

Talajnedvesség és UAV adatok közötti összefüggések

Szabó Andrea¹ - Budayné Bódi Erika¹ - Ademola Blessing² - Kun Sándor¹ - Tamás János¹ - Nagy Attila¹

¹Debreceni Egyetem, Mezőgazdaság, Élelmiszertudományi- és Környezetgazdálkodási Kar, Víz- és Környezetgazdálkodási Intézet, Víz tudományi és Környezetinformatikai Tanszék, 4032 Debrecen, Böszörményi út 138.

²Division of Plant Science and Technology, University of Missouri, Columbia, MO 65211, USA

Kivonat

Ez a tanulmány a precíziós mezőgazdaság gyakorlati alkalmazását vizsgálja egy kukoricatermesztő területen Nyírbátorban. A kutatás fókuszában a talajhőmérséklet, a talajnedvesség dinamikája és az öntözés hatása áll, hogy feltérképezze a talajérzékelők és a pilóta nélküli légi járművek (UAV) által gyűjtött adatok közötti összefüggéseket, különös tekintettel az NDVI és a hőképek kapcsolatára. Az eredmények alapján a csapadék vagy öntözési események hatására hullámzó nedvességszintek jelentek meg a felszín közelében. Ezzel szemben az öntözetlen területen a talajnedvesség adatok ellentétes képet mutattak, mely összhangban van az egyidejűleg megfigyelt alacsony NDVI értékekkel. Az öntözött területen általában magasabb NDVI értékek voltak megfigyelhetőek. Öntözési és csapadékos időszakban a hőmérsékleti értékek következetes csökkenése figyelhető meg.

Kulcsszavak: UAV, NDVI, talajnedvesség, talajhőmérséklet

BEVEZETÉS

Az emberi népesség globális növekedése egyedülálló keresletet teremtett a mezőgazdasági szektorokban, ami miatt az élelmiszertermelés növelése világszerte szükségsszerűvé vált (FAO, 2017). A mezőgazdasági ágazat igyekszik kielégíteni ezt a növekvő keresletet, az éghajlatváltozás dinamikus kihívásával párhuzamosan. Az éghajlatváltozás jelentős változásokat okozott a hőmérsékleti mintázatokban, ami kiszámíthatatlanná teszi a csapadékeseményeket, és az aszályos időszakok megjelenését (Field et al., 2014). Ezek az éghajlati rendellenességek hatással vannak a mezőgazdaság alapvető elemeire, beleértve az időjárási mintákat, a hőmérsékletet, a csapadékot és a termesztés körülményeit (Rosenzweig et al., 2014). Ezeknek a változásoknak a következményei olyan innovatív megoldásokat követelnek, amelyek biztosítják az élelmezésbiztonságot és a környezeti fenntarthatóságot (Tilman et al., 2011). Ebben az összefüggésben hangsúlyt kell fektetni a talajnedvesség és a talajhőmérséklet jelentőségére. Ezen tényezők alakulása szerepet játszanak a növények növekedésében és a terméshozam alakulásában (Daniel et al., 2022). Stevens és Madani (2016) tanulmányukban kimutatták, hogy a növekvő hőmérséklet nagyobb párolgáshoz és a talaj nedvességtartalmának csökkenéséhez vezet, ami kedvezőtlenül befolyásolja a kukorica növekedését. Emellett a lehülési hőmérséklet olyan jelentős abiotikus stressztényezőt jelent, amely negatívan befolyásolja a kukorica növekedését, csökkentve ezzel a terméshozamot. A kukorica (*Zea mays*) a világ egyik legfontosabb alpnövényei közé tartozik, amely a globális élelmezésbiztonság és gazdasági stabilitás alapja. Termését nagymértékben befolyásolják olyan környezeti tényezők, mint a talajnedvesség és a hőmérséklet alakulása (Xu et al., 2016). E tényezők és a kukorica terméshozama közötti kapcsolat megértése alapvető fontosságú a mezőgazdasági gyakorlatok optimalizálásához és a fenntartható élelmiszertermelés biztosításához. Magyarországon Mohammed et al. (2022) közelmúltbeli kutatása rávilágít a múltbeli aszályos események káros hatásaira és a 2. fenntartható fejlődési cél (SDG 2) elérését fenyegető potenciális veszélyeire. Magyar et al. (2023) kutatásukban bemutatták, hogy a Magyarországon rendelkezésre álló csapadékmennyiség nem biztosítja a

kukoricatermesztéshez szükséges optimális talajnedvesség szintet. Tekintettel az élelmiszerek, takarmányok és bioenergia iránti növekvő igényekre (Haarhoff et al., 2020; Meng et al., 2016), a kukoricatermesztés optimalizálása, különösen a vízkészletgazdálkodása, egyre nagyobb törekvéssé vált. A precíziós mezőgazdasági technikák olyan paradigmaváltást vezetnek be, amely a legmodernebb technológiákat használja ki a terméshozam, az erőforrás-hatékonyság és a környezeti fenntarthatóság fokozására. Song & Wang (2019) szerint az UAV-k mezőgazdaságban rejlő lehetőségei a termesztési időszak során a termés fejlődésének és egészségének a szántóföldön belüli változékonyságának nyomon követésében rejlő hatékonyságukra összpontosítanak. Az NDVI és a hőkamerás képalkotás kulcsfontosságú eszközök a termés egészségének és a stressznek a felmérésére, ezáltal széles körben alkalmazzák a mezőgazdasági gyakorlatban is. Az NDVI, amely a közeli infravörös (NIR) és a vörös fényvisszaverődés különbségét méri, betekintést nyújt a növényzet sűrűségébe. A hőkamerás képalkotás a tárgyak hőmérsékletét méri, beleértve a növények hőmérsékletét is, így feltárja a stresszt vagy a fiziológiai változásokat. Az UAV NDVI- és hőképképző technológiák integrálása a precíziós mezőgazdaságba sokféleképpen alkalmazható, a termésfigyeléstől a terméshozam előrejelzésen át a vízgazdálkodásig.

ANYAG ÉS MÓDSZER

Terület bemutatása

A vizsgált terület Nyírbátor, Magyarország észak-alföldi részén, a Pannon régióban található (Long: 22,167; Lat: 47,802). Mérsékelt meleg és enyhe hideg éghajlati övezetbe tartozik. A terület nitrátéztelen, geológiai szempontból egy alluviális kúp-síkság, amelyet főként futóhomok lerakódások borítanak. A talajösszetétel túlnyomórészt homokos vályogból áll, a mélyebb rétegekben néhány foltban agyagos talajjal. A talajvízszint 1-3 méterrel a felszín alatt található. A térségben az aktív vízhalózat korlátozott. A területet aszályos időszakok jellemzik, különösen júliusban és augusztusban. Az esettanulmány helyszíne 16 hektáros kukorica szántóterület, melyet egy átfordulós lineár öntözőrendszerrel öntöznek. A kutatást egy öntözött és nem öntözött részeket magában foglaló szántóterületen végeztük. Az A, B és C jelzésű talajszenzorok az öntözött területen belül lettek elhelyezve. A D jelű talajszenzort pedig az öntözetlen területen helyeztük el (1. ábra).



1. ábra: Terület és talajszenzorok elhelyezkedése

A kukorica termesztési időszaka 2022. április 19-től 2022. augusztus 23-ig tartott. A kukorica BBCH-skáláját a szántóföldi megfigyelés, a magassági adatok és a szakirodalmi tanulmányok

alapján határoztuk meg, a kategorizálást 1-8-as számskálával skáláztuk át (1 = csírázás; 2 = levélfejlődés; 3 = szárnynyúlás; 4 = virágzat megjelenése; 5 = virágzás, antézis; 6 = termésfejlődés; 7 = érés; 8 = szenescencia). Az öntözési ütemtervet és a BBCH skálát az 1. táblázat részletezi. A kutatáshoz szükséges meteorológiai adatokat a vizsgált területen kihelyezett DAVIS meteorológiai állomásról gyűjtöttük (hőmérséklet, párolgás, páratartalom, szélsébség, csapadék).

Időpont	BBCH	Kijutatott öntözővíz mennyisége (mm)
2022. május 14.	2	10
2022. június 6.	3	20
2022. június 13.	3	20
2022. június 22.	3	25
2022. június 25.	3	20
2022. június 28.	3	20
2022. július 1.	3	20
2022. július 5.	3	10

1. táblázat: BBCH skála és öntözési ütemterv

Talajszonda kihelyezése és adatok feldolgozása

A Stevens Hydra szonda egy széles körben használt érzékelő a talaj hőmérsékletének és nedvességének mérésére. Kalibrálás során a kutatáshoz az "általánosnak" nevezett alapértelmezett gyári kalibrációt használtuk, amely a legtöbb talajtípushoz alkalmas. Telepítés során a talajérzékelő telepítése a kukorica 2022-es vetése után 56 nappal történt. A talajszonda szenzorai három mélységben (10, 30 és 70 cm) lettek kihelyezve. Az adatgyűjtő loggert 1 órás adatok felvételezésére állítottuk be, az adatokat a GPReader mobilalkalmazás Bluetooth kommunikációs protokollon keresztül töltöttük le az állomásról.



2. ábra: Talajszenzorok kihelyezése 3 mélységben

A képi adatgyűjtés során speciális érzékelőberendezésekkel ellátott pilóta nélküli légi járműveket (UAV) használtunk. Az NDVI felvételek készítéséhez egy Sentra Double 4K TrueNDVI-al felszerelt DJI Mavic 2 Zoom UAV-t alkalmaztunk az RGB adatok és a NIR adatok gyűjtésére az NDVI indexek méréséhez. A hőkamerás felvételek elkészítéséhez egy DJI Matrice 300RTK-t alkalmaztunk, mely egy DJI Zenmuse H20T hőkamerát tartalmazott. A mérés célja a

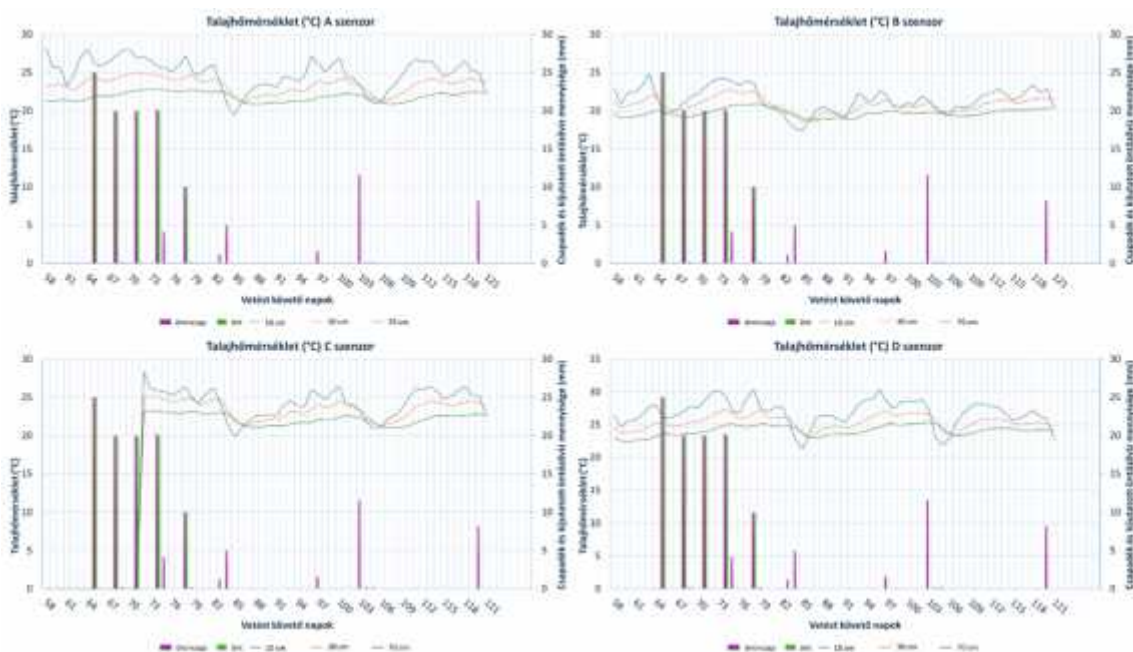
hőképi adatok felvétele, amelyek lehetővé tették a kukoricaföldön lévő érzékelőpontok hőmérséklet változásainak vizualizálását, különös tekintettel az öntözött és az öntözetlen területek közötti különbségek megfigyelésére és megkülönböztetésére. A UAV felvételeket 2022-ben május 19-én, május 30-án, június 15-én, június 28-án, július 13-án, július 25-én, augusztus 12-én és augusztus 17-én végeztük el. A felvett képeket a Pix4D alkalmazással dolgoztuk fel, majd további elemzés céljából az ESRI ArcGIS Pro környezetbe integráltuk. Az ESRI ArcGIS Model Builder eszközzel kiszámítottuk a zónák összesített statisztikáit, és az eredményeket Excel-fájlként exportáltuk.

EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

Talajszenzor adatok eredményei

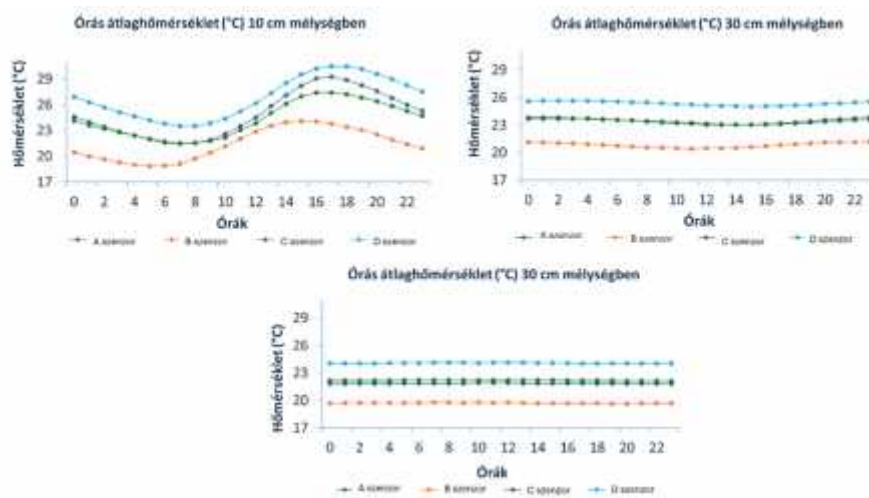
Talajhőmérsékleti adatok

A hőmérsékleti adatok minden érzékelő esetében a mélységtől függő jellegzetességeket mutattak. A 10 cm-es mélységben nagyobb hőmérséklet ingadozás figyelhető meg, ami hangsúlyozza a felszíni hőmérséklet környezeti feltételekre való érzékenységét. A hőmérséklet fokozatos csökkenése figyelhető meg a mélység növekedésével, ami a talaj tulajdonságainak a hővisszatartásra és -leadásra gyakorolt hatását mutatja. Két különböző alkalommal, megfigyelhető volt, hogy az A szenzoron mért talajhőmérséklet a 10 cm-es mélységben a 30 cm-es, illetve a 70 cm-es mélységben mért hőmérséklet alá süllyedt. A meteorológiai adatok alapján megfigyelhető, hogy csapadék előzte meg az adott mérési időpontokat. Ezen kívül a napi maximális hőmérséklet csökkent, amit a napi átlagos szélsőérték növekedése kísért. Ez a mintázat a B, C & D pontok hőmérsékleti adataiban is visszatérő összefüggést mutatott, amikor a 10 cm-es mélységben a hőmérséklet alacsonyabb volt, mint a 30 cm-es és 70 cm-es mélységben. Ez a megfigyelés a környezeti tényezők és a talajhőmérséklet különböző mélységekben történő változása közötti kölcsönhatást mutatja és támasztja alá (3. ábra).



3. ábra: Talajhőmérséklet értékek 3 mélységben

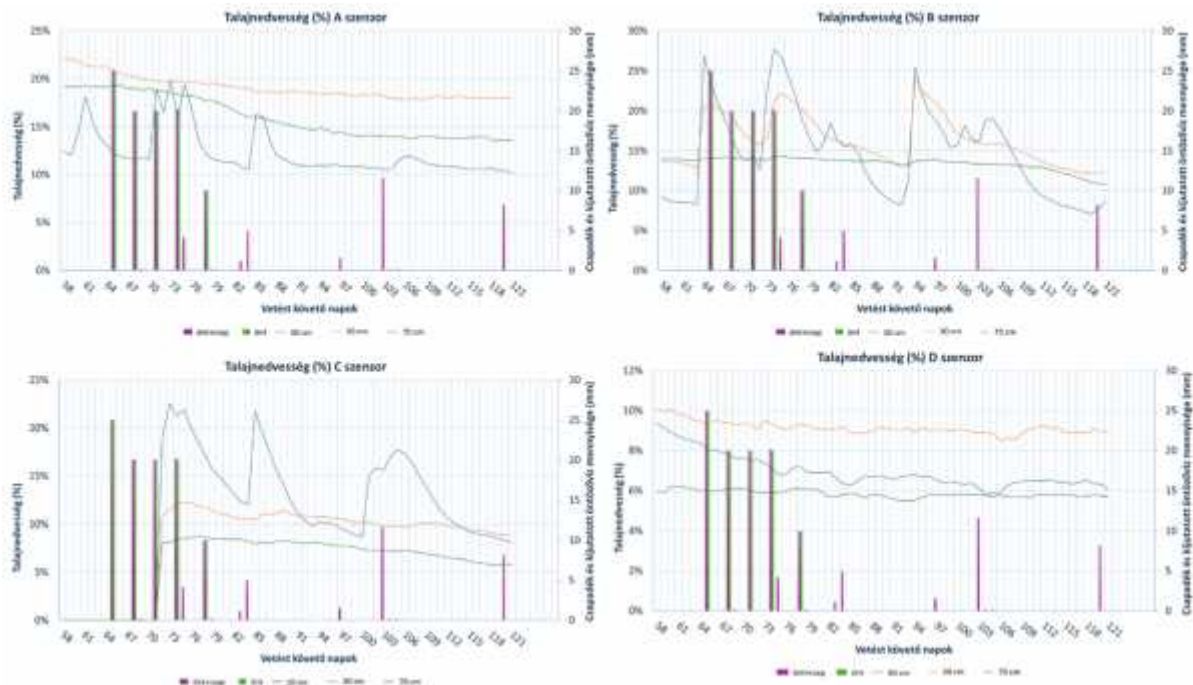
A talajhőmérséklet óránkénti ingadozása az összes érzékelőnél megfigyelhető volt a növénytermesztési ciklus teljes adatgyűjtési időszakában, mind az öntözött, mind az öntözetlen zónában. A hőmérséklet a sekélyebb mélységben (10 cm) jelentősen nagyobb ingadozást mutatott. Ezzel szemben ezek az ingadozások a 30 cm-es és 70 cm-es mélység növekedésével egyre kevésbé voltak jellemzőek. A 10 cm-es mélységben a legjelentősebb hőmérséklet ingadozások napközben jelentkeztek. A legkisebb és legnagyobb csúcstértékeket (az A, B és D érzékelő esetében) 06:00-09:00 és 15:00-19:00 között volt megfigyelhető, míg a B érzékelő esetében ezek a szélsőértékek 04:00-8:00 és 13:00-17:00 között voltak. A 30 és 70 cm-es mélységben a talajhőmérséklet ingadozások tendenciaszerűen kiegyenlítődtek. Az öntözetlen területen magasabb hőmérsékletet lehetett megfigyelni, ehhez képest az öntözött B érzékelőpontra alacsonyabb hőmérsékletet mutattak az öntözött A és C érzékelőpontokhoz képest (4. ábra).



4. ábra: Órás talajhőmérséklet alakulások

Talajnedvesség adatok

A talajnedvesség adatok a csapadék vagy az öntözési események hatására a felszín közelében (10 cm mélységben) következetesen hullámzó nedvességszintekkel jelentek meg. A görbék ingadozása a mélység növekedésével csökken. Az öntözött területen belüli nedvességgörbék közelebbi vizsgálata, különösen az A, B és C pontoknál, a B pontnál eltérő talajjellemzőket mutat, ahol a talajnedvesség 30 cm mélységben nagyobb ingadozás figyelhető meg, mint a többi öntözött ponton. A talaj nedvességtartalmának a B pontnál megfigyelt változása gyors vízbeszivárgási sebességre utal, ami nagyobb pórustér jelenlétét támasztja alá. Ez jellemző a homokos talajok esetében, mely befolyásolja a víz eloszlását a kritikus gyökérszónán belül. Ezzel szemben a nem öntözött területen lévő D pont talajnedvesség adatai ellentétes képet mutattak a többi ponthoz képest. Az összes mélységi szinten egy következetesebb lineáris gradienst mutat, ami a talajban uralkodó hosszán tartó aszályos körülményeket tükrözi. Ez a megfigyelés összhangban van az ugyanebben a zónában egyidejűleg megfigyelt alacsony NDVI értékekkel (5. ábra).



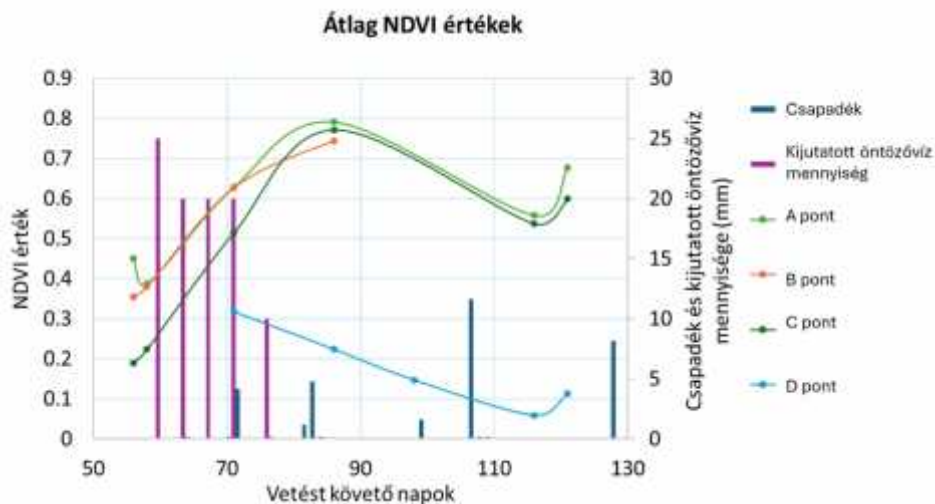
5. ábra: Talajnedvesség értékek 3 mélységben

A talajnedvesség mélységtől függő ábrázolása a talajprofilban megmutatja az öntözött és az öntözetlen területek közötti különbségeket, illetve az öntözés hatását a talaj nedvességtartalmára. I.) A öntözött terület: 10 cm mélységben a nedvességtartalom 10% és 19% között változott, míg 30 cm mélységben 17,5% és 22% között változott. A 70 cm-es mélységben 13,6% és 19% között változott. Ezek az értékek stabilabb és magasabb nedvességtartalomra utalnak, ami megfelel a hatékony öntözési gyakorlatnak. II) B öntözött terület: 10 cm mélységben a nedvességértékek az egyes időpontokban 8,6 % és 17,6 % között változtak. A 30 cm-es mélységben 12,3% és 20% között, a 70 cm-es mélységben pedig 10,7% és 13,7% között változtak. A B pont stabil nedvességszinteket mutatott, de az A pontnál valamivel alacsonyabb értékeket, ami az öntözés alkalmazásában vagy a talaj jellemzőiben bekövetkező esetleges eltérésekre utal. III) C öntözött terület: 10 cm mélységben a nedvességtartalom 8% és 19% között változott. A 30 cm-es mélységben 7% és 12% között változott, 70 cm-es mélységben pedig 5% és 8% között. Ezek az eltérések viszonylag egyenes nedvességprofilra utalnak, amely a stabilabb talajnedvességű öntözött területekre jellemző. IV) D nem öntözött terület: Ezzel szemben 10 cm mélységben a nedvességtartalom 6% és 9,4% között változott, ami egyenesen alacsony nedvességtartalomra utal. 30 cm mélységben 8,8% és 10,1% közötti eltérés tapasztalható. A 70 cm-es mélységben az eltérés jelentéktelen, 5,7% és 6,1% között változott. Ez hangsúlyozza a nedvesség megtartásának nehézségét a nem öntözött talajban. Az öntözött és az öntözetlen területek közötti éles kontraszt hangsúlyozza a nem öntözött talajok nedvességmegtartásának kihívásait, és kiemeli az öntözés kritikus szerepét a növények növekedéséhez szükséges megfelelő talajnedvesség fenntartásában.

UAV adatok eredményei

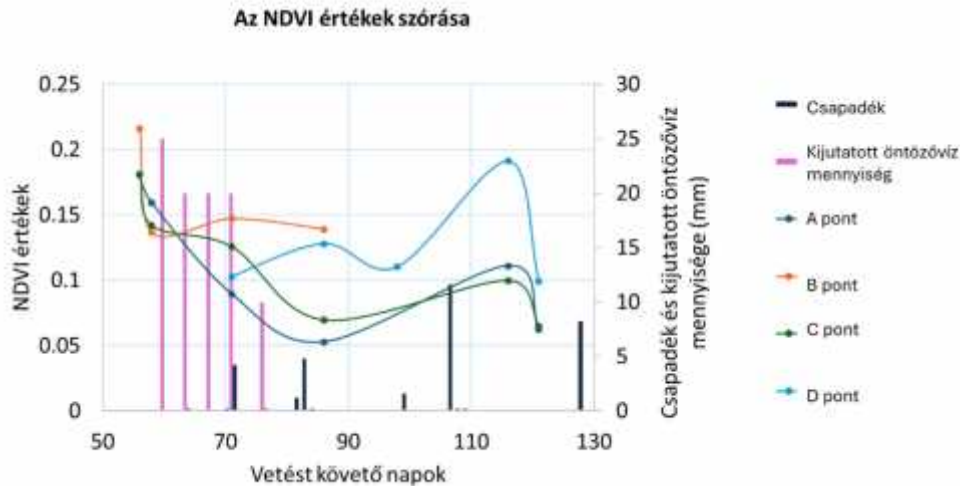
A talajszenzor adatok mellett a talajszenzor adatok elemzéséhez a szenzorpontok középpontjában lévő 25 négyzetméteres területen belül NDVI és hőindexeket figyeltünk meg a vetést követően az 56., 58., 71., 86., 98., 116. és 121. napon. Az elemzéshez használt elsődleges mérőszámok az NDVI- és a hőképekből kinyert átlag- és szórásértékek a kijelölt

zónákon belül. Az öntözött terület általában magasabb átlagos NDVI értékeket mutat, mint az öntöztelen terület. Az öntöztelen terület a vetést követő 71. nap körül érte el a maximális NDVI értékeket, míg az öntözött területeken a vetést követő 80. és 90. nap között volt a legnagyobb NDVI érték megfigyelhető. Az NDVI értékek időbeli eltérése alátámasztja az öntözési gyakorlat pozitív hatását a kukorica szempontjából, különösen a vegetatív növekedési szakaszban, amely egybeesett a régióban tapasztalható szárazsággal (6. ábra).



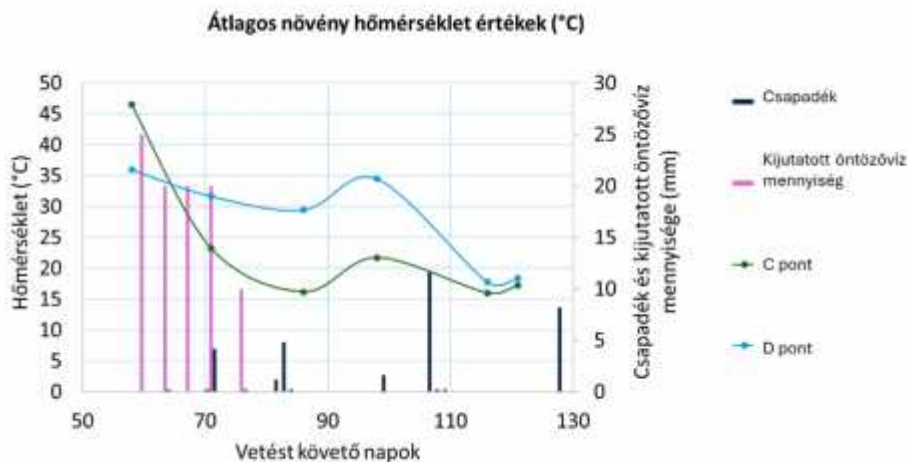
6. ábra: Átlag NDVI értékek

Az NDVI értékek változékonyságát a pontokon belül az NDVI standard eltérés értékeinek megfigyelésével lehet értékelni. Az NDVI standard eltérés értékei az öntözött és az öntöztelen területeken eltérő mintázatot mutattak. Ezek a minták a növények különböző környezeti feltételekre és gazdálkodási gyakorlatokra adott válaszait adják meg. Kezdetben növekvő tendencia rajzolódik ki, mivel az NDVI értékek standard eltérése gyorsan csökken az öntözött területeken. Ez a csökkenés azt jelzi, hogy a növény a növény-növekedés korai szakaszában gyorsan reagál az öntözési eseményekre, ezzel szemben az öntöztelen területen következetesebb mintázat figyelhető meg, kevésbé kifejezett ingadozásokkal az alacsony csapadékmennyiség miatt. Idővel az öntözött területeken a standard eltérés értékei alacsonyabb szinten maradnak, ami a növényzet stabilabb és egyenletesebb reakcióját mutatja. Ezzel szemben az öntöztelen területen a vegetációs időszak későbbi szakaszaiban is magasabbak a standard eltérés értékei. Ez az eltérés alátámasztja a vegetáció egészségi állapotának jelentős változékonyságát az öntöztelen területen belül. A diagramon a standard eltérési értékek csúcspontjai láthatók, különösen az öntöztelen területen. Ezek a csúcsok megfelelnek a növényzet fokozott stresszes időszakainak. Az öntöztelen terület, amelyet a magasabb szórásértékek jellemeznek, érzékenyebbnek tűnik a stresszes időszakokra (7. ábra).



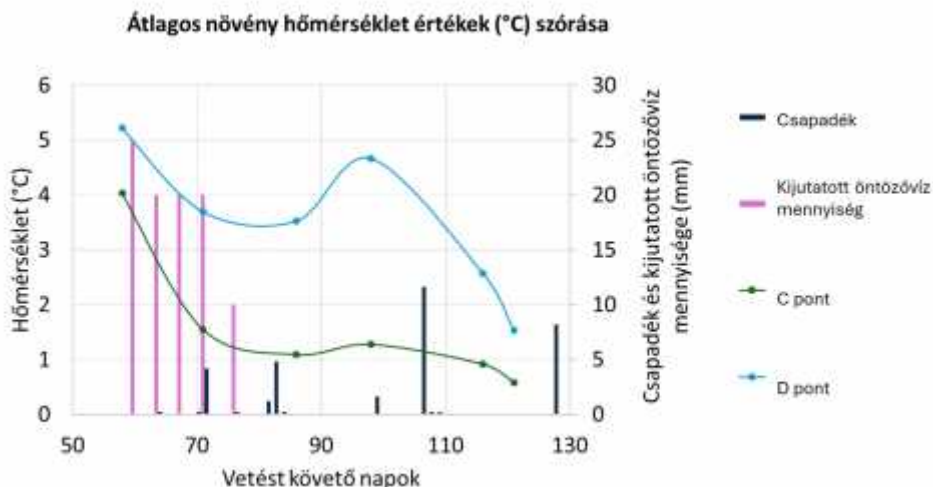
7. ábra: Az NDVI értékek szórása

A hőkamerás felvételek adatai során a C és D pontokat magában foglaló területeken megfigyelhető a növényzet átlagos hőmérsékletének tendenciáiba a körülhatárolt pontok. Az öntözési és csapadékos időszakban a hőmérséklet értékek következetes csökkenése figyelhető meg. Az öntözött területeken a növényzet hőmérséklete határozottan csökken, ami a vízhasználat hűsítő hatását tükrözi. Ezzel szemben a nem öntözött területeken a hőmérséklet értékek folyamatosan emelkednek, ami az elégtelen vízellátásból eredő jelentősebb vegetatív stresszre utal. Ez az ellentét mutatja a vegetatív stressz különbségét az öntözött és az öntözetlen területek között. Az adatok azt mutatják, hogy az öntözött területek következetesen felülmúlták az öntözetlen területeket a vegetáció egészségi állapota szempontjából. Ezek az eredmények további alátámasztása az öntözés fontosságának a környezeti kihívások hatásainak enyhítésében, valamint az egészséges és termőképes kukoricatermés biztosításában (8. ábra).



8. ábra: Átlag hőmérséklet értékek

A 9. ábrán megfigyelhető, hogy, az átlagértéktől való hőmérséklet eltérések hasonló csökkenő tendenciát mutattak a korábbi megfigyelési időszakban, a gyakoribb öntözési és csapadékeseményekkel. Az öntözetlen terület azonban magasabb eltérési értékeket mutatott, ami tovább erősíti a magasabb hőmérséklet változásokat ebben a zónában az öntözött terület egyenletesebb hőmérsékleti értékeihez képest, ami az idősoros adatok során rögzített alacsonyabb eltérési értékeken keresztül látható (9. ábra).



9. ábra: Átlagos növény hőmérséklet értékek szórása

Az UAV által levezetett lombkorona hőértékek és NDVI-értékek alapján végzett elemzés hangsúlyozza az öntözési gyakorlatok hatékonyságát a vegetációs stressz és a hőmérséklet-változékonyság csökkentésében. Az öntözött területeken megfigyelt konzisztens és alacsonyabb standard eltérési értékek az ellenőrzött hőmérsékleti stabilitásra és a növények környezeti körülményekre adott rugalmasabb reakciójára utalnak. Ezzel szemben az öntözetlen terület magasabb szórásértékei és az elhúzódó stresszesemények hangsúlyozzák a kizárólag a természetes csapadékra való hagyatkozással járó kihívásokat az aszályos körülményekre hajlamos területeken.

KONKLÚZIÓ

A kutatást Nyírbátorban egy kukoricatermő területen végeztük el, ahol talajszenzorok és UAV adatokkal vizsgáltuk a talajhőmérsékletet, talajnedvességet, az öntözési gyakorlat és az éghajlat hatását a kukorica különböző vegetációs szakaszaira. Célunk volt, hogy megértsük a változások hatását a kukorica egészségi állapotára, valamint, hogy összehasonlítsuk a talajszenzorok és az UAV felvételekből származó adatok közötti korrelációkat. A talajszenzorok által kapott adatok segítségével javíthatóak a vízkészlet-gazdálkodási gyakorlatok, amelyek növelhetik a növények egészségét és hozamát. Az elemzett adatok hasznos információt nyújtottak a talajnedvesség és hőmérséklet dinamikájába. A talajhőmérséklet és talajnedvesség átfogó elemzése segít megérteni ezeknek a tényezőknek a szerepét a kukoricatermesztésben és az öntözési gyakorlat hatását a termésre. A magasabb talajnedvességszintek pozitívan befolyásolták az öntözött területek növényzetét, míg a nem öntözött területeken az alacsony talajnedvesség korai termést eredményezett. Az UAV-ból származó adatok, mint az NDVI és hőképek, lehetőséget nyújtottak a növények egészségének és az öntözési gyakorlatok nyomon követésére mind az öntözött, mind a nem öntözött

területeken. Az eredmények alapján a talajszenzorok és az UAV alapú távérzékelési információk fontosak a precíziós mezőgazdaságban a talaj-víz dinamikájának, a termés egészségének és az erőforrások hatékonyabb felhasználásának megértéséhez.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást a TKP2021-NKTA-32 projekt finanszírozta. Projekt sz. TKP2021-NKTA-32 projekt a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap támogatásával valósult meg, a TKP2021-NKTA támogatási rendszer keretében finanszírozva. A kutatás a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj támogatásával készült.

IRODALOMJEGYZÉK

Daniel, D. F.- Dallacort, R.- Barbieri, J. D.- Modolo, A. J.- de Carvalho, M. A. C.- Tieppo, R. C.- Yamashita, O. M. (2022). Crotalaria Sowing Times Intercropped with Off-Season Maize in the Variability of Soil Temperature and Moisture. *Journal of Agricultural Studies*, 10(3), 126–151.

FAO. (2017). The future of food and agriculture: Trends and challenges. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Field, C. B.- Barros, V. R.- Dokken, D. J.- Mach, K. J.- Mastrandrea, M. D.- Bilir, T. E.- Chatterjee, M.- Ebi, K. L.- Estrada, Y. O.- Genova, R. C.- Girma, B.- Kissel, E. S.- Levy, A. N.- MacCracken, S.- Mastrandrea, P. R.- White, L. L. (2014). Climate change 2014 impacts, adaptation and vulnerability: Part A: Global and sectoral aspects: Working group II contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change 1131

Haarhoff, S. J.- Kotzé, T. N.- Swanepoel, P. A. (2020). A prospectus for sustainability of rainfed maize production systems in South Africa. *Crop Science*, 60(1), 14– 28.

Magyar, T.- Fehér, Z.- Buday-Bódi, E.- Tamás, J.- Nagy, A. (2023). Modeling of soil moisture and water fluxes in a maize field for the optimization of irrigation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 213, 108159.

Meng, Q.- Chen, X.- Lobell, D. B.- Cui, Z.- Zhang, Y.- Yang, H.- Zhang, F. (2016). Growing sensitivity of maize to water scarcity under climate change. *Scientific Reports*, 6(1), 19605.

Mohammed, S.- Alsafadi, K.- Enaruvbe, G. O.- Bashir, B.- Elbeltagi, A.- Széles, A.- Alsalman, A.- Harsanyi, E. (2022). Assessing the impacts of agricultural drought (SPI/SPEI) on maize and wheat yields across Hungary. *Scientific Reports*, 12(1), Article 1.

Rosenzweig, C.- Elliott, J.- Deryng, D.- Ruane, A. C.- Müller, C.- Arneth, A.- Boote, K. J.- Folberth, C.- Glotter, M.- Khabarov, N. (2014). Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3268–3273.

Song, Y.- Wang, J. (2019). Winter wheat canopy height extraction from UAV-based point cloud data with a moving cuboid filter. *Remote Sensing*, 11(10), 1239.

Stevens T- Madani K. Future climate impacts on maize farming and food security in Malawi. Sci Rep. 2016 Nov 8;6:36241. doi: 10.1038/srep36241. PMID: 27824092; PMCID: PMC5099946.

Tilman, D.- Balzer, C.- Hill, J.- Belfort, B. L. (2011). Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(50), 20260–20264.

Xu, H.- Twine, T. E.- Girvetz, E. (2016). Climate change and maize yield in Iowa. *PLoS One*, 11(5), e0156083.