

Fedett periglaciális poligon hálózatok morfometriai vizsgálata Nyugat-Magyarországon

Szerző: Szabadkai Dárus Márk

Témavezető: Dr. Fábán Szabolcs Ákos

Pécs, 2025

Absztrakt

Ez a dolgozat a fedett periglaciális poligonhálózatok morfológiai vizsgálatát mutatja be Nyugat-Magyarország területén, különös tekintettel a Kemeneshát, a Répce-sík és a Kapuvári-sík területeire. A kutatás célja, hogy pontos adatokat gyűjtsön a homokékek által kirajzolt poligonális hálózatokról, és ezek morfológiai jellemzőit statisztikai módszerekkel elemezze. A kutatás során drónfelvételek, műholdképek és digitális magasságmodellek segítségével azonosítottam és digitalizáltam a poligonokat. A vizsgálat kiterjedt a poligonok területének, szögeinek számának, alakjának és topográfiai változóinak elemzésére. Az eredmények szerint a vizsgált területeken az azonosított poligonok többsége öt-hat szögű és a jellemző földtani alap folyóvízi kavics és homokos kavics. A kutatás bemutatja a poligonok és a topográfiai változók közötti összefüggéseket, valamint a klaszterelemzések eredményeit, amelyek alapján a poligonok egy bizonyos hierarchia szint felett több csoportra oszthatók. Az eredmények hozzájárulnak a periglaciális formák és folyamatok jobb megértéséhez, valamint további kutatási irányokat jelölnek ki a Kárpát-medence pleisztocén kori éghajlati viszonyainak feltárásában.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani mindenkinek, aki segítette a dolgozat megszületését. Először is a témavezetőmnek Dr. Fábián Szabolcs Ákosnak, illetve Dr. Varga Gábornak, Farkas Beátának, Balogh Richárdnak és Tombor Bencének, akik a terepi munkában, valamint Dr. Halmai Ákosnak, Dr. Pirkhoffer Ervinnek és Dr. Kiss Kingának, akik a GIS útvesztőiben segítettek. Továbbá az RSD Projekt Kft. és vezetője Szakál-Balogh László, valamint a Szemenye-2 kavicsbánya és vezetője Lohrmann Ervin segítségét is köszönöm, akik lehetővé tették a bányaterületeken a munkát. Végül köszönet a DigitalGlobe Alapítványnak a részletes felbontású műholdfelvételért.

Tartalomjegyzék

Absztrakt.....	2
Köszönetnyilvánítás	2
1. Bevezetés és kutatási háttér	4
2. Anyag és módszer	8
2.1. A vizsgált területek	8
2.2. Felhasznált alapanyagok.....	11
2.3. A vizsgálati módszerek.....	11
3. Eredmények.....	13
3.1. A poligonok azonosítása és morfolometriai jellemzői.....	13
3.2. A poligonok és a topográfiai változók kapcsolata.....	15
3.4. A poligonok klaszterelemzése	17
4. Diskusszió	20
5. Következtetések.....	Hiba! A könyvjelző nem létezik.
6. Hivatkozott irodalmak jegyzéke	22

1. Bevezetés és kutatási háttér

Számos kutatás tett már kísérletet az utolsó permafroszt maximum (Last Permafrost Maximum = LPM) európai kiterjedésének déli lehatárolására, de egyértelmű és mindenki által elfogadott határt eddig még nem sikerült találni. Sőt, jónéhány kutatási eredmény igencsak ellentmond egymásnak (Lindgren et al., 2016; Ruszkiczay-Rüdiger & Kern, 2016; Schweitzer et al., 2015; Vandenberghe & Pissart, 1993). A permafroszt határ definiálásához csak azok a periglaciális jelenségek használhatóak megbízhatóan, amik kialakulásukat tekintve speciális éghajlathoz kötődnek, nagy mennyiségben megtalálhatóak és jó „megőrzési potenciállal” rendelkeznek. A folyamatos permafrosztra többek között a széles körben elterjedt jégékpolygonok jelenléte jellemző. A rendelkezésre álló adatokból kimutatták, hogy két fő folyamatos permafroszt időszak lehetett Európában az utolsó 100 ezer évben. Az első 72–61 ezer, a második 27–17 ezer évvel ezelőtt. Ezek a következtetések az alacsony síksági területekre a tengerszint körüli régiókra értendők (Vandenberghe & Pissart, 1993).

2010-ben az International Permafrost Association (IPA) létrehozott egy munkacsoportot, hogy meghatározzák az LPM alatti permafroszt kiterjedését az északi féltekére vonatkozóan. A kutatásban megkülönböztették a síkvidéki és a hegységi permafroszt területeket, így az 1000 m tengerszint feletti magasságú területeket figyelmen kívül hagyták. Azonban ezeknek a területeknek a kiterjedése csak megközelítőleg határozható meg, illetve a feltételezett permafroszt-határok és a paleo-hőmérsékleti izotermák új terepi adatok alapján változhatnak. A Közép-európai területeken a dolgot tovább bonyolítja az Alpok és a Kárpátok hatásai. Ellentétben a mai, recens eurázsiai permafroszt kiterjedésével, amit egyértelműen az arktikus hideg óceán határoz meg (Vandenberghe et al., 2012).

Az északi féltekén az utolsó glaciális maximum alatt (Last Glacial Maximum = LGM) idején kialakult permafroszt területeinek megbízható lehatárolásához további terepi vizsgálatokra, az orosz és kínai tanulmányok áttekintésére van szükség (Lindgren et al., 2016). Fontos leszögezni, hogy az LGM és az LPM nem azonos fogalom, ugyanis az LGM a glaciális éghajlat meglétét definiáló időintervallum, az LPM viszont egy nehezen meghúzható vonal a permafroszt területek határainál. Az LGM alatt Észak-Franciaország területén szórványos permafroszt lehetett, ugyanakkor a Brit-szigettől Lengyelországig, illetve ezekről északra egészen a jégtakaróig folyamatos permafroszt zóna húzódhatott. Az LGM-ben ezekre a területekre jellemző volt az erőteljes szél tevékenység és a viszonylag kevés csapadék (Huijzer & Vandenberghe, 1998). A német-holland határ közelében Vennebrügge térségében egy

homokhát felszínét vizsgálták, majd megállapították, hogy a LGM idején homok- és jégécek alakultak ki a homokhát felszínén. A jégék-kitöltések a homokhát alsó, míg a homokécek csak a magasabb részeken jöttek létre. Ebből arra következtetnek, hogy a magasabb terület szárazabb míg az alacsonyabb nedvesebb volt a környezeténél (Kasse & Vandenberghe, 1998). Belgiumban a Nyugat-Flandriai-fennsíkon nagy területeket lefedő, homokkal kitöltött repedéshálózatokat figyeltek meg. Ezeket összetett fagyék-pseudomorfóziákként írták le, amelyek az egykori permafroszt környezetre utalnak (Ghysels & Heyse, 2006).

Lengyelország közép-nyugati területéről, Wielkopolska régióban ék alakú szerkezeteket írtak le. Ezen a három helyen lévő formákat jégék-pseudomorfózákként, fosszilis fagyrepedésekként és termokarszttal érintett jégék-pseudomorfózákként értelmezték (M. Ewertowski, 2009). Délkelet-Lengyelország és Északnyugat-Ukrajna területein a permafroszt képződése többnyire a „folyóárterek és a mederközépi zátonyok kitett részeire” korlátozódik. Itt keskeny, szingenetikus jégék-pseudomorfózákat figyelhetők meg. Az ártereken és teraszokon a jégécek, a lösztakarós fennsíkokon a homokécek fordultak elő nagyobb számban (Zieliński et al., 2014).

Franciaországban jelentős mennyiségű periglaciális képződményt figyeltek meg. Ezek közé tartoznak a poligonok, hálók, talajcsíkok, jégék-maradványok, homokécek és talajdeformációk. A magas jégtartalmú permafroszt a Párizsi-medencére, illetve az Észak-Franciaországi területekre volt jellemző, ezt a jégék-maradványok is bizonyítják. A nagyobb poligonokat és homokéceket a Délnyugat-franciaországi területekről és a Rhone-völgyből írták le (Bertran et al., 2014).

A Kelet-európai területekről kevés permafroszt témájú kutatás és adat érhető el. A korábban permafroszt uralta zónák kiterjedése alábecsült lehet, különösen azokon a területeken, ahol kevés adat áll rendelkezésre (Vandenberghe et al., 2014).

Egy az európai termális kontrakciós talajrepedések poligonális hálózatainak az eloszlását vizsgáló kutatás megállapította, hogy az északi szélesség $43,5^\circ$ és a skandináv jégtakaró (Fennoscandian Ice Sheet = FIS) déli határa között helyezkednek el a poligonális hálózatok. Továbbá megállapítható, hogy nyugatról keletre haladva a kiterjedés déli határa egyre északabbra tolódik. A kutatás három típusú hálózatot különböztetett meg: a homokék, a jégék és az összetett ék hálózatokat (Bertran, 2022).

A Nyugati-Kárpátokban található CCC (kriogén barlangi karbonát) lerakódások eloszlásának és korának vizsgálata azt sugallja, hogy az alpesi permafroszt határa (LPM idején) a 800 méteres tengerszint feletti magasságban húzódnak (Orvošová et al., 2014).

A 20. századtól Magyarország területéről is írtak le jellegzetes pleisztocén fagy által létrehozott formákat. A pestszentlőrinci kavicsbánya volt az egyik ilyen lelőhely, ahol a Duna nagy méretű hordalékkúpjának kavicsos kőzetanyagában „*álgűrődéses-zsákos*” szerkezetű formákat azonosítottak. Úgy vélték, hogy ezek a „*jégkori sokszögtundratalajok*” egyes tartozékai. Továbbá ebből a kavicsbányából leírtak még függőleges, tölcsészerű, lefelé ékalakú homokkal kitöltött képződményeket is. Továbbá a meddőréteget eltávolítva megállapították, hogy ezeknek az ékalakú objektumoknak a felülnézeti képe sokszöghálózatot rajzol ki (Kerekes, 1939). Később hasonló zsákos álgűrődéses formákat találtak az Eger-patak terasz kavicsaiban is, amik „*méhsejtszerű*” hálózatot alkotnak, illetve „*zsákos kavicsot*” a borsodi vasútvonal mentén (Kerekes, 1941).

A krioturbációs jelenségek több formáját is felismerték. Kezdetben úgy vélték „Magyarország egész területe a pleisztocén eljegesedések során a periglaciális éghajlati morfológiai övezet tartozéka volt”. Ebből következik, hogy a negyedidőszaki felszínfejlődésnek egyik legmeghatározóbb elemei a periglaciális folyamatok voltak (Pécsi, 1961). Magyarország éghajlata a pleisztocén glaciálisokban télen és nyáron egyaránt különbözhetett a szomszédos területek éghajlataitól is, így nehezen lehet összehasonlítani az északnyugati óceáni éghajlattal vagy a kontinentális sztyepp területekkel, illetve a déli mediterrán területek nedves és hideg éghajlatával (Dylik, 1963).

A magyarországi kavicsból felépült képződményeken található krioturbációs képződményeket leginkább két szempont szerint lehet differenciálni. A formák nagysága és összetettsége szerint. A Duna ártéri szintben levő hordalékkúpjain, ahol a terület süllyedése és a hordalék felhalmozódása csekély volt, ott egy vékony ártéri öntés-réteg alatt 50–60 cm méretű „*fagyékeket, zsákokat és fagyhatására hullámosan deformálódott rétegeket*” írtak le (Pécsi, 1997).

Az eddigi vizsgálatok alapján a pleisztocén hidegebb glaciális fázisaiban a Kárpát-medencében az éghajlatot $-2 - -3$ °C évi középhőmérséklet és 200–400 mm csapadékösszeg jellemezhetette. Talán nagyon is túlzó az a megállapítás, hogy a homokékek alapján ezek az értékek legalább a $-8 - -10$ °C és maximum 50–100 mm-t érhatték el (Fábián et al., 2000).

A Magyarország északi részén, Budapest közelében talált reliktum homokékek alátámaszthatják azokat a feltételezéseket miszerint Magyarország területén a folyamatos permafroszt fordulhatott elő a pleisztocén idején (Kovács et al., 2007). Az ékstruktúrák és deformációk arra utalnak, hogy a pleisztocén kori fagyott talaj permafroszt vagy szezonális fagy

formában az északi szélesség 47°-ig terjedt Közép-Európában. Az OSL kormeghatározás szerint az ékek kitöltése a késő pleisztocénben történt (22,2–15,7 ezer évvel ezelőtt). „A homokék-kitöltések kialakulása a legkedvezőtlenebb litológiai aljzaton (kavics és durva homok) arra utal, hogy a folyamatos permafroszt jelenléte a teljes glaciális időszak alatt megbízhatóan feltételezhető.” „Nagyméretű poligonok mély ékekkel valószínűleg folyamatos permafrosztban fejlődtek ki” (Fábián et al., 2014).

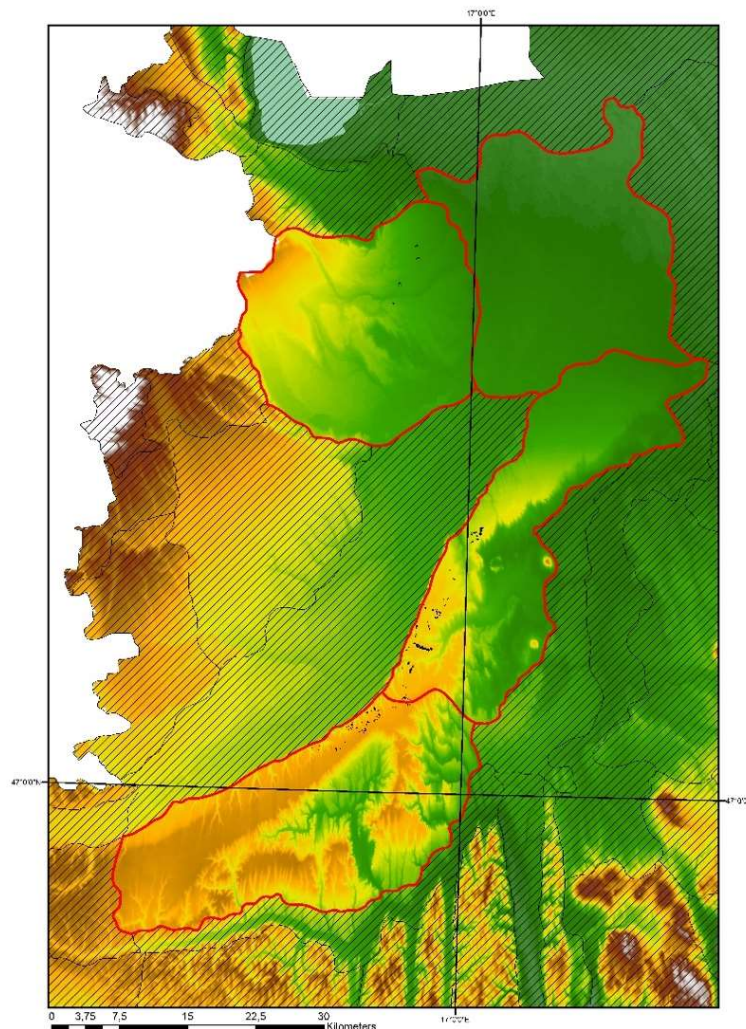
Schweitzer et al. (2015) szerint az eddig azonosított és megvizsgált homokék-poligonok alapján szaggatott, vagy szórványos permafroszt zóna feltételezhető. „Jégék- és fagyék-öntvényeket azonosítottak reliktum homokékeként, amelyek a szakaszos permafroszt zóna (DPZ) vagy a szórványos permafroszt. Azonban a magyarországi folyamatos permafrosztra meggyőző és egyértelmű bizonyítékot még mindig nem találtak. (Ruszkiczay-Rüdiger & Kern, 2016) megállapította, hogy a Pannon-medence alföldi területei az LPM során még a leghidegebb körülmények között sem tartoztak a folyamatos permafroszt zónába. Mivel nem találhatóak jégék-kitöltések, ezért a medence északnyugati területei a szaggatott permafroszt zónába sorolhatók, azonban a medence nagy részét csak mély szezonális fagy uralhatta.

Általánosságban a periglaciális kutatások elsődleges célja az, hogy meghatározza a permafroszt kialakulásának, klimatikus viszonyainak, elterjedésének és formáinak az általános jellemzőit. Számos kutatás próbálja a recens, illetve az egykori permafroszt területeken lévő jelenségeket összehasonlítani és ezáltal következtetni a múlt jelenségeire. Ennek egy fontos feltétele a lehető legszélesebb körű adatgyűjtés a vizsgált területekről, általában növényzeti jelek alapján. Ebben a dolgozatban én is arra teszek kísérletet, hogy a számomra elérhető legmodernebb eszközökkel, a lehető legpontosabban adatokhoz jussak hozzá, ami aztán statisztikai módszerekkel feldolgozva összehasonlíthatóvá váljon a szakirodalmi áttekintésben bemutatott recens és fedett területeket is feldolgozó külföldi cikkek eredményeivel. Szeretném a már meglévő és az előző néhány terepbejárás alakalmával gyűjtött homokék-poligonok morfometriáját leírni, majd összehasonlító statisztikai elemzését megvalósítani, illetve összefüggéseket keresni a geometriai és a domborzati, földtani adottságok között. Remélem, hogy az itt elért eredmények segíthetnek a hazai periglaciális formák és folyamatok további kutatásában és megértésében.

2. Anyag és módszer

2.1. A vizsgált területek

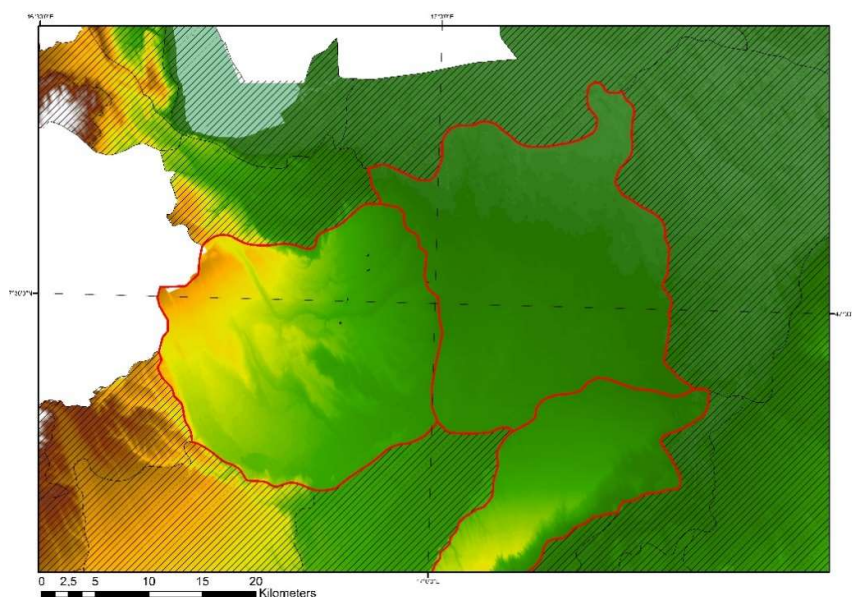
Mivel több helyszínen vizsgáltam a növényzeti jeleket (periglaciális poligonokat), ezért tájegységekre bontva kategorizáltam őket. A vizsgált területek elhelyezkedés szerint két fő egységre oszthatók, azaz Magyarország klasszikus nagytájai (1990) közül kettő területén helyezkednek el: a Kisalföldön és a Nyugat-magyarországi peremvidéken. A legújabb MNA szerint azonban jórésük a Kisalföldön és egy kisebb részük a Dunántúli-dombságon helyezkedik el (2018).



1. ábra: A vizsgálati területet bemutató domborzati térkép

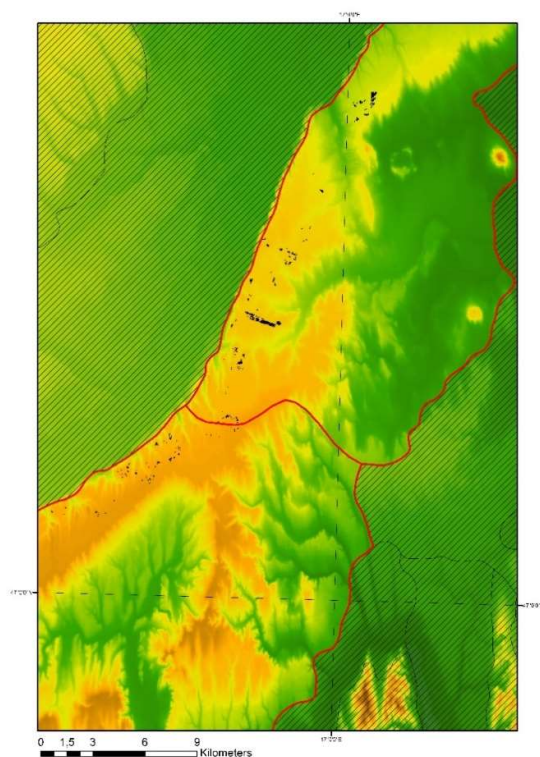
Az elemszámok tekintetében szerényebb területek a Répce-sík és a Kapuvári-sík kistáj területén találhatók. A Kapuvári-sík a Kisalföld és azon belül is a Győri-medence része. Területének döntő többsége magasártéri medencesíkság. A kistáj délről északi irányba enyhén lejt. A tengerszint feletti magassága 135–115 m között változik. A relatív relief értéke 2 m/km^2 . Ez a terület a Rába megsüllyedt és főleg iszappal borított hordalékkúplejtője, ami 10–50 m-es vastagságú homokos-kavicsos pleisztocén üledékekből épül fel. Talajai 87%-ban réti talajok, 12%-ban agyagbemosódásos barna erdőtalajok. A termőképességük és a vízgazdálkodásuk gyenge a felszínközeli kavicsréteg miatt.

A Répce-sík a Nyugat-magyarországi peremvidék, azon belül a Sopron–Vasi-síkság tagja. Domborzati jellemzői közül az átlagos tengerszint feletti magassága 167 m; míg az átlagos relief értéke $8,5 \text{ m/km}^2$. Egységes, gyengén tagolt felszínét 5–15 m vastagságú hordalékkúp jellegű kavicstakarók, kavicsos széles, lapos, erodált háta és kavicsos völgyelések jellemzik. A Répctől északra található síksági terület változatosabb, mint a szomszédos tájakon. Az Ős-Répce különböző korú hordalékkúpokat épített a térben és időben eltérően, süllyedő területeken. Ezek később periglaciális szoliflukciós átmozgatással nagyjából egységes kavicstakaróvá rendeződtek össze (Ádám, 1962). A táj hordalékkúpjait jégkorszaki vályoggal és lösszel fedett kavicstakarók építik fel. Talajai 71%-ban agyagbemosódásos barna erdőtalajok, 15%-ban csernozjom barna erdőtalajok, 8%-ban réti öntéstalajok, 3%-ban barnaföldek, 2%-ban réti talajok és 1%-ban réti szolonyec talajok.



2. ábra: A Répce-sík és a Kapuvári-sík domborzati térképe a poligonokkal

A legnagyobb számban azonosított poligonokkal tagolt és vizsgált területek a Kemenesháton találhatók meg. A táj további két kistájra osztható. Az Alsó-Kemeneshát a Kemeneshát északkeleti része, a Marcal és a Rába között. Ellenben sokkal kevésbé tagolt, mint a Felső-Kemeneshát. Átlagos völgyűrűsége 2 km/km^2 , egységes fennsík jellegű. Az átlagos tengerszint feletti magassága 190 m, átlagos relief értéke 17 m/km^2 . A legegységesebb területe a Sárvár-Marcaltó közti vonulat. Sima felszínét átlagosan 10 m vastagságú, laza Rába kavics fedi. Földtani felépítése főként a kereszttrétegzett folyóvízi homokból és az idős Rába-kavicsból áll. Van olyan terület, ahol a kavicsréteg meghaladja az 50 méteres vastagságot. A Ság tanúhegyének környezetében jelentős pleisztocén kori szélrózsió volt jelen. Nagy vastagságban pusztultak le pannon és pleisztocén üledékek (Sebe et al., 2011).



3. ábra: Az Alsó- és Felső-Kemeneshát domborzati térképe a poligonokkal

A Felső-Kemeneshát a Kemeneshát délnyugati része. Felszínalakját elsősorban a kiemelt, fennsík jellege és a délnyugat–északkeleti irányú lejtősődése határozza meg. Környezetéből a negyedidőszaki kéregmozgások emelték ki. Az átlagos tengerszint feletti magassága 276 m, átlagos relatív relief értéke 34 m/km^2 . A sajátos szerkezeti viszonyai és a lepusztulás miatt a keresztmetszete erősen aszimmetrikus. Felszíne északkelet felé fokozatosan lealacsonyodik, felszínét zergugos völgyhálózat jellemzi, ami lapos völgyközi hátakra és platórészekre tagolja a fennsíkot. A Rába, a Zala és a Lugos patak által határolt, eróziós–deráziós

völgyekkel tagolt, hullámos kavicsstakarós felszíne van. Földtani felépítésében beltavi üledékek, keresztretegzett folyóvízi homok, valamint negyedidőszaki folyóvízi kavics vesz részt. A Rába idős kavicsstakarója helyenként a 20 m-es vastagságot is meghaladja. A kavicsrétegek felszínét foltokban lösz, löszös üledékek és jégkorszaki vályog fedi. Talajait 84%-ban agyagbemosódásos barna erdőtalaj, 9%-ban pszeudoglejes barna erdőtalaj, 5%-ban barnaföldek alkotják (Dövényi, 2010).

2.2. Felhasznált alapanyagok

Számos anyag állt rendelkezésemre a vizsgálat során. Térképszervert, illetve raszteres és vektoros állományokat egyaránt felhasználtam. Ezek közt szerepel az SZTFH térképek ArcGIS szervere és azon belül a földtani térképe¹, a Google Maps online felületének a műholdképei², a Google Earth Pro szoftver műholdképei³, a DigitalGlobe 50 cm-es felbontású műholdképei⁴, a Lechner tudásközpont 40 cm-es felbontású orthofotói⁵, egy 10 m-es felbontású digitális magasság modell a Dunántúl területéről⁶, egy már korábban digitalizált vektoros állomány a Kemeneshát egy részterületéről⁷, valamint a terepbejárás során készített drónfelvételek is. Mindezeket ArcGIS, ArcMap és QGIS környezetben dolgoztam fel a kutatás során.

2.3. A vizsgálati módszerek

A vizsgálat egy fontos részeként sor került a területek bejárására is. Először 2024 tavaszán, majd őszén, összesen három terepbejárással. A három alkalom során több helyszínen is készítettem drónfelvételeket. Többek között Szemenye, Csapod és Fertőszentmiklós települések területén is. A helyszínek kiválasztásához először a már meglévő raszteres állományokat néztem át, illetve azonosítottam több helyszínt, ahol a növényzeti jelek megtalálhatóak és jól láthatóak voltak. Ebben a folyamatban a Google Earth Pro volt a legnagyobb segítség, ahol a műholdképek dátum szerint cserélhetőek egy adott területre.

¹ Az egykori MÁFI (Magyar Állami Földtani Intézet) által létrehozott térképi portálon (map.hugeo.hu) található Magyarország fedett földtani térképe 1:100000 ma-ban

² Google Maps, elérhető: <https://www.google.com/maps>.

³ Google Earth Pro, elérhető: <https://www.google.com/earth/about/versions/>.

⁴ DigitalGlobe Foundation engedélyével

⁵ Készült az állami alapadatok felhasználásával

⁶ Készült az állami alapadatok felhasználásával

⁷ Készítette: Józsa Edina a „Characterization and mapping of MIS-2 thermal contraction crack polygons in Western Transdanubia, Hungary” projekt keretein belül.

A helyszínek kiválasztása után a következő lépés a digitalizáció volt. Ezt az ArcMap szoftverben végeztem el, ahol geoadatbázisban featureclass-ként definiáltam a növényzeti jelek által kirajzolt poligonokat. A hálózatokat először vonalláncként definiáltam, majd ezt az ArcMap szoftver egy eszközének a segítségével poligonokká alakítottam. A digitális magasságmodellből készítettem a QGIS szoftver segítségével lejtést, illetve kitettséget tartalmazó raszteres állományokat. Külföldi kutatások mintájára (és hogy azokkal a későbbiekben összehasonlítható legyen a vizsgálatom) 8 darab változót adtam hozzá a poligonokhoz. Ezek a poligonok területe, a szögeinek száma, a szabályosságát leíró „circularity”, a megnyúltságot leíró „aspect ratio” (Ulrich et al., 2011). A poligonok morfológiai jellemzői mellett kigyűjtöttem a topográfiai tulajdonságaikat is. A terület tengerszint feletti magasságát, lejtésének értékét, kitettsége értékét és a földtani felépítését is (Bertran, 2022).

Az ArcGis szoftverből exportált adattáblának a további feldolgozását a Microsoft Excel és az RStúdió szoftverek segítségével hajtottam végre. A korábbi kutatások adattáblái szerint a több komponensű változókat már az Excelben számítottam ki (Ulrich et al., 2011). Az adatbázisban kezdetben megtalálhatóak voltak „hamis” poligonok is, ami a vonallánckok poligonná alakításából adódott. Ezeket a poligonokat a szögeinek számának a szűrésével szelektáltam ki. Megnézve az elemszámok eloszlását a 9-nél kisebb értékeket tekintettem valós, megbízható adatoknak. Majd az ennél nagyobb értékeket töröltem az adattáblából. Valószínűleg ezek között volt „valódi” poligon is, de az elemzés megbízhatósága érdekében eltávolítottuk mindet. Az RStudio szoftverben R 4.4.2 környezetben *factoextra* csomaggal végeztem el a klaszterelemzéseket, illetve az eloszlás diagramokat is ezzel készítettem el. Többféle klaszterezést futtattam: ilyen volt a hierarchikus, illetve a K-középpontú klaszterelemzés is.

3. Eredmények

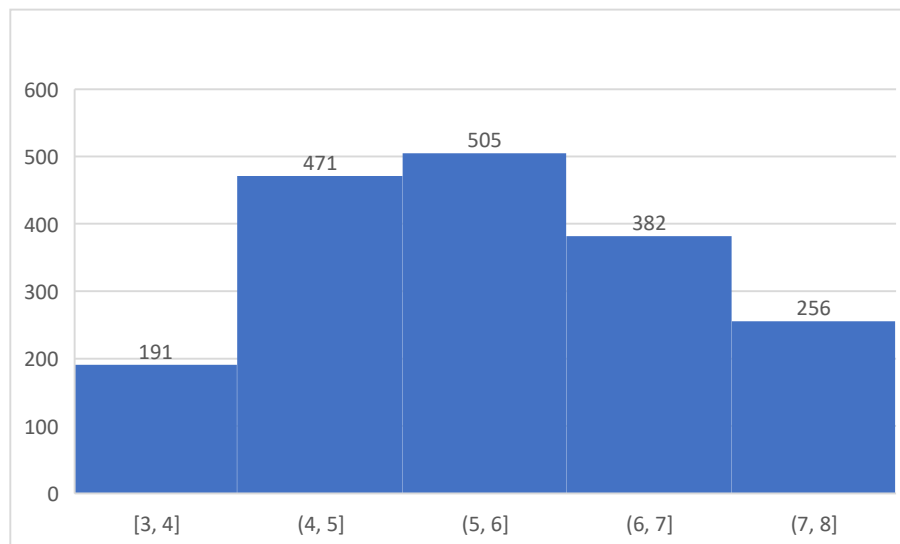
3.1. A poligonok azonosítása és morfológiai jellemzői

Az említett vizsgálati területeken belül, számos új helyszínen sikerült különböző felvételeken poligonális hálózatot kirajzoló növényzeti mintákat azonosítani. Az első olyan digitalizálási folyamat után, ami már poligonokat eredményezett, az elemszámok megközelítették a 2500 darabot. A későbbiekben a szűrés miatt (szögek száma $n < 9$) ez a szám lecsökkent 1940 darab elemre.

shape_area	angle_number	cos_ma	circularity	aspect_ratio	foldtan_nev	elevation	slope_class	aspect_class
476,8371964	8	0,99255	0,75179	0,68674	Barna losz	235,53288	1	NW
127,4047629	6	0,24192	0,85645	0,80514	Folyóvízi kavics, homokos kavics	224,73485	3	E
223,0604277	8	0,24192	0,82605	0,70843	Folyóvízi kavics, homokos kavics	225,25199	2	E
239,3060112	7	0,22495	0,88656	0,75941	Folyóvízi kavics, homokos kavics	225,12295	2	E
209,8037195	7	0,10453	0,88903	0,83092	Barna losz	234,16039	2	NE
195,7325587	6	0,32557	0,88148	0,71851	Barna losz	234,77315	2	NE
535,6167106	6	0,05234	0,85674	0,60444	Barna losz	236,35525	2	E
207,0712261	7	0,55919	0,77158	0,74489	Barna losz	234,86620	1	N
158,759338	6	0,98481	0,90288	0,86452	Deluvialis uledek	222,96054	3	S
269,7376895	6	0,71934	0,89655	0,78149	Barna losz	234,57985	2	W
94,39644724	4	0,99452	0,64105	0,45168	Deluvialis uledek	223,96493	3	S
156,9632839	6	0,17365	0,84814	0,66174	Barna losz	234,34105	2	N
433,9190135	7	0,27564	0,86437	0,73934	Barna losz	234,35030	2	N
319,942745	7	0,99863	0,90456	0,81798	Barna losz	233,94854	2	NE
173,4793514	5	0,90631	0,78852	0,61146	Deluvialis uledek	222,51602	3	W
353,1950602	6	0,73135	0,87916	0,73193	Deluvialis uledek	223,58316	3	W
111,6707641	5	0,71934	0,80195	0,83127	Barna losz	234,17730	2	N
325,7957052	6	0,88295	0,85986	0,75280	Deluvialis uledek	223,71171	3	W
293,9088502	7	0,90631	0,90548	0,92851	Deluvialis uledek	222,44917	4	NW
230,5651336	7	0,65606	0,65895	0,65034	Barna losz	234,05085	2	SE
126,9930671	4	0,24192	0,77843	0,92276	Deluvialis uledek	224,50017	3	W
110,093371	4	0,99863	0,73726	0,63182	Deluvialis uledek	224,20619	3	W
127,5394331	5	0,52992	0,83193	0,82531	Deluvialis uledek	222,38407	4	NW
274,0559865	6	0,17365	0,79713	0,50264	Deluvialis uledek	220,40131	4	NW
198,1188464	6	0,22495	0,89663	0,81212	Folyóvízi kavics, homokos kavics	225,52409	1	E
153,5848183	5	0,93358	0,84600	0,90009	Folyóvízi kavics, homokos kavics	225,25511	2	E

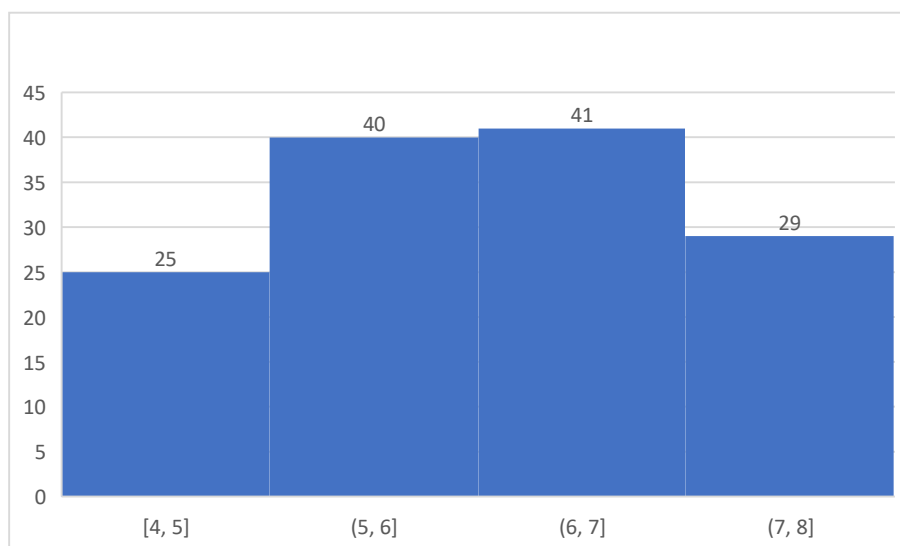
4. ábra: A geodatabázis változóinak táblázata (minta)

A Kemeneshát esetében a minimum–maximum értékek a következőképpen alakultak. A poligonok területei egész számra kerekítve 10–1058 m² között változott. A szögek számának értékeinek az alsó határa 3, felsőt maximalizáltam 8-ban. A „circularity” változó értékei 0,43–0,93 között változott. Az „aspect ratio” értékei 0,28–0,99 között változtak. A gyakoriságot feldolgozó diagramokból látszik, hogy a poligonok körülbelül 90%-a a 400 m² alatti kategóriába sorolható. A szögek számainak több mint 50%-a az 5 vagy 6 szögű sokszögek közé tartozik.



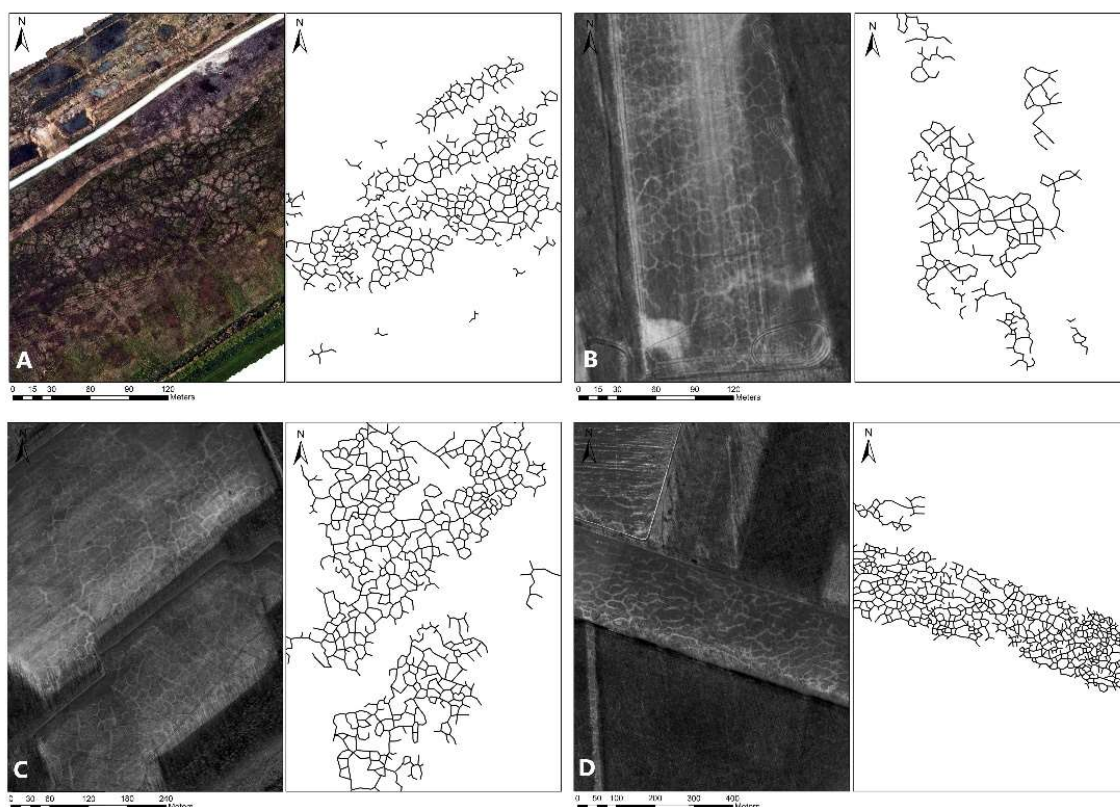
5. ábra: Eloszlási hisztogram a kemenesháti poligonok szögszámairól

A Répce-sík és Kapuvári-sík esetében a minimum–maximum értékek a következőképpen alakultak. A poligonok területei egész számra kerekítve 10–845 m² között változott. A szögek számának értékeinek az alsó határa 4, felsőt maximalizáltuk 8-ban. A „circularity” változó értékei 0,52–0,92 között változott. Az „aspect ratio” értékei 0,43–0,97 között változtak. A gyakoriságot feldolgozó diagramokból látszik, hogy a poligonok körülbelül 88%-a a 120 m² alatti kategóriába sorolható. A szögek számainak több mint 60%-a az 5 vagy 6 szögű sokszögek közé tartozik.



6. ábra: Eloszlási hisztogram a Répce-, Kapuvári-sík poligonjainak szögszámáról

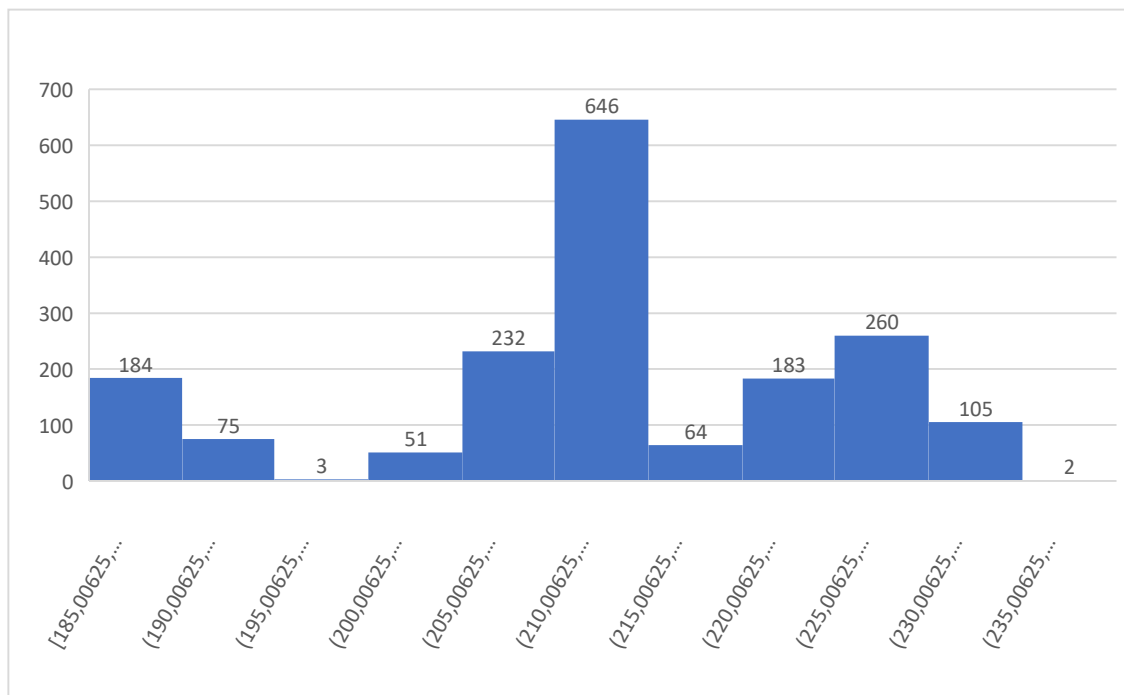
A fentiekből következik, hogy az általam vizsgált poligonok döntő többsége a szabálytalan, közepesen nagy, nem derékszögű poligonhálózatok típusába sorolhatók. Emellett töredékesen sikerült rekonstruálni kevert, vastagabb és vékonyabb szabálytalan nem derékszögű poligonokból álló hálózatot is.



7. ábra: Azonosított poligonális hálózatok különböző forrástérképeken: A=Fertőszentmiklós, B=Alsóújlak, C=Sitke, D=Bejczygyertyános települések határában

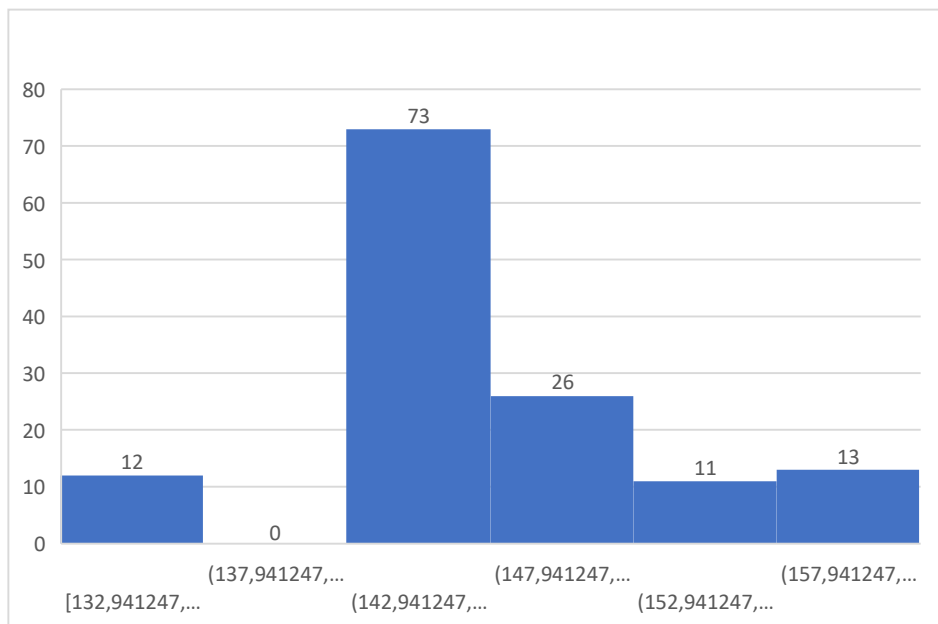
3.2. A poligonok és a topográfiai változók kapcsolata

A Kemeneshát poligonjainak földtani felépítése az esetek több mint a 66%-ban folyóvízi kavics, homokos kavics, valamint több mint 30%-a a barna lösz kategóriába tartozik. Az elemek tengerszint feletti magasságai egy 50 m-es intervallumban változnak (185–235 m). A lejtés értékeinek több mint 93%-a a 0–2°-os intervallumba tartozik. A kitettség értékek közül a két legnagyobb elemszámmal bíró halmaz a keleti és az északkeleti 28,5% és 19,6%-ban.



8. ábra: Eloszlási hisztogram a kemenesháti poligonok magassági értékeiről

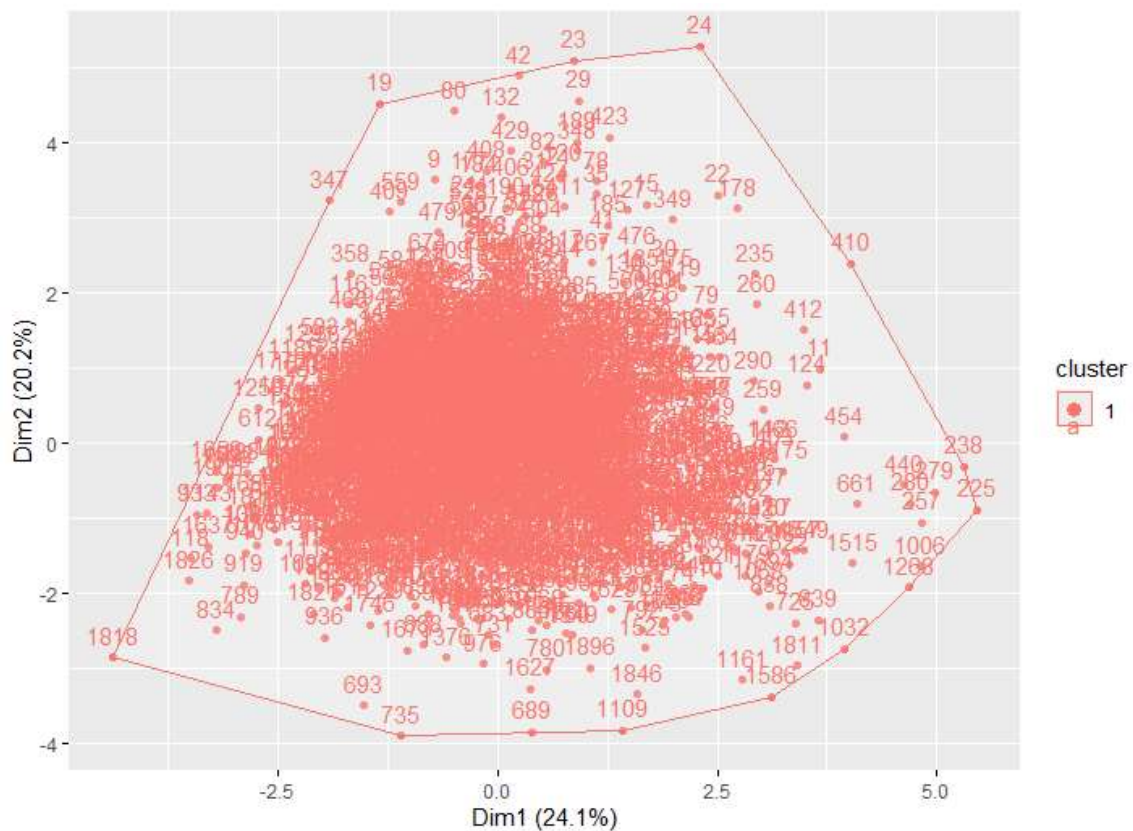
A Répce-sík és a Kapuvári-sík poligonjainak a földtani felépítése az esetek több mint 96%-ban folyóvízi kavics, homokos kavics. Az elemek tengerszint feletti magassága a 132–163 m tartományban változott. A lejtés értékeinek több mint 93%-a a 0–2°-os intervallumba tartozik. A kiettség értékei csaknem 95%-ban keleti, illetve északi.



9. ábra: Eloszlási hisztogram a Répce-, Kapuvári-sík poligonjainak a magassági értékeiről

3.4. A poligonok klaszterelemzése

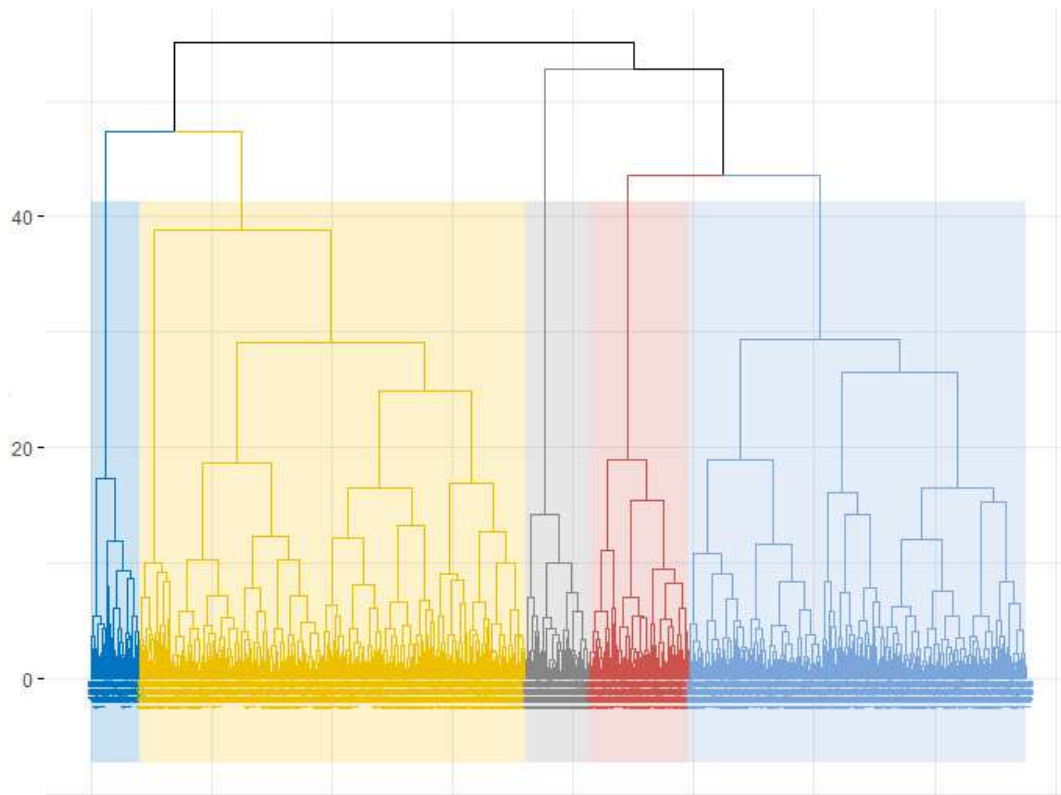
A klaszterelemzéshez az alábbi változókat vettem figyelembe: circularity, elongation ratio, aspect ratio és terület, utóbbit normalizálva, minthogy értékei jelentősen eltértek az előbbi háromtól. A klaszterelemzés többszöri futtatása (vizsgálati területenként külön-külön és a sokaságon egyben) is azt az eredményt hozta, hogy az alaphalmazok optimális (gap-statisztikával magyarázott variancia szerinti legjobb) klaszterszáma egy. Az is megfigyelhető azonban a hierachikus dendrogramon, hogy elég magas szinten olvad össze a halmaz egy klaszterré, ami részben magyarázható a nagyobb elemszámmal. Ám egyúttal az is látszik, hogy az 50. hierarchia szinten három, a 40.-en már öt csoportra bontható a poligonok halmaza.



10. ábra: A K-közép klaszterelemzés eredménye gap-statisztikával egy optimális klaszterként értelmezve

A változókon (terület, szögek száma, circularity, aspect ratio) páronként a két mintaterületre vonatkozóan t-próbát is futtattam, hogy ellenőrizsem az adatokat. Null-hipotézisem volt, hogy a két mintaterület poligonjai változóik alapján egy halmaznak a részei. A kapott $P(T \leq t)$ értékek azonban az egy százalékot sem közelítik meg, így a null-hipotézist elvettem. Tehát a változók átlagai szignifikánsan különböznek egymástól, így e változók mentén nem egy halmaznak a részei a minták.

Az egyhalmazos klasztermegoldás mellett a következő legjobb variancia magyarázattal is készítettem k-középpontos Euklédieszi-távolság alapján elemzést, amely szerint 5 csoportba rendezhetők e poligonok.



11. ábra: A Hierarchikus klaszterelemzés dendrogramja 5 csoportként értelmezve

4. Diskusszió és konklúzió

Fontos megjegyezni, hogy ennek a vizsgálatnak számos gyenge pontja, illetve korlátja lehet. Ezek közül szeretnék néhányat ismertetni, kezdve a helyszínek kiválasztásának a nehézségeivel. A növényzeti jelek megjelenésében nagyon nagy eltérések vannak relatív kis területen belül. Ami a legszembetűnőbb, hogy a művelési határok és ezzel együtt a vegetáció típusai is szinte teljesen felülírják a formák megjelenését. Ha ideális körülmények között találunk egy jól látható hálózatot szinte biztos, hogy csak a szomszédos parcelláig fog látszódni.

A helyszínek kiválasztása után a következő nehézség a poligonális hálózatoknak a vonalláncként való definiálása, amit szintén számos tényező zavar a különböző vadcsapásokon át az ék tetején magasabb növényzet árnyékán keresztül a különböző gépeknek a művelési nyomtávjáig. Ugyanakkor nagyon fontos még a képek felbontása, a nézet méretaránya és a képek elkészítésének az időpontjai is. Mivel háromdimenziós alakzatokat kell értelmeznünk két dimenzióban, így ennyi zavaró tényező mellett fontos faktor lehet, hogy az emberek eltérő módon definiálhatják a mintázatokat. Továbbá kérdés még az is, hogy a vonalakból készített poligonokat meddig tekinthetjük valós poligonoknak. Ezt a kérdést korábban még nem részletezték, azonban fontos lehet a további kutatások szempontjából is (Bertran, 2022; M. W. Ewertowski et al., 2017; Ulrich et al., 2011). Meglátásom, hogy a poligonok topográfiai változói is pontosabbak lehetnének nagyobb felbontású alaptérképek használatával. Mivel a vonalláncként definiálása zavart, ezért szükségszerű, hogy a kapott poligonok adatai is zavartak lehetnek. Ebből pedig következik, hogy a statisztikai vizsgálatok eredményei is hibákkal terheltek lehetnek.

A két vizsgálati terület összehasonlítva érdekes kérdés lehet a területeknek a pleisztocén kori felszíni és felszín alatti vízellátása. Külföldi irodalmak közül sikerült olyat találnom, ami a domborzati, illetve a tengerszint feletti magasság összefüggéseivel magyarázta a vizsgálati területen talált homok és jégékek területi eloszlását (Kasse & Vandenberghe, 1998). Az általam vizsgált két terület között több tíz méteres magasságbeli különbség van, mégis mindkettőt homokékek alkotják, illetve a morфомetriai jellemzőikben sem volt markáns különbség.

Véleményem szerint a homokék poligonok kialakulásához szükséges alapfeltételek ún. hideg, száraz és szeles éghajlat mindkét területen egyformán hatottak a határozott magassági különbség ellenére. A kemenesháti területekről rendelkezésre álló optikai koradatok alapján

(Farkas et al., 2023) és az általam vizsgált poligonok morfológiai hasonlóságából, valamint a környéken megfigyelt, de nem közölt (ex verbis Zentai Z.) adatokból következik, hogy az LGM végén, vagy azt követően az északnyugati országrész nagyobb területein (Kapuvár-Szombathely-Vasvár régióban) hosszabban fennállhattak a homokékek képződéséhez szükséges környezeti feltételek. A kialakulást elősegíthette a hasonló földtani felépítés, a hasonló alacsony tengerszint feletti magasság ($h < 300$ m), az északnyugati szélkapunak kitett fekvés (Sebe et al., 2011), valamint a FIS közeli jelenléte. Véleményem szerint az általam térképezett és vizsgált poligon hálózatok jelenthetik az LPM legdélebbi elterjedési határát. Bár a Dunántúlról nem ismertek délebbi előfordulások, de a keleti országrészből ismert egyetlen előfordulás (Kovács et al., 2007) nem elegendő a határ kiterjesztésére, vagy teljes elvetésére, illetve fontos lenne további tájegységek hasonló vizsgálata és az adatbázis kiterjesztése, hogy további összefüggéseket vizsgálhassunk.

Összességében kimondható, hogy a Kemeneshát északi szélesség 47° től északra lévő területeken meghatározó mennyiségben azonosítottam poligonális hálózatokat, amelyek a legvalószínűbb értelmezés szerint fagyhatására kialakult reliktum homokék hálózatok. Ezekből a hálózatokból sikerült nagy mennyiségben kinyernem poligonokat és geoadatbázist építenem 1940 darab objektumra. Ezzel együtt a morfológiai és topográfiai változókat (összesen 8 darabot) is integráltam az adatbázisba, melyek egy részét klaszterelemzésnek vettem alá, hogy csoportokat, típusokat alkossak a sokaságból. A klaszterelemzés típusától függően lehet egy vagy több csoportba sorolni a poligonokat, de nem gondolom úgy, hogy ez elegendő valódi genetikai típusok elkülönítésére.

6. Hivatkozott irodalmak jegyzéke

- Ádám, L. (1962). A Rábántúli kavicstakaró. *11(1)*, 41–52.
- Bertran, P. (2022). Distribution and characteristics of Pleistocene ground thermal contraction polygons in Europe from satellite images. *Permafrost and Periglacial Processes*, 33(2), 99–113. <https://doi.org/10.1002/ppp.2137>
- Bertran, P., Andrieux, E., Antoine, P., Coutard, S., Deschodt, L., Gardère, P., Hernandez, M., Legentil, C., Lenoble, A., Liard, M., Mercier, N., Moine, O., Sitzia, L., & Van Vliet-Lanoë, B. (2014). Distribution and chronology of Pleistocene permafrost features in France: Database and first results. *Boreas*, 43(3), 699–711. <https://doi.org/10.1111/bor.12025>
- Dövényi, Z. (2010). *Magyarország Kistájainak katasztere* (Második). MTA, Földrajztudományi Kutatóintézet.
- Dylik, J. (1963). Magyarország periglaciális problémái. *12.*, 453–464.
- Ewertowski, M. (2009). Ice-wedge pseudomorphs and frost-cracking structures in Weichselian sediments, central-west Poland. *Permafrost and Periglacial Processes*, 20(4), 316–330. <https://doi.org/10.1002/ppp.657>
- Ewertowski, M. W., Kijowski, A., Szuman, I., Tomczyk, A. M., & Kasprzak, L. (2017). Low-altitude remote sensing and GIS-based analysis of cropmarks: Classification of past thermal-contraction-crack polygons in central western Poland. *Geomorphology*, 293, 418–432. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.07.022>
- Fábián, S. Á., Kovács, J., & Varga, G. (2000). Újabb szempontok hazánk periglaciális klímájához. *49(3–4)*, 189–204.
- Fábián, S. Á., Kovács, J., Varga, G., Sipos, G., Horváth, Z., Thamó-Bozsó, E., & Tóth, G. (2014). Distribution of relict permafrost features in the Pannonian Basin, Hungary. *Boreas*, 43(3), 722–732. <https://doi.org/10.1111/bor.12046>

- Farkas, B., Sipos, G., Bartyik, T., Józsa, E., Czigány, S., Balogh, R., Varga, G., Kovács, J., & Fábíán, S. Á. (2023). Characterization and mapping of MIS-2 thermal contraction crack polygons in Western Transdanubia, Hungary. *Permafrost and Periglacial Processes*, 34(3), 417–427. <https://doi.org/10.1002/ppp.2190>
- Ghysels, G., & Heyse, I. (2006). Composite-wedge pseudomorphs in Flanders, Belgium. *Permafrost and Periglacial Processes*, 17(2), 145–161. <https://doi.org/10.1002/ppp.552>
- Huijzer, B., & Vandenberghe, J. (1998). Climatic reconstruction of the Weichselian Pleniglacial in northwestern and Central Europe. *Journal of Quaternary Science*, 13(5), 391–417. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1417\(1998090\)13:5<391::AID-JQS397>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1417(1998090)13:5<391::AID-JQS397>3.0.CO;2-6)
- Kasse, C., & Vandenberghe, J. (1998). Topographic and drainage control on Weichselian ice-wedge and sand-wedge formation, Vennebrügge, German–Dutch border. *Permafrost and Periglacial Processes*, 9(2), 95–106. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1530\(199804/06\)9:2<95::AID-PPP282>3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1530(199804/06)9:2<95::AID-PPP282>3.0.CO;2-D)
- Kerekes, J. (1939). *A pestszentlőrinci fosszilis tundraképződmények*. 131–139.
- Kerekes, J. (1941). *Hazánk periglaciális képződményei* (4. Füzet 3. évfolyam). Magyar Királyi Földtani Intézet. https://epa.oszk.hu/03600/03638/00006/pdf/EPA03638_mafi_beszamolo_1941_04_097-142.pdf
- Kovács, J., Fábíán, S. Á., Schweitzer, F., & Varga, G. (2007). A relict sand-wedge polygon site in north-central Hungary. *Permafrost and Periglacial Processes*, 18(4), 379–384. <https://doi.org/10.1002/ppp.600>
- Lindgren, A., Hugelius, G., Kuhry, P., Christensen, T. R., & Vandenberghe, J. (2016). GIS-based Maps and Area Estimates of Northern Hemisphere Permafrost Extent during the

- Last Glacial Maximum. *Permafrost and Periglacial Processes*, 27(1), 6–16.
<https://doi.org/10.1002/ppp.1851>
- Orvošová, M., Deininger, M., & Milovský, R. (2014). Permafrost occurrence during the Last Permafrost Maximum in the Western Carpathian Mountains of Slovakia as inferred from cryogenic cave carbonate. *Boreas*, 43(3), 750–758.
<https://doi.org/10.1111/bor.12042>
- Pécsi, M. (1961). A periglaciális talajfagy-jelenségek főbb típusai Magyarországon. 85(1).
https://real.mtak.hu/167070/1/7_cut_FoldrajziKozlomenyek_1961.pdf
- Pécsi, M. (1997). *Szerkezeti és váztalajképződés Magyarországon: Tekintettel a derázios - korrázios - domborzatalakulásra, talajhordalék- és üledékképződésre a negyedidőszak során*. MTA, Földrajztudományj Kutató Intézet.
- Ruszkiczay-Rüdiger, Z., & Kern, Z. (2016). Permafrost or seasonal frost? A review of paleoclimate proxies of the last glacial cycle in the East Central European lowlands. *Quaternary International*, 415, 241–252. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.07.027>
- Schweitzer, F., Fábrián, S. Á., Varga, G., Sipos, G., & Kovács, I. P. (2015). *A periglaciális talajfagy-jelenségek kutatása Pécsi Márton nyomán*. 139(3), 157–171.
- Sebe, K., Csillag, G., Ruszkiczay-Rüdiger, Z., Fodor, L., Thamó-Bozsó, E., Müller, P., & Braucher, R. (2011). Wind erosion under cold climate: A Pleistocene periglacial mega-yardang system in Central Europe (Western Pannonian Basin, Hungary). *Geomorphology*, 134(3–4), 470–482. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.08.003>
- Ulrich, M., Hauber, E., Herzsuh, U., Härtel, S., & Schirrmeister, L. (2011). Polygon pattern geomorphometry on Svalbard (Norway) and western Utopia Planitia (Mars) using high-resolution stereo remote-sensing data. *Geomorphology*, 134(3–4), 197–216.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.07.002>

- Vandenbergh, J., French, H. M., Gorbunov, A., Marchenko, S., Velichko, A. A., Jin, H., Cui, Z., Zhang, T., & Wan, X. (2014). The Last Permafrost Maximum (LPM) map of the Northern Hemisphere: Permafrost extent and mean annual air temperatures, 25–17 ka BP. *Boreas*, 43(3), 652–666. <https://doi.org/10.1111/bor.12070>
- Vandenbergh, J., & Pissart, A. (1993). Permafrost changes in Europe during the last glacial. *Permafrost and Periglacial Processes*, 4(2), 121–135. <https://doi.org/10.1002/ppp.3430040205>
- Vandenbergh, J., Renssen, H., Roche, D. M., Goosse, H., Velichko, A. A., Gorbunov, A., & Levassieur, G. (2012). Eurasian permafrost instability constrained by reduced sea-ice cover. *Quaternary Science Reviews*, 34, 16–23. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.12.001>
- Zieliński, P., Sokołowski, R. J., Fedorowicz, S., & Zaleski, I. (2014). Periglacial structures within fluvio-aeolian successions of the end of the Last Glaciation – examples from SE Poland and NW Ukraine. *Boreas*, 43(3), 712–721. <https://doi.org/10.1111/bor.12052>