- CSÁKI P. (2020): A klímaváltozás hatása a vízkészletekre a felszínborítás figyelembevételével, Doktori (PhD.) értekezés, Sopron, 122.
- FÜHRER E. (2010): A fák növekedése és a klíma. „KLÍMA-21” Füzetek 61: 98–107. oldal
- GRIBOVSZKI Z. – KUCSARA M. (2023): Erdő és víz – Erdészeti vízgazdálkodás, OEE Szaktudás Füzetek 3., a 161 éves Erdészeti Lapok tematikus különszáma, Országos Erdészeti Egyesület, Budapest.
- GÜNTHER F. (1903): Az erdészeti kísérleti állomásokon 1902. évben gyűjtött meteorológiai adatok. Erdészeti Kutatások, 5: 38–41.
- PÖDÖR J. (1985): A soproni meteorológiai mérések története, Sopron
- SEVRUK B. (1982): Methods of correction for systematic error in point precipitation measurement for operational use, Secretariat of the World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 91.
- SENTIMREY T. (1989): A lineáris analitikus trendvizsgálat néhány elvi-módszertani kérdése, Időjárás, 2-3., 151-156.
- THORNTHWAITE, C.W. – MATHER, J.R. (1955): The water balance, Publications in Climatology, Centerton.

Jankó Sándor szobra a soproni Botanikus Kertben

Kutas László alkotása



A képet készítette: Herceg András

