

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Társadalomtudományi Kar
MESTERKÉPZÉS



**LEGKISEBB KÖLTSÉGŰ UTAK MODELLEZÉSE
RÉGÉSZETI CÉLÚ TÉRBELI ELEMZÉSBEN**

**TOLNA VÁRMEGYE KÉSŐ KÖZÉPKORI
ÚTHÁLÓZATÁNAK REKONSTRUKCIÓS LEHETŐSÉGEI**

Konzulens:

Rakovics Márton

Készítette:

Ódor Péter

U2XT2G

Survey Statisztika és Adatanalitika MSc

2024, december

EREDETISÉGNYILATKOZAT

Ódor Péter
Survey Statisztika és Adatanalitika MSc

[a hallgató neve] az ELTE TáTK
[a hallgató szakja] hallgatója

fegyelmi felelősségem tudatában nyilatkozom, és aláírással igazolom, hogy a(z)

„Legkisebb költségű utak modellezése régészeti célú térbeli elemzésben. Tolna vármegye késő középkori úthálózatának rekonstrukciós lehetőségei”

[a szakdolgozat/diplomamunka címe]

című szakdolgozat/diplomamunka **saját, önálló szellemi munkám**, az abban hivatkozott, nyomtatott és elektronikus szakirodalom felhasználása a szerzői jogok szabályainak megfelelően történt.

Tudomásul veszem, hogy szakdolgozat/diplomamunka esetén plágiumnak számít:

- a szó szerinti idézet vagy fordítás közlése idézőjel és hivatkozás megjelölése nélkül;
- a tartalmi idézet hivatkozás megjelölése nélkül;
- más publikált gondolatainak saját gondolatként való feltüntetése.

Alulírott kijelentem, hogy a plágium fogalmát, valamint a HKR 74/A–C. §-aiban foglalt

rendelkezéseket megismertem, és tudomásul veszem, hogy

- a szakdolgozatom/diplomamunkám szövege a benyújtása után plágiumellenőrző szoftverrel vizsgálható,
- plágium esetén szakdolgozatom/diplomamunkám értékelés nélkül visszautasításra kerül,
- plágiumvétség esetén fegyelmi eljárás indítható.

Budapest, 2024. december 2.

ABSZTRAKT

A szakdolgozat egy komplex térbeli elemzés, amely a késő középkori Tolna vármegye úthálózatának részleges rekonstrukciójára tesz kísérletet egy sokat alkalmazott modellezési eszköz, a legkisebb költségű útszámítás (LCP) segítségével. A vizsgált terület alaposan feldolgozott középkori településtörténete, az elmúlt évtizedek tájrégészeti megfigyelései és a történeti források alapján azonosított középkori utak a modellezés referenciapontjai. Az előkészítésben a fő út-költség tényezők megalapozott modellezése, a számításhoz használt költségfüggvények kiválasztásában a földrajzi környezet sajátosságai és az útkeresés beállítása bizonyultak a legfontosabb tényezőnek. Az LCP utak hitelesen reprezentálták a meghatározható, szomszédos középkori települések közötti úthálózati elemeket. A modellezett utak alapján egy áttekintő rekonstrukció valósult meg, azonban több lehetőség kínálkozik a módszer továbbfejlesztésre, az elemzés elmélyítésére.

Kulcsszavak: Térbeli elemzés, Régészeti modellezés, GIS, Hidrológiai modellezés, Középkori településtörténet, Útkutatás, Least Cost Path, PyQGIS

Legfontosabb szakirodalmak:

K. Németh András. „A középkori Tolna megye települései. Településtörténeti adattár.” Kézirat, 2015.

Herzog, Irmela. "Least-cost Paths – Some Methodological Issues." *Internet Archaeology*, 36, (2014).

Mesterházy Gábor. "Legkisebb költségű úthálózatok modellezése síkvidéki környezetben a neolitikumtól a középkorig." *Communicationes Archaeologicae Hungariae* 2017 (2018) 173–192.

TARTALOMJEGYZÉK

BEVEZETÉS	1
1. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	4
1.1. Középkori utak és úthálózatok módszertani kutatása	4
Történeti és településföldrajzi kutatások	4
Tájrégészeti, néprajzi kutatások.....	6
1.2. Út-költség elemzések.....	8
Minimális költségű utak problémája és megoldó algoritmusok	8
Legkisebb költségű utak a térbeli elemzésekben	10
1.3. Régészeti célú útmodellezések.....	11
Legkisebb költségű utak (LCP)	11
LCP Hálózatelemzési megközelítésben	13
1.4. Legkisebb költségű utak modellezésének előnyei és korlátai	14
2. ADATOK, AZ ELEMZÉS MÓDSZERTANA	16
2.1. Településeket és utakat tartalmazó adatbázisok.....	16
2.2. Az elemzéshez kiválasztott útszakaszok	17
2.3. Modellezés során használt eszköztár	19
2.4. Útkereső algoritmus implementációja	20
2.5. Az úthálózat jellemzői, az kiválasztott úttípusok.....	23
2.6. Települések és az utak definiálása.....	24
2.7. A térbeli elemzés költségtenyezői	26
3. ELEMZÉS ELŐKÉSZÍTÉSE.....	28
3.1. A 16. század eleji domborzat és vízrajz megjelenítése	28
3.2. A Digitális Domborzatmodell előkészítése	28
3.3. Vízrajzi modellezés	30
Árhullám modellezése	32
Nagy mennyiségű csapadék modellezése	34
3.4. A költséggrétek létrehozása	35
3.5. LCP modellezés költségfüggvénye	36
4. AZONOSÍTOTT UTAK MODELLEZÉSE	38
4.1. Az útszámítás paramétereinek szelekciója	38
4.2. A legjobb utakat eredményező költségfüggvények.....	44

5. ÚT MODELLEZÉS EREDMÉNYEI.....	47
5.1. Területi jellemzők és a LCP utak kapcsolata	47
5.2. Úthibák, LCP korlátai az eredmények értelmezésében	47
5.3. Szomszédos települések közötti utak tulajdonságai.....	49
5.4. Központi települések és útkapcsolataik.....	49
5.5. úthálózat rekonstrukció a szomszédos települések között.....	50
ÖSSZEGZÉS.....	52
Kitekintés	53
Irodalomjegyzék	Hiba! A könyvjelző nem létezik.
Függelék	59

KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

A szakdolgozat nem született volna meg, ha nem kapok hatalmas segítséget a megvalósításhoz. Elsősorban köszönetet mondok K. Németh Andrásnak, aki rendelkezésre bocsájtotta kutatási eredményeit és adatait a modellezéshez; Mesterházy Gábornak a tanácsokért és támogatásért a modellezéssel végrehajtásával kapcsolatban; Varga Máténak és Pánya Istvánnak az adatokért, illetve a térinformatikai eszköztárral kapcsolatos segítségért, és természetesen konzulensemnek, Rakovics Mártonnak, aki támogató hozzáállásával, ötleteivel és lelkesedésével is segített egy tőle távol álló témakörben.

BEVEZETÉS

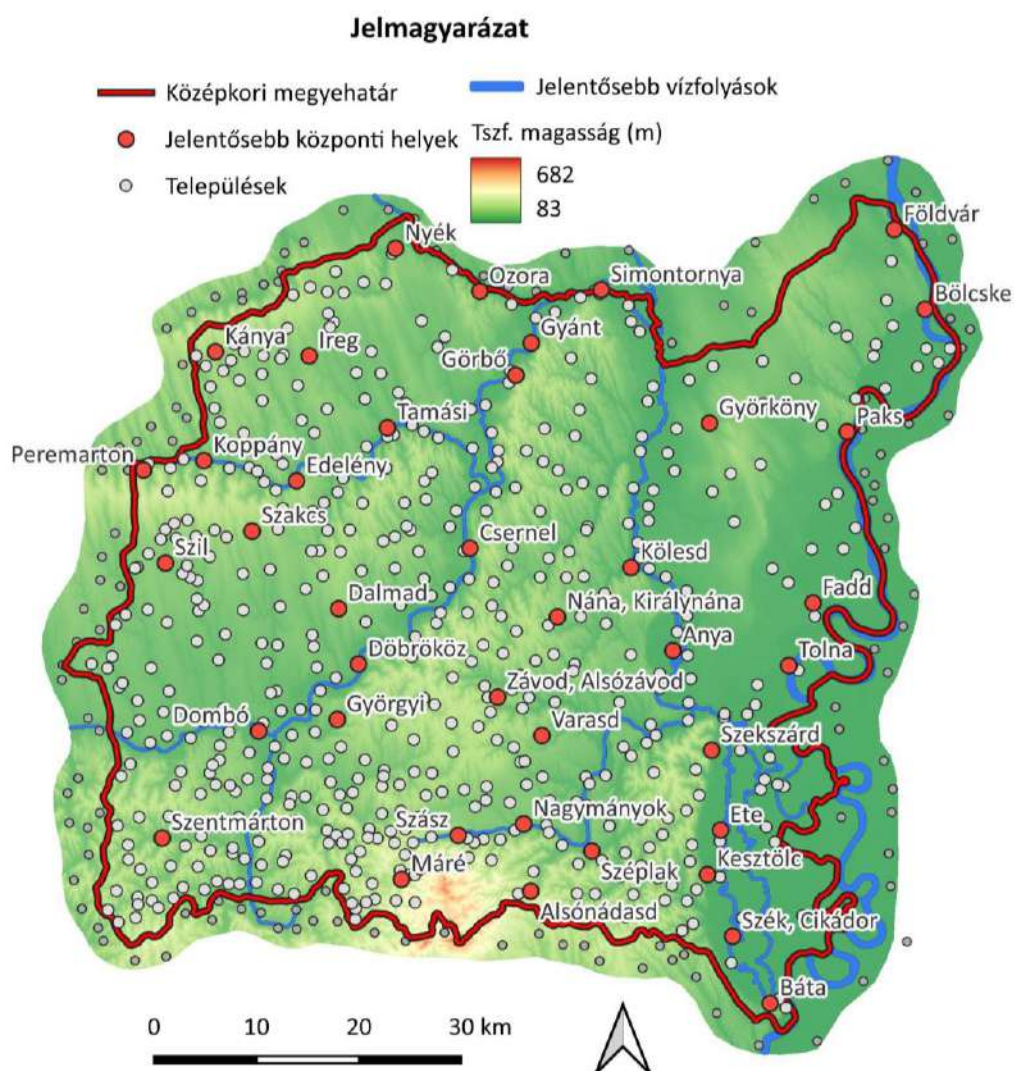
Egykor használt, ma már nem létező útvonalak azonosítása összetett kutatási feladat. A tájhasználat, a domborzati viszonyok és a vízrajzi és más helyi adottságok ismerete mellett az egykori útvonalak rekonstruálásához a régészet, a térbeli elemzések és a történettudomány ismeretanyagának fahasználása is elengedhetetlen. A szakdolgozat fő célja egy ismert megközelítés, a legkisebb költségű utak modellezés eredményes alkalmazása egy középkori vármegye úthálózatának vizsgálatában. Az elemzés változatos domborzati formákat és vízrajzi tényezők által dominált területet is érint, az utak száma túlmutat egy hagyományos útelemzésen. Módszertani újdonságnak tekinthető, hogy egy szervesen kialakult területi egység teljes úthálózata a vizsgálat tárgya. Tolna vármegye középkori településtörténete és az egykori utak kérdése is alaposan feldolgozott tanulmányok sorában. A kiinduló részletes településtörténeti adatok, és a jól definiált költség tényezők teszik lehetővé az elemzés végrehajtását a jelentős méretű úthálózaton. Ehhez nélkülözhetetlen a térbeli elemzés előkészítése és a legkisebb költségű útszámítás átgondolt implementációja. A legfontosabb lépés az utak vonalvezetését meghatározó tényezők, és ezáltal az ismert utak helyes visszaazonosítása, amelyre egy egyszerű úthálózati szintű LCP modellezés épül rá

Az első fejezet az irodalmi háttérrel, az útelemzés előzményeket és módszertanát tárgyalja. Bemutatja a középkori utak történeti és régészeti kutatásainak eredményeit, kiemelt figyelmet szentelve középkori Tolna vármegye útjainak bemutatására. Emellett ismerteti a minimális költségű utak modellezésének elméleti alapjait és gyakorlati alkalmazási lehetőségeit. A második fejezetben a 16. század eleji településhálózat bemutatása, térbeli elemzés módszertanának és a modellezés értelmezéséhez szükséges keretrendszer, az alkalmazott útkereső A* algoritmus leírását tartalmazza. A harmadik fejezet a lejtő- és vízrajzi modellezés, valamint az LCP elemzés előkészítésének lépéseit tárgyalja, továbbá bemutatja a költségfüggvények működését és szerepét az elemzésben.

A negyedik és ötödik fejezet a régészetileg azonosított utak modellezését és annak eredményeit, a meghatározott költségfüggvényeket és térség úthálózatának egy áttekintő rekonstrukcióját mutatja be. Figyelmet fordít az alkalmazott módszerek hatékonyságának és korlátjainak értékelésére. Ezt követi végül a végrehajtott elemzés értékelése, a lehetőségek és további kutatási irányok ismertetése. Tartalmi korlátok miatt az elemzést leíró ábrák egy részét, és az út generáláshoz használt kódot lényeges sorait a Függelék tartalmazza.

A középkori Tolna vármegye a 16. század elején

A kiválasztott terület Magyarország déli részén fekvő középkori Tolna vármegye, amely jelentősen nagyobb közigazgatási egység volt keleti és déli irányban újkori utódjánál. Északon nagyjából azonos a mai és a középkori vármegye határa egykor Veszprém és Fejér vármegyével is, míg nyugatról mindig a Duna és annak ártere jelentette a határt, azon túl Fejér vármegye Solti széke és Bodrog vármegye, melyben az újkori mederszabályozások hoztak változást. Délen a Mecsek legmagasabb vonulatai jelentették a határt, nagyjából Komló által magasságában, keletről pedig Tabtól és Kaposvártól keletre húzható délnyugat-északkeleti vonal jelentette a Somogyi határt.¹ Meghatározó vízfolyásai a Duna, Kapos, Sár(víz), Füze-gy (Koppány), Sió és



1. ábra. Tolna vármegye települései a középkor végén (saját szerkesztés)

¹ K. Németh András, *A középkori Tolna megye települései. Településtörténeti adattár.* (Kézirat, 2015), 420–421.

voltak, ahogy manapság. Északkeleti részeken a Mezőföld homokos, lankás területei uralják, amelyet délkeleten fokozatosan a Tolnai-Sárvíz-völgy vált fel. A középső területeket a Tolnai-dombság kistájai határozzák meg a Kapos és a Sárvíz völgye között, a tagolt domborzat magassága északról déli irányba a Mecsek irányában fokozatosan emelkedik. Az egykori vármegye keleti harmadát a változatos, jellemzően lankásabb és vízfolyásokkal szabdalta Külső-Somogy dombos vidéke jelenti.²

A terület közel 4500 km²-t ölel fel, amely a középkor végén a Magyar királyság egyik legsűrűbben lakott megyéje volt, több mint 600 településsel, azonban kevés jelentős helyiséggel, amelyet a domborzati tagoltság mellett két jelentős központ, Pécs és Fehérvár közelsége magyaráz.³ A térség két okból alkalmas 16. századi eleji utak és az úthálózat vizsgálatára. Egyrészt a török hódoltság időszakát követező pusztítás miatt az egykori településhálózat nagyjából megsemmisült, azonban írott és régészeti adatokból az egykori települések túlnyomó része azonosítható. Másrészt a változatos, és markáns topográfia kedvező térbeli elemzés végrehajtásához, jól értelmezhető a terület nagy részén a domborzati és vízrajzi viszonyok. A terület késő középkori útjait számos kutatás érintette, amelyek referenciaként szolgálnak a helyi utak jellemzőinek az azonosításában.

² Ádám László, Marosi Sándor, és Szilárd Jenő, szerk. *A Dunántúli-dombság: Dél-Dunántúl. Magyarország tájféldrajza (4)*. (Budapest: Akadémiai Kiadó, 1981), 19–21.

³ K. Németh András, „Tolna megye központi helyei a középkorban,” *URBS: Magyar Várostartörténeti Évkönyv VIII* (2013): 223.

1. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

Régészeti korú utak és úthálózatok modellezése szükségszerűen több tudományterület tapasztalatára és eredményeire támaszkodik. Történeti kontextus nélkül nem lehet megérteni az utak szerepét és az úthálózat kialakulásában meghatározó jelenségeket. A földrajzi környezetben maradandó nyomok, a használathoz kapcsolódó régészeti megfigyelések egyértelmű bizonyítékokat szolgáltatnak az egykori, esetenként kortárs forrásokban említett használatról. Az utak értelmezéséhez a közelmúlt és a jelen, az élő közösségek vizsgálata és működésének ismerete szintén fontos szerephez jut. Ez a középkori utak gyakran jelenkorig tartó használatában, a fennmaradt helynévanyagban is megmutatkozik.⁴

Az utak kérdéskörét modellezési feladatként a földrajzi környezeten keresztül érdemes vizsgálni, vagyis térbeli elemzésként. A térinformatikai programok eszköztára egyszerre alkalmas az utakat meghatározó jelenségek megjelenítésére és a megfelelő paraméterek mentén útkereső algoritmusok implementációjára. Az, hogy ennyi eltérő szemszögből vizsgálhatunk egy kérdést, a szinergiák mellett kockázatot is jelent. Az útvezetés modellezését és az ezt meghatározó költség optimalizálásának problémáját, a megfelelő előkészületek és korlátok mellett érdemes a végrehajtani. A szakirodalmi előzmények árulkodnak ebben a tekintetben, jellemző, hogy egyes úttípusok kerülnek az átgondolt elemzések fókuszában, alaposan kiválasztott paraméterek alapján.

1.1. Középkori utak és úthálózatok módszertani kutatása

Történeti és településföldrajzi kutatások

A szárazföldi útvonalak az egyetlen állandó civilizációs kapcsolatot jelentették történelmünk időtartamának túlnyomó részében. A hangsúly mindig a jelentős és maradandó útvonalakon volt, legyen az a Római Birodalom kiépített úthálózata, Inka birodalom hegyi útjai, vagy a közép-Ázsián keresztül futó Selyemút.⁵ Ennek oka abban rejlett, hogy az ezekhez hasonló, fontos útvonalak határozták meg több esetben történelem eseményeinek a lefolyását, birodalmak virágzását és hanyatlását. Középkori Európa útjaiak kutatása kevésbé tűnik

⁴ Bővebben: K. Németh András és Máté Gábor, *Horhosok, puszták, bűvölíkok: Tájéztörténeti tanulmányok a 16–18. századi Dél-Dunántúlról. Studia Ethnologica Hungarica* (20). (Budapest: Pécsi Tudományegyetem Bölcsészettudományi Kar Társadalmi Kapcsolatok Intézete Néprajz-Kulturális Antropológia Tanszék; L'Harmattan, 2020).

⁵ M. G. Lay, *Ways of the World: A History of the World's Roads and of the Vehicles That Used Them*. (New Brunswick, NJ: Rutgers University Press, 1992), 45–47., 90.

érdekesnek szembeállítva a magasabb minőséget képviselő, ókori római utakkal, melynek jelentős szakaszai fennmaradtak napjainkig, és magát a középkori úthasználatot is nagy mértékben meghatározták. Erre utal az is, hogy a középkori utakat érintő történeti és módszertani összefoglalók először a 20. század második felében jelentek meg. Kiemelendő Michael Aston régész nagyhatású könyve Angliában saját tájrégészeti kutatásairól. Az összefoglaló kötetben nem csak az utak fizikai jelenlétét vizsgálta, hanem azokat a társadalmi, gazdasági és kulturális tényezőket is, amelyek meghatározták kialakulásukat és fejlődésüket, hálózat és kapcsolat alapú szemlélet hangsúlyozva. Rámutatott arra, hogy az utak létrejöttének hátterében összetett, időben is változó szempontok álltak. Kiemelten foglalkozott az úthálózat különböző szintjeivel, a helyi lakosság életében meghatározó utakkal, és az úthálózat mintázataival is, amely a középkori angol vidéket jellemezte.⁶

Hazánkban történeti utak vizsgálata hosszú múltra tekint vissza,⁷ amelynek gyökerei a történeti előzményekben keresendők. A római kori úthálózat a Dunántúlon meghatározó szerepet játszott a történelem folyamán később itt letelepedő népek közlekedésében és térhasználatában, így középkori úthálózat alakításában is,⁸ nem véletlen, hogy az időtálló úthálózat jelentős részletei dokumentáltak.⁹ A középkori utakról több történeti és régészeti kutatás ellenére viszonylag kevés módszertani megközelítésű és átfogó munka született. Ezek többsége Szilágyi Magdolna nevéhez köthető, kutatásai számos tanulmányban megjelentek, Vas megyei 13.-14. századi úthálózatról, vagy a fent említett római és középkori úthálózat közötti összefüggésről. Nevéhez kapcsolódik egy angol nyelven megjelent könyv az közelmúlt útkutatási eredményeinek összegzését tartalmazza.¹⁰ A kelet-közép-európai régió középkori úthálózatainak jellegzetességeit, az út használatának emlékanyagát, részletezve a korábbi tájtörténeti, és régészeti, terepi kutatások megfigyeléseit, az utak fizikai jellemzőire is kitérve. A történeti források alapján rendszerezte az fő útvonalak használatának főbb ismertetőjegyeit, az utakat Michael Aston nyomán egy helyi hierarchikus rendszerben értelmezte. Ezt az út

⁶ Michael Aston, *Interpreting the Landscape: Landscape Archaeology and Local History*. (London: Routledge, 1985), 138–148.

⁷ Lásd: Glaser Lajos, „A Dunántúl középkori úthálózata,” in *Századok* 63–64 (1930)

⁸ Szilágyi Magdolna, „Római utak a középkori Dunántúlon: Az utak nevei és szerepük a középkori térszervezésben,” *Történelmi Szemle* 56, no. 1 (2014): 14–19.

⁹ Bődöcs András, *A római kori úthálózat térinformatikai vizsgálata a mai Magyarország területén*. Doktori disszertáció. (Budapest: ELTE BTK, Régészettudományi Intézet, 2008)

¹⁰ Szilágyi Magdolna, *On the Road: The History and Archaeology of Medieval Communication Networks in East-Central Europe*, 35. kötet, *Archaeolingua: Series Minor* (Budapest: Archaeolingua, 2014),

hierarchiát elsősorban a betöltött úthálózati szerepkör határozta meg, a főútvonalaktól a legkisebb helyi utakig bezárólag.¹¹ Az utak meghatározásában a szakdolgozat a felvázolt hierarchia rendszerre támaszkodik.

Az utak és a településtörténet összefonódó kutatásai az elmúlt évtizedekben számos figyelemreméltó, leíró munkát eredményeztek. Rosta Szabolcs a Kiskunság 13–16. századi településtörténetének vizsgálatáról szóló disszertációjában a régészeti és térképészeti adatok összevetésével arra világított rá, hogy a középkor után elpusztult településhálózat úthálózata tovább élt az újkorban.¹² Fejér megyében Stibrányi Máté szintén doktori disszertációjában a középkori úthálózat és a templomok kapcsolatát elemezte. Kutatásában írott forrásokat, a településhálózati elemzéseket és középkori templomok adatokat használta elsősorban, hogy az megye középkori úthálózatát részlegesen rekonstruálja.¹³ Legutóbbi időben Pánya István történeti földrajzi és topográfiai kutatásai említhetők a középkori Bodrog és Solt vármegyék területén, amelyek újszerű megközelítést hoztak. A térképészeti és történeti hagyományos adatgyűjtésre kiindulópontként tekintve, kutatásait térinformatikai módszerekkel (térképek georeferálása) és távérzékelési eljárások bevonásával bővítette. Egykori utak azonosítását történeti adatokból kiindulva tette,¹⁴ ezen felül alapos elemzésnek vetette alá az eddig kevésbé hangsúlyos, településen belüli úthálózatokat az középkor során nagy pusztulást elszenvedett Alföldön.¹⁵

Tájrégészeti, néprajzi kutatások

A 21. században a különböző távérzékelési és képalkotás módszereknek köszönhetően rendkívüli részletességgel megismerhetővé váltak történeti tájak, bennük felhagyott utak is,

¹¹ Szilágyi, *On the Road*, 89–91.

¹² Rosta Szabolcs, *A Kiskunsági Homokhátság 13–16. századi településtörténete*. Doktori disszertáció. (Kecskemét: Katona József Múzeum, 2014), 288–306.

¹³ Stibrányi Máté, *Fejér megye középkori templomos helyei*. Doktori disszertáció. (Budapest: ELTE BTK, 2015), 55–117.

¹⁴ Pánya István, „Úttalan utakon. Adatok a késő középkori Bodrog vármegye úthálózatához,” in *Mohács szimfónia: Tanulmányok a mohácsi csatával kapcsolatos kutatások eredményeiből*, szerk. Varga Szabolcs és Türk Attila (Budapest: Pázmány Péter Katolikus Egyetem BTK, Régészettudományi Intézet, Martin Opitz Kiadó, Duna-Dráva Nemzeti Park Igazgatóság, 2022), 47–60.

¹⁵ Pánya István, *A hódoltsági területek középkori és kora újkori településtopográfiájának kutatási módszertana Bács, Bodrog és Solt vármegyék példáján*. Doktori disszertáció. (Szeged: SZTE TTIK, Földtudományok Doktori Iskola, 2022), 99–111.

elsősorban a LIDAR technológiának köszönhetően.¹⁶ A távérzékelési lehetőségek tájrégészeti szempontból szisztematikus felhasználása még formálódóban van, de egyértelműen forradalmi eszközök a történeti tájhasználat azonosításában és megértésében. Azonban a terepi régészeti, vagy a néprajzi premodern tájhasználat kutatása továbbra is legalább olyan fontos az utak értelmezésében. Utóbbira egyedülálló példa Máté Gábor etnológus Mecsekhát kistáját érintő, átfogó kutatásai.¹⁷ A vidék tájhasználatának évszázadok folyamán történő változásaiban jelentős szerepet volt az utaknak és kapcsolati hálók kialakulásának. A vizsgálata a közlekedés, a vonalvezetés és az útrendszer helyi működésének értelmezésére terjedt ki, bemutatva a környezeti hatásokat és helyi utak morfológiai jellemzőit.¹⁸ A helyi utakat csoportosította a rendeltetés függvényében, ez a csoportosítás különbözik a történeti utak esetén megfogalmazott úthierarchiánál, granulárisabb felosztást követ (falvak közötti regionális utak, szomszédos falvak közötti utak, helyi utak), azonban a kétféleképp.



2. ábra. Felhagyott dűlőút Tamási határában, 2020. (Máté Gábor felvétele)

Forrás: K. Németh és Máté, „Horhosok, puszták, bűvőlikak”, 54.

Megállapította, hogy a középkori tájhasználat nyomai szervesen kapcsolódtak az újkori használatához, az egykori útvonalak maradványait jellegzetes bevágódott mélyutak, „horgosok” vagy „horhosok” képében azonosíthatók a területen. Emellett szemléltette a régi típusú

¹⁶ Például C. Parcero-Oubiña, C. Smart, és J. Fonte, „Remote Sensing and GIS Modelling of Roman Roads in South West Britain,” *Journal of Computer Applications in Archaeology* 6, no. 1 (2023): 62–78., és Gáti Csilla, „Légi lézerszkennelés eredményei a Pécs melletti Jakab-hegyen: Óskori földvár, középkori kolostor,” *Magyar Régészet*, 6, sz.3, (2017) 12–20.

¹⁷ Máté Gábor, *A Mecsek-vidék tájtörténete: Táj és ember viszonyának változása háromszáz év tükrében*. . Doktori disszertáció. (Pécs: PTE TTK, 2013),

¹⁸ Máté Gábor, „A helyi úthálózat kutatásának néprajzi és településtörténeti kérdései”, *Ethnographia* 125,sz.4, (2014) 571–587.

középkori útszerveződés, a települések közötti kapcsolati háló felbomlását és átalakulását. Megfigyelései a középkori Tolna vármegye déli területét érintették, releváns adatokkal szolgáltak a helyi domborzatviszonyok, térszerveződési és utak vonalvezetési mintáinak azonosításában.

A helyi környezet terepi régészeti útkutatásai alapvetően K. Németh András nevéhez köthetők, aki Tolna vármegye középkori múltjának ezt a részletét behatóan vizsgálta. Megfigyeléseinek középpontjában elsősorban a helyi sajátosságok, lelőhelyek közötti felhagyott útszakaszok, valamint az írott és helynévi emléanyag térbeli azonosítására áll.¹⁹ Kiemelendő a mélyutak, gázlók különböző úttípusok, „útkötegek” maradványainak azonosítása, amelyeket szerencsés esetben a táj vagy a föld megőrzött. a Máté Gábor és K. Németh András megfigyelései kiváló alapot nyújtottak az útmodellezési elemzések elvégzéséhez. A kutatási terület földrajzi környezete rendkívül tagolt és változatos. Az erózió hatásának kitett lösz talajban markáns nyomai maradtak a tájhasználatnak. Tapasztalataikat és legújabb megfigyeléseiket közös tanulmánykötetben összegezték a közelmúltban, előnyben részesítve hivatkozom korábbi tanulmányokhoz képest az új adatokra az elemzés során.²⁰

1.2. Út-költség elemzések

Minimális költségű utak problémája és megoldó algoritmusok

A gráfelmélet egyik kiinduló problémája a legrövidebb utak azonosítása, amely számos gyakorlati kérdésben fontos szerepet játszik, illetve játszott a számítástudomány korai fejlődése során. A GPS- és térkép-alapú útkereséstől kezdve a robotikán át a hálózatkutatásig és a logisztikai problémák hatékony megoldásáig a kérdéskör rendkívüli jelentőséggel bír. Matematikai megfogalmazása az a legrövidebb út problémának:

„Adott egy élsúlyozott, irányított $G = (V, E)$ gráf, ahol $w : E \rightarrow \mathbb{R}$: súlyfüggvény rendel az élekhez valós értékeket. A $p = v_0, v_1, \dots, v_k$ út súlya az utat alkotó élek súlyainak összege: $w(p) = \sum w(e_i), e_i \in p$. Definiáljuk az u -ból v -be vezető legrövidebb út súlyát:

¹⁹ K. Németh András, „Adatok Tolna megye középkori útjainak kutatásához,” in *Fiatal Középkoros Régészek V. konferenciája* (Ferenczy Múzeum, Szentendre, 2013. november 21–23., 2014) 177–188.

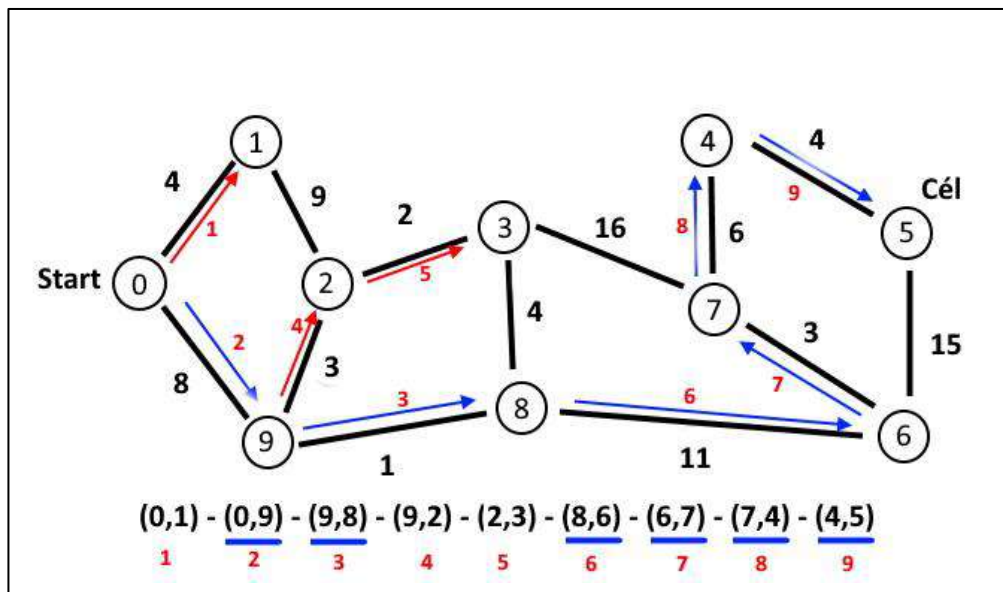
²⁰ K. Németh és Máté, *Horhosok, puszták, bűvölíkok: Tájérténeti tanulmányok a 16–18. századi Dél-Dunántúlról*.

$$\delta(u, v) = \begin{cases} \min \{w(p) : u \xrightarrow{p} v\} & \text{ha vezet út } u - \text{ből } v - \text{be,} \\ \infty & \text{különben.} \end{cases}$$

Egy az u csúcsból a v csúcsba vezető legrövidebb úton az olyan p utat értjük, amelyre $w(p) = \delta(u, v)$ teljesül.”²¹

A legrövidebb út problémának több változata létezik attól függően, hogy a megközelítés egy kiinduló csúcsra, egy adott csúcspárra, egy célcsúcsra, vagy csúcspárok egy halmazára vonatkozik. Az ilyen problémák megoldására irányuló algoritmusok a 20. század közepétől írták le, azóta széles körben alkalmazzák az eljárásokat. A legismertebb megoldás az egyetlen kiinduló csúcsból tetszőleges célcsúcsba vezető legrövidebb utakat azonosító Dijkstra-algoritmus,²² amely akkor működik, ha az gráf élsúlyai nem negatívak. Negatív súlyú élek esetén más algoritmusokat alkalmaznak, például: A Bellman–Ford algoritmus az egyetlen kiinduló csúcsból vezető utak meghatározására,²³ a Floyd–Warshall algoritmus pedig az összes csúcspár közötti optimális utak keresésére leginkább alkalmas megközelítés.²⁴

Egy egyszerű, élsúlyozott gráf példáján keresztül jól szemléltethető a Dijkstra-algoritmus és az útkereső algoritmusok általános logikája (lásd X. ábra). A piros számok az adott lépésben a



3. ábra. Példa a minimális költségű útkereső algoritmus működésre egy egyszerű élsúlyozott gráfon $v(0)$ és a $v(5)$ csúcs között (saját szerkesztés)

²¹Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, és Clifford Stein, *Új algoritmusok* (Budapest: Scolar Kiadó, 2003), 500.

²²E. W. Dijkstra, „A Note on Two Problems in Connexion with Graphs,” *Numerische Mathematik* 1 (1959) 269–271.

²³Thomas H. Cormen et al., *Új algoritmusok* 507–510.

²⁴Thomas H. Cormen et al., *Új algoritmusok* 540–545.

legkisebb költségű él kiválasztását jelzik. Az algoritmus minden lépésben a lehető legkisebb költségű lépést választja és addig halad, amíg el nem éri a célcsúcsot, vagy van lehetséges nem vizsgált lépés. Ez esetben a legkisebb költségű utat a kékkel jelölt élek alkotják (2,3,6,7,8,9). Minden lépéshez az algoritmus eltárolja az előző lépést, majd a számítás végén, a célcsúcstól visszafelé haladva lépések láncolatán visszafelé határozza meg az optimális útvonalat a kiindulási pontig.

A térbeli elemzésekben jellemzően pozitív élsúlyokkal reprezentálják a költségeket, például távolság, idő vagy erőforrás-felhasználás formájában. Ennek köszönhetően a Dijkstra-algoritmus megközelítése a legnépszerűbb választás a gyakorlatban.

Legkisebb költségű utak a térbeli elemzésekben

A térinformatikában sokoldalú eszköz az útelemzés, melynek egyik komponense az optimális vagy legrövidebb utak számolása. Nem véletlen, hogy legkisebb költségű út (Least Cost Path, LCP) számolásnak nevezik, ezzel hangsúlyt helyezve a sokoldalú költség tényezőkre. Alapvetően földrajzi egységek vagy áttételesen fizikai mennyiségeket jelképező költségek a mérvadóak, elsősorban a domborzat, vízrajz, közvetve az úton haladáshoz szükséges idő és energia. Azonban használatosak szabály, vagy infrastruktúra alapú költségek is, gépjárművek úttervezése esetén fizetős autópályák, az utak maguk is súlyozhatók a forgalmuk nagysága szerint. Általában kezdő és végpont, esetleg végpontok sokasága között történik az útelemzés. A klasszikus térbeli elemzésekben az LCP alkalmazási területe az útvonalak összehasonlítása úttervezési célból, ahol a vizsgálat célja lehet az várható költség,²⁵ hatékonyság, biztonság vagy járható út a meghatározása. Egy másik fontos alkalmazási terület a csőrendszerek²⁶ vagy vízelvezető csatornák tervezése. A lejtés, a talajtípus és a potenciális akadályok költségbecslése fontos szerepet bír az építésükkor.

Költségek számítása és értelmezése

A költségek módszertani megközelítése változatos, általában a rendelkezésre álló adatok határozzák meg a lehetőségeket. Amennyiben kevés a paraméter és egyszerű az út és környezetének definíciója, önkényes költségmeghatározás szintén kézenfekvő lehet. Ha

²⁵ Joacim Gärdss és Martin Oscarsson, *Exploring the Use of GIS-Based Least-Cost Corridors for Designing Alternative Highway Alignments* (BSc diss., KTH, School of Architecture and the Built Environment, 2019)

²⁶ S. C. Feldman, "GIS, Remote Sensing Analysis Used to Select Potential Route," *Pipeline and Gas Industry* 79, no. 5 (1996) 52–55.

valóságghű útelemzésről van szó, összetett és fizikai, és teljesítmény méréseken alapuló paraméterezés a jellemző.²⁷ A leggyakrabban felhasznált domborzat esetén a lejtőn a különböző lejtőszögeken való áthaladás költségét adják meg. A tapasztalati energiabefektetést vagy az út megtételéhez szükséges időt szokták felhasználni a számításhoz.²⁸ Tényező a lejtő megközelítésének az iránya amennyiben lejtő és emelkedő közötti más a haladási költség, általában egy módosított költségfüggvényt alkalmaznak ezekben az esetekben.²⁹ A talaj tulajdonságainak mérését is hasonló megközelítéssel alapozzák meg, azonban komparatív súlyozást alkalmaznak, általában egy referencia-haladási felülethez igazítva más talajtípusok áthaladási költségét. Vízrajz esetén egyszerűbb költség tényezők a jellemzők, amely az út számára feltételezhetően kedvezőtlen területek elkerülésére ösztönzi az LCP útvonalat, ritkán kerül sor differenciált költségek meghatározására.

1.3. Régészeti célú útmodellezések

Az úthálózatok modellezése a régészeti kutatásokban releváns kérdés, amely általában kiegészíti a terepi kutatások eredményeit. A térinformatikai szoftverekkel nagyjából egyidősek az régészeti témában készült kutatások, és széles szakirodalomban tárgyalt módszertani megközelítések tárháza. A cél általában történeti korok fontos szárazföldi kapcsolatainak, kommunikációs csatornáinak feltérképezése. Szintén bevett módszer egyes régió vagy település környezetében, a tájhasználat rekonstrukciója, a közösségek közötti kapcsolati hálók azonosításában. A kutatások számosságára tekintettel a releváns munkák említésére korlátozódik az irodalmi háttér ismertetése.

Legkisebb költségű utak (LCP)

Az alapvető megközelítés az optimális útvonalakon keresztül vizsgálni az egykori szárazföldi kapcsolatokat. A modellezés feltételezése ebben az esetben az, hogy az emberi közösségek útjainak a kialakításában a hatékonyság volt a vezérlő elv. Ez a természeti környezetben haladást befolyásoló tényezők, a mobilitáshoz szükséges energia, valamint az időfelhasználás szerinti optimalizációt egyaránt takarhatja. Egyes esetekben a modell kiegészülhet régészeti,

²⁷ Herzog, Irmela. "Least-cost Paths – Some Methodological Issues." *Internet Archaeology*, 36, (2014), 5.

²⁸ K.M. Gowen és T.S. de Smet, "Testing Least Cost Path (LCP) Models for Travel Time and Kilocalorie Expenditure: Implications for Landscape Genomics," *PLOS ONE* 15, 9 (2020)

²⁹ Joseph Lewis, "Explaining Known Past Routes, Underdetermination, and the Use of Multiple Cost Functions," *Journal of Archaeological Method and Theory* 31 (2023) 854–874.

antropológiai és kultúrtörténeti adatokkal, amelyek árnyaltabbá tehetnek egy térhasználat vizsgálatot.³⁰

A régészeti célú LCP útelemzés leginkább elismert kutatója Irmela Herzog, akinek évtizedes munkássága az LCP régészeti célú felhasználásának minden aspektusát érintette. Tanulmányainak jelentős része módszertani kérdésekre fókuszál, egyaránt támaszkodik a saját modellezési tapasztalatokra, és korábbi elemzésekre. A jelentős számú, kisebb lélegzetvételű elemzés eredményeit Herzog átfogó módon feldolgozta. A részletekbe menő és értékes megfigyeléseire és összegző munkáira nagy mértékben támaszkodott a dolgozat szempontrendszer.³¹ Kutatásai kiterjedtek az úthálózati modellezésben alkalmazott optimális útkeresés lehetséges lépéseire, a költségfüggvények kiválasztására, a domborzatmodell előkészítésére, valamint a modellezett utak stabilitásának kérdésére.³² A németországi és dél-amerikai utakon végzett kutatásain keresztül rámutatott a módszer korlátaira és veszélyeire, mint például a bemeneti téradatok pontosságának validálása, a kutatott korszaktól való időbeli távolság, illetve az útelemzés előkészítésének és dokumentálásának hiányosságai. LCP elemzések megközelítésében egy egyszerű kiindulói modellt javasol, a költségfüggvény megválasztását pedig az vizsgált úttípus függvényében célszerű elvégezni, különös tekintettel a leginkább meghatározó lejtőszögre.³³

Nagy léptékű vizsgálatok is napvilágot láttak, kiváló példa erre Seifried és Gardner tanulmánya, amely a Peloponnészosz egyik félszigetén már korábban azonosított, történeti utakon tesztelt több lehetséges LCP alapú útköltség-számítási módszert. Grafikusan értékelték a kapott modelleket, fő szempontként a valós utak azonosítását jelölték ki. Megközelítésükkel nemcsak a modellek megbízhatóságát vizsgálták, hanem azonosították a valószínű alternatív útvonalakat is, és a fontosabb épületek, tájékozási pontok hatását is belevették az elemzésbe.³⁴

³⁰ Herzog, Irmela. "Least-cost Paths – Some Methodological Issues." 5.7

³¹ Irmela Herzog, "The Potential and Limits of Optimal Path Analysis," in *Computational Approaches to Archaeological Spaces*, szerk. A. Bevan és M. Lake (Point Reyes, CA: Left Coast Press, 2013) 179–211. és Herzog, "Least-cost Paths – Some Methodological Issues."

³² Irmela Herzog, "Issues in Replication and Stability of Least-Cost Path Calculations," *Studies in Digital Heritage* 5, sz. 2 (2022) 131–155.

³³ Herzog, "Least-cost Paths – Some Methodological Issues." 6.

³⁴ R.M. Seifried, és C.A.M. Gardner, "Reconstructing Historical Journeys with Least-Cost Analysis: Colonel William Leake in the Mani Peninsula, Greece," *Journal of Archaeological Science: Reports* 24 (2019) 391–411.

Magyarországon kevés esetben alkalmazták a módszertant úthálózatok értékelésében. Stibrányi Máté említett munkájában érintett az LCP használatot és lehetőségeit.³⁵ Pető Zsuzsa a Pilis történeti főútjainak az vizsgálatában, mint segédeszköz alkalmazta az LCP modellezést. A római úthálózat nagy mértékben alkalmazkodott az útelemzés által kirajzolt optimális nyomvonalhoz. A későbbi középkori utak nagy mértékben követik a korábbi úthálózatot, de a fontosabb térszervező erőt képviseltek az optimális útvonalak, amelyet a jelentős kolostorok elhelyezkedése sejtet.³⁶

Összetett elemzést Mesterházy Gábor végzett az LCP alkalmazásával. Az Alföldön, a Tisza árterében kiválasztott terület azonosított régészeti lelőhelyei adták a kiindulási alapot. Jelentősebb régészeti korszakok helyi kapcsolati hálózatának rekonstrukcióját kísérelte meg és vizsgálta összehasonlító elemzésben. Különlegességét a vizsgált földrajzi környezet adja a tanulmánynak. A terület síkvidék, a domborzati különbségek minimálisak, amely az LCP elemzések esetén kiemelt szereppel bír. A szerző összetett és jól differenciált hidrológiai modellezéssel teremtette meg az alapvető költségelemeket a későbbi költség számításhoz. Az eredményként kapott úthálózatokban összehasonlította az LCP eredményeket hálózatelemzési eszközökkel. Fő eredményként az egyes úthálózati elemek és a gerinchálózat időbeli állandósága, a vízrajz költségelés lejtőszöget helyettesítő szerepe emelhető ki.³⁷ A szakdolgozat vízrajzi modellezéséhez a tanulmány alkalmazott módszertana és eredményei szolgáltak referenciapontként.

LCP Hálózatelemzési megközelítésben

Hálózatelemzési eszközök a kapcsolati hálók modellezésére az LCP-vel esetenként együtt alkalmazott megközelítés, melyről érdemes szót ejteni. A legfontosabb ismervük, hogy túllépnek két helyszín közötti útvonalelemzésen, és komplex hálózati összefüggéseket tárnak fel, figyelembe véve a térhasználat és mozgás összefüggéseit. Lényegében helyek közötti kapcsolatrendszerek és azok hierarchiájának vizsgálatára fókuszál. A módszer lehetővé teszi a helyek közötti interakciók elemzését, központi és más hálózati mutatók segítségével. Előnye, hogy kiegészíti az LCP gyengeségeit, amelyek a kapcsolati és társadalmi tényezők költségei jelentenek. Philip Verhagen és munkatársai átfogó tanulmányokban kombinálták a

³⁵ Stibrányi, *Fejér megye középkori templomos helyei*, 116–119.

³⁶ Pető Zsuzsa Eszter, "Római vagy középkori? Történeti utak a Pilisben," *Magyar Régészet*, sz. 6, 3 (2014) 1–8.

³⁷ Mesterházy Gábor. "Legkisebb költségű úthálózatok modellezése síkvidéki környezetben a neolitikumtól a középkorig." *Communicationes Archaeologicae Hungariae* 2017 (2018) 173–192.

legkisebb költségű útvonalak és a hálózatelemzési technikák módszereit, különös tekintettel a régészeti lelőhelyek alapján történő településazonosításra.³⁸ Carroll és Carroll tanulmánya a mediterrán térségben az ókori kapcsolatok példáján mutatja be a hálózati elemzést, amely a legkisebb költségű hálózatok rekonstrukciójából indul ki, nagyobb földrajzi egységen. Három optimalizálási technikát alkalmaznak az ókori utazás vizsgálatára, és módszertanilag megalapozott úthálózat-építési technikákat alkalmaznak. A hálózatépítési problémát az utazási és fenntartási költségek minimalizálásaként közelítik meg, és javaslatot tesznek a szárazföldi hálózatok kombinálásával történő útvonalrekonstrukcióra Ciprus és a Peloponnészosz példáján keresztül.³⁹

1.4. Legkisebb költségű utak modellezésének előnyei és korlátai

A Least Cost Path elemzés sokat próbált eszköz térbeli elemzésekben, ezért jól azonosíthatók erősségei és a gyengeségei a megközelítésnek. Népszerűségében kétségtelenül szerepet játszik, hogy hatékony módszer, és jó eredményeket produkál elemzésekben. Ennek oka, hogy térbeli elemzésekben szinte kivétel nélkül a jó minőségben feltérképezett domborzat a legfontosabb, végeredményre hatással lévő változó. Az általában alkalmazott útkereső Dijkstra algoritmus hatékony és gyors, akár hosszú utak esetén is (megfelelő domborzati felbontáson). Szintén nem elhanyagolható tény, hogy mindig optimális megoldásra jut, és nem igényel nagy előkészítést az elemzés. A modellezés beállításainak ismeretében az eredmények könnyen reprodukálhatók térinformatikai szoftverben. További előnye a megközelítésnek, hogy a módszer tetszőleges útszakaszok vizsgálatára alkalmazható, és a kipróbált, jól teljesítő költségfüggvények széles választéka lehetővé teszi a probléma specifikus elemzést.

Az eljárás nagy legnagyobb potenciális hibaforrása pont az egyszerű végrehajtásban rejlik. A megfelelő elméleti alapok ellenére egy legkisebb költségű útelemzés alapos előkészítést és dokumentációt igényel, elsősorban a költségrétegek ellenőrzése és a paraméterek megfelelő kiválasztása miatt. Az eredmények ugyan jól vizualizálhatók, azonban nehezen számszerűsíthetők, és az összehasonlításukhoz szükséges alapok megteremtése is kihívást

³⁸ P. Verhagen, T. Brughmans, L. Nuninger, és F. Bertoncello, „The Long and Winding Road: Combining Least Cost Paths and Network Analysis Techniques for Settlement Location Analysis and Predictive Modelling,” in *Archaeology in the Digital Era*, szerk. Philip Verhagen és Graeme Earl (Amsterdam: Amsterdam University Press, 2014), 357–366.

³⁹ F. Carroll és E. Carroll, "Budget Travel in the Mediterranean: A Methodology for Reconstructing Ancient Journeys through Least Cost Networks," *Journal of Computer Applications in Archaeology* 5, sz. 1 (2022) 35–56.

jelenthet. Herzog említett ajánlása ezzel összhangban, hogy az eredmények értelmezésekor külön figyelmet kell fordítani a potenciális korlátozó tényezők számbavételére.⁴⁰ Korlátként jelentkezik a régészeti célú útelemzésekénél az is, hogy a vizsgált korszakról rendelkezésre álló információ mennyiségének jelentős hatása van. A hiteles korabeli környezet reprezentálásában, és az elemzés mélységének megválasztásában korlátozhatja a kutatót egy útelemzés, esetleg útrekonstrukció végrehajtásakor.

⁴⁰ Herzog, "Least-cost Paths – Some Methodological Issues." 6.

2. ADATOK, AZ ELEMZÉS MÓDSZERTANA

2.1. Településeket és utakat tartalmazó adatbázisok

A településhálózat elemeit K. Németh András „A középkori Tolna megye települései. Településtörténeti adattár” c. Bolyai János ösztöndíjas dolgozata tartalmazza. A 2015-ben összeállított adattár teljeskörű, történeti és régészeti kutatásanyagot egyaránt feldolgozza Tolna vármegyéről a szerző saját kutatásaival kiegészítve.⁴¹ Amennyiben lehetséges volt, a publikált tanulmányokra hivatkoztam, de kéziratos formában létező adattárra támaszkodtam a lakott helyiségeket jelképező csomópontok és a földrajzi, esetenként a vízrajz (átkelő, vízfolyások) korhű megjelenítésében is. Az elmúlt évek kutatási eredményeit, például újabban azonosított településeket szintén felhasználtam, hogy minél teljesebb településhálózatot érintsen az elemzés. A településekhez kapcsolódó történeti emléktárgyak és a térbeli meghatározásuk – lokalizációjuk – sem részletezett az dolgozatban.

A középkori vármegye területén több mint 700 középkori helyiségnév (település, vagy birtoknév) maradt fenn, ebből nagyjából 600 tekinthető a középkor folyamán lakott, falusias helyiségnek, amely egy közel teljes számnak tekinthető. Az egykori településhálózat szinte teljesen elpusztult a 18. század elejére, ezért teljes név szerinti visszaazonosítás sajnos nem lehetséges minden településnél. Az elmúlt évtizedekben azonban a fennmaradt írott emlékek, földrajzi helynevek és terepi kutatások eredményeinek köszönhetően az egykori települések jelentős részét sikerült azonosítani. A kutatás a 15-16. század fordulóján létezett úthálózatot vizsgálja, ezért az ekkor még lakott és településnek tekinthető, nagy bizonyossággal azonosítható településeket veszi figyelembe. Összesen 551 település felel meg a feltételeknek, tehát teljes településszám ~90%-a.

Az úthálózati kapcsolatok természetesen átváltak a megyehatáron, így szükség volt „segédpontokra” a környező megyékre vonatkozó régészeti, településtörténeti adatok alapján. Baranya vármegyében a településhálózat jó állapotban vészelt keresztül az évszázadokat, ezért ezen a területen a mai településeket használtam fel, kivéve a Duna környékén, ahol a földrajzi helyneveket.⁴² Somogy vármegyében régészeti adatok és helynévi emléktárgyak,⁴³

⁴¹ K. Németh, *A középkori Tolna megye települései. Településtörténeti adattár*.

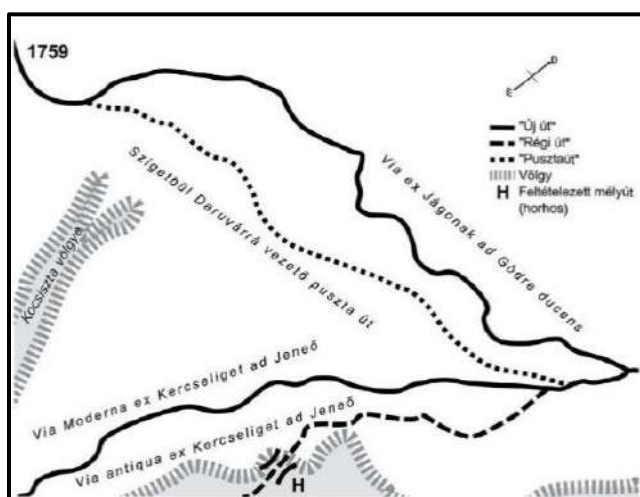
⁴² Pesti János, szerk., *Baranya megye földrajzi nevei I-II. (Pécs, Baranya Megyei Levéltár, 1973, 1982)*

⁴³ Varga Máté régész szíves adatközlése, illetve Papp László és Végh József, szerk., *Somogy megye földrajzi nevei* (Budapest: Akadémiai Kiadó, 1974)

Fejér vármegyében pedig Stibrányi Máté középkori templomokról szóló doktori disszertációjának adatait használtam fel.⁴⁴ Solt és Bodrog vármegye esetén Pánya István átfogó településtörténeti munkásságára támaszkodtam.⁴⁵

2.2. Az elemzéshez kiválasztott útszakaszok

Számos terepi adat származik K. Németh András és Máté Gábor publikált megfigyeléseiből, és ezen felül az elmúlt években útszakaszok tucatjait azonosították a középkori Tolnában. Az egykori utak maradványai változatos morfológiai alakzatok képében maradtak fenn, elsősorban tagolt domborzatú területeken, vagy érintetlen természeti környezetben.⁴⁶ Jelen van ezek között településeket összekötő teljes útvonalak is. A terepi észlelések és a kéziratok térképek útjain felül légi és űrfutókról is azonosíthatók elpusztult középkori településekhez kapcsolódó úthálózati elemek (4. és 5. ábra).



4. ábra. Középkori úthálózat fennmaradt nyomai egy átrajzolt kéziratos térképen (rajz: Máté Gábor)
Forrás: K. Németh és Máté, „Horhosok, puszták, bűvölíkek”, 83.



5. ábra. Elpusztult középkori település Dalmand határában, a településhez kapcsolódó úthálózat nyomaival. Forrás: Google Earth

A terepen azonosított utak nyomvonalait K. Németh András a rendelkezésemre bocsájtotta, a középkoriként azonosítható útszakaszokból összesen 30-at választottam ki az elemzéshez. Ezek az útvonalak ismert középkori lelőhelyek között futottak a használat azonosítható nyomaival, mint bevágódott mélyút vagy egymással párhuzamosan futó nyomvonalak, esetleg kora újkori

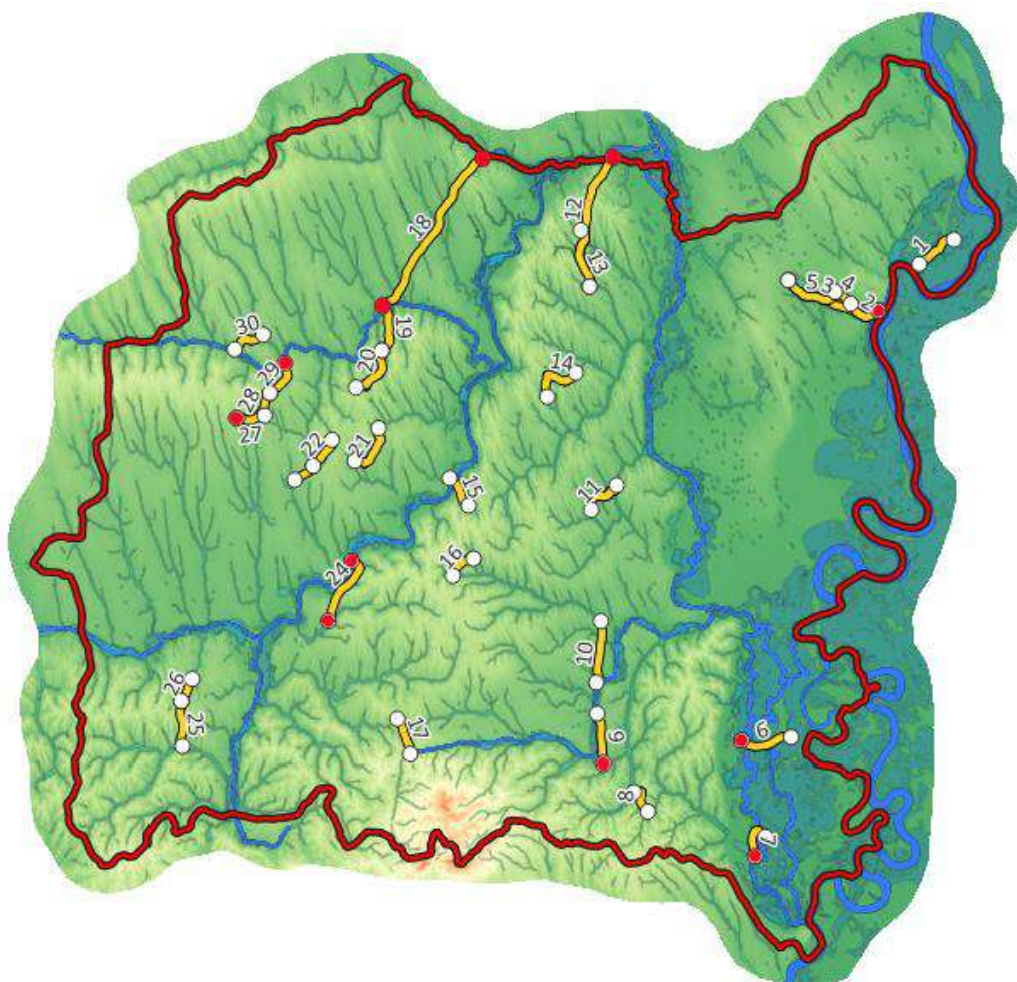
⁴⁴ Stibrányi, *Fejér megye középkori templomos helyei*

⁴⁵ Pánya István, „Fejér megye solti székének történeti földrajza,” in *Alba Regia: Annales Musei Stephani Regis*, 45., szerk. Szöllősy Csilla és Pokrovenszki Krisztián (Székesfehérvár: Fejér Megyei Múzeumok Igazgatósága, 2017), 135–180. illetve Pánya, *A hódoltsági területek középkori és kora újkori településtopográfiájának kutatási módszertana Bács, Bodrog és Solt vármegyék példáján*.

⁴⁶ Máté, „A helyi úthálózat kutatásának néprajzi és településtörténeti kérdései” 580–584.

térképi leírásból azonosítható középkori mivoltuk.⁴⁷ A települések adatait kiegészítettem a Kubinyi András történész által kidolgozott, középkori településhálózatok központi helyeit értékelő pontrendszer⁴⁸ Tolna vármegyére vonatkozó eredményeivel. Azokat a településeket minősítettem középpontinak, amelyek legalább „mezőváros jellegű falvaknak” minősültek a pontrendszer szerint. A központi települések hét település kategóriából a 4-6. kategóriába tartoztak a megye területén, tehát nem volt kiemelkedő középponti település.⁴⁹

Az elemzett útszakaszok két fő kategóriába sorolhatók. Túlnyomó többsége (23 szakasz) két középkori szomszédos település közötti, jellemzően ~2-5 kilométer hosszú utak. A fennmaradó 7 útszakasz a középponti szerepkörrel rendelkező települések kapcsolatrendszeréhez tartozott,



6. ábra. Az elemzés során vizsgált, azonosított útszakaszok (saját szerkesztés)

⁴⁷ K. Németh és Máté, *Horhosok, puszták, bűvölíkok: Tájérténeti tanulmányok a 16–18. századi Dél-Dunántúlról*, 37–48.

⁴⁸ Kubinyi András, *Városfejlődés és vásárhálózat a középkori Alföldön és az Alföld szélén* (Szeged: Dél Alföldi Évszázadok 14, 2000), 13–16.

⁴⁹ K. Németh András, "Tolna megye központi helyei a középkorban," *URBS: Magyar Várostörténeti Évkönyv VIII* (2013): 213–247.

hosszuk ~5-15 kilométer. Egyrészt ezek központi települések közötti összeköttetések (18, 24), másrészt a központi és alárendelt települések közötti kapcsolatok (3, 4, 12, 19, 28). Figyelmet fordítottam arra, hogy az útszakaszok reprezentatív módon lefedjék az összes jellemző domborzati és vízrajzi környezetet, és az utak vonalvezetésénél jelentkező különböző megoldásokat (6. ábra).

2.3. Modellezés során használt eszköztár

Az szakdolgozati téma elsődlegesen térbeli elemzésként értelmezhető, a nyílt forráskódú QGIS térinformatikai szoftvert választottam ki az adatok feldolgozásához és a számítások végrehajtásához. A szoftver előnye a modularitás és az elérhető eszközök széles köre.⁵⁰ Néhány térinformatikai alapfogalom bemutatása elengedhetetlen az elemzés előkészítésének és végrehajtásának az értelmezéséhez. A raszter típusú adatmodellek általában felületet reprezentálnak, amelyek adatpontjai pixelekből állnak és egy felületet alkotnak képekhez hasonlóan. Térbeli elemzésekben koordináta rendszer és földrajzi mértékegységek határozzák meg a terjedelmet és a felbontást.⁵¹ Az útelelemzéshez használt felszín topográfiáját és a költségszámítás bázisát a raszterrétegek reprezentálják. A vektorrétegek mindössze koordináta pontokból álló adatmodellek, amelyekkel pontok, szakaszok, és felületek határozhatók meg a térben.⁵² A létező és modellezett útszakaszok és a településeket jelképező koordináták is vektorrétegekben tárolt adatok az elemzésben. A vektor és raszterrétegeken végzett elő- és utómunkálatokhoz számos beépített függvényt, illetve a GRASS GIS és a SAGA modult használtam.⁵³ Utak modellezéséhez saját, a PyQGIS API-n (alkalmazásprogramozási felület) keresztül futtatott, Python programozási nyelven íródott scripteket használtam, melynek útszámításhoz lényeges kódrészleteit a függelék tartalmazza. Az elemzés során QGIS-ben végrehajtott műveletet zárójelben jeleztem a megfelelő részeknél. Az ábrák és a végeredményként elkészült utak szintén a QGIS felületén készültek. A végrehajtott

⁵⁰ QGIS hivatalos dokumentáció: <https://docs.qgis.org/3.34/en/docs/index.html> Elérés: 2024. október 15.

⁵¹ Telbisz Tamás, Székely Balázs, és Timár Gábor, *Digitális Terepmodellek. Adat, látvány, elemzés* (Budapest: 2013). 10.

⁵² Telbisz, Székely, és Timár, *Digitális Terepmodellek*, 10.

⁵³ Neteler, Markus, M.H. Bowman, Martin Landa, és Markus Metz. „GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS”. *Environmental Modelling & Software*, 31 (2012): 124–130. és Conrad, O. et al. "System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4." 2015.

útszámítások mind az Egységes Országos Vetület (EOV) koordinátarendszerén alapultak (EGSP azonosító: 23700).

A nagyjából 4500km²-es összterületű térbeli modellezéshez a domborzati felszín Magyarország 1:10000 felbontású 1979 és 2000 között készült topográfiai térképének a szintvonalrajzain alapuló digitális domborzatmodell (DDM5) jelentette. A domborzatmodellt rendszeres frissítettek a jelentősebb domborzati változások beépítésével. A magassági adatok megbízhatósága átlagosan $\pm 0,7$ m méter, és 5x5 méteres a natív felbontása.⁵⁴ A kiinduló rétegen számos módosítást szükséges volt végrehajtani, a zavaró tényezők és a hibalehetőségek minimálisra csökkentésének az érdekében.

A vízrajzi modellezés végrehajtásához a Caesar-Lisflood programot⁵⁵ vettem igénybe, amely elsősorban nagyobb léptékű vízrajzi és folyófejlődés modellezésére terveztek, de képes egyszerűbb vízrajzi események szimulációjára is. Egyrészt árhullámok modellezésére, másrészt extrém csapadékos körülmények szimulálására használtam fel, a Mesterházy Gábor által végrehajtott modellezés nyomán. A vízrajzi modellezés bemeneti adatait a vízügyi hatóság idősorai, és meteorológiai adatok adták.

2.4. Útkereső algoritmus implementációja

A legrövidebb út probléma megoldására nagy számban alkottak meg hatékony algoritmusokat.⁵⁶ Jellemzően problémához igazítják az az útkeresés paramétereit és gyakori a különböző variánsok alkalmazása a hatékonyság növelés érdekében.⁵⁷ A térbeli elemzések mind az út költségének minimalizálásán alapulnak, és minden egyes lépésnek pozitív költséget tulajdonítanak, ezért szinte kizárólag a célnak megfelelő legegyszerűbb Dijkstra-féle megoldást, vagy egy hasonló elven működő algoritmust alkalmaznak. A dolgozat célja egy rendkívül nagy elemszámú úthálózat rekonstrukciója az ismert útszakaszok alapján. Ezért fontos szempont az algoritmushoz futásához szükséges számítási kapacitás, a paraméterek változtatásnak lehetősége a legkisebb költségű utak azonosításhoz.

⁵⁴ Forrás: <https://lechnerkozpont.hu/oldal/domborzatmodell> Elérés: 2024. november 12.

⁵⁵ Tom J Coulthard et al., "Integrating the LISFLOOD-FP 2D Hydrodynamic Model with the CAESAR Model: Implications for Modelling Landscape Evolution." *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013. Earth Surface Processes and Landforms 38, no. 15 (2013) 1897–1906.

⁵⁶ Madkour, et al. "A Survey of Shortest-Path Algorithms," *arXiv preprint*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.02044>. Elérés: 2024 október 8.

⁵⁷ Ferguson, Dave, Maxim Likhachev, és Anthony Stentz. "A Guide to Heuristic-based Path Planning." 2005.

A költségeket tartalmazó felszínt egy gráfként is értelmezhetjük, ahol a raszter cellából (csúcsból) egy szomszédosként meghatározott raszter cellába lépés költsége a gráf súlyozott éleinek feleltethető meg. Azonban nem szükséges gráfot készíteni a felszínt jelképező költséggraszterből, mert az algoritmus minden egyes lépésben csak a szomszédos, elérhető cellákat között dönt. Végeredményében azonos megoldásra jutunk, ha a raszter cellái közötti lépéseket definiáljuk és mentjük el, és már elmentett költségminimalizáló lépések koordinátáiból készül el az optimális útvonal. Szinte minden szoftverben az egyszerűen használható Dijkstra megoldó algoritmus érhető el. A Régészeti célú út-költség elemzéseket a GIS szoftverek alapbeállításával számolt utak dominálják. A algoritmus hatékony, és látszólag jó eredményekre vezet, ezért a térbeli elemzések sok esetben elhanyagolják a lépések definiálását. Herzog rámutatott arra, hogy a definiált szomszédságok típusa, a lépések mélysége hibához vezethet a tényleges és generált optimális utak hosszában, a felbontás függvényében.⁵⁸

Az útvonalak meghatározásához a Dijkstra algoritmus általános, heurisztikus súlyokkal ellátott verzióját, az A* (ejtése: „a csillag”) algoritmust implementáltam. Az A* olyan súlyozott útkereső algoritmus, amely egy nemnegatív élsúlyozott gráfon (vagy gráfként értelmezhető struktúrán) keresi az optimális utat a kiinduló és a célcsúcsok között, a célpont távolságának a figyelembevételével.⁵⁹ Az A* egyidejűleg minimalizálja a haladás költségét és a heurisztikus tagot. Nem preferálja a céltől távolodó lépéseket, és képes gyorsabban meghatározni a legkisebb költségű útvonalat, ha teljesül a heurisztikus feltétel. A heurisztikus súly, amely lényegében egy keresést gyorsító paraméter, a célponttól mért tényleges távolságot képviseli, esetünkben a légvonalbeli távolságot. A heurisztikus feltétel az, hogy a becsült heurisztikus súlyok ne haladják meg a tényleges távolságot, ellenkező esetben nem garantált az optimális út megtalálása.⁶⁰ Az A* algoritmus fő előnye a Dijkstra-féle algoritmussal szemben, hogy a cél ismeretében képes csökkenteni a keresés során érintett cellák számát. További előnyt jelenthet, hogy a heurisztikus súly módosításával befolyásolható a keresés jellege, ami a helyes végeredmény rovására növelheti az eljárás sebességét.

⁵⁸ Herzog, "The Potential and Limits of Optimal Path Analysis", 188–191.

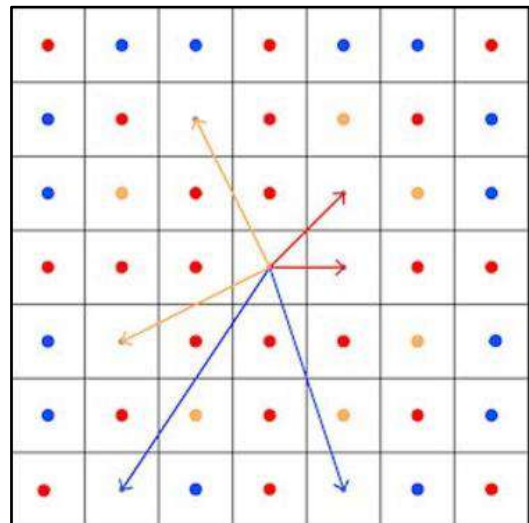
⁵⁹ P. E. Hart, N. J. Nilsson, és B. Raphael, „A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths,” *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics* 4, no. 2 (1968): 100–107.

⁶⁰ Robert C. Holte, „Common Misconceptions Concerning Heuristic Search,” *Proceedings of the Third Annual Symposium on Combinatorial Search* (2010), 46–51.

A* algoritmus

Az algoritmus működése során minden lehetséges lépésnél kiszámítja a $f(n) = g(n) + h(n)$ függvény értékét. A kezdőponttól az aktuális pontig megtett út konkrét költségét $g(n)$ tartalmazza, míg a hátralévő út becsült, heurisztikus költségét $h(n)$. A keresés két listát használ: a „nyitott” listában találhatók a még megvizsgálandó, esetünkben költség raszter értékek, míg a „zárt” listába kerülnek a már megvizsgált elemek. Az algoritmus az induló koordinátaraszter cellájával kezdi a keresést, amelyet a nyitott listába helyez. Ezt követően minden lépésben kiválasztja a nyitott lista legkisebb $f(n)$ értékkel rendelkező cellát, majd megvizsgálja annak szomszédos rasztercelláit. A szomszédos cellák esetében kiszámítja az értékeket, és azokat a nyitott listához adja, amennyiben korábban nem szerepeltek benne, vagy ha egy jobb útvonalat talált hozzájuk. Az eljárás mindig elmenti a lépést megelőző koordinátát is, így visszakövethető az optimális választások láncolata. Ez a folyamat addig ismétlődik, amíg vagy megtaláljuk a célpontot, ami a sikeres keresést jelenti, vagy elfogynak a vizsgálható pontok – ez esetben nincs megoldás. Sikeres keresés esetén az algoritmus visszaadja a teljes útvonalat, ami a célponthoz vezetett.

Néhány kiegészítő paraméter szintén része az algoritmusnak. A szomszédos lépések számát és típusát rugalmasan implementáltam. A négyzetes raszterhálón történő mozgásnál ugyanis az kizárólag ortogonális és egyszerű átlós lépések használata az úthossz számításában hibát eredményezhet (7. ábra). Ezt a problémát a mélységi átlós, "lólépések" bevezetésével jelentősen lehet csökkenteni, a számítási költség növelésének az árán⁶¹ azonban a raszter felbontása továbbra is limitáló faktor lehet⁶². A fordulási költséget a koordináták relatív helyzetéből meghatározva számoltam ki. Az algoritmus összehasonlítja az aktuális és az előző lépés irányát, és irányváltás esetén többletköltséget ad a



7. ábra. Szomszédos lépések definiálása raszteren. Forrás: Herzog, , "Least-cost Paths – Some Methodological Issues."

⁶¹D. L. Huber és R. L. Church, „Transmission Corridor Location Modeling,” Journal of Transportation Engineering 111, sz. 2 (1985) 114–132.

⁶² Herzog, Irmela, és Alden Yépez. "The Impact of the DEM on Archaeological GIS Studies: A Case Study in Ecuador." (Vienna: International Conference on Cultural Heritage and New Technologies, 2015), 1–18.

lépésnek. Harmadik kiegészítés a heurisztikus tag súlyozása volt, amely finomhangolási lehetőséget ad, hogy mennyire gyorsan közelítsen az adott ponthoz az útkeresés, amely így már nem feltétlen vezet optimális eredményhez.

2.5. Az úthálózat jellemzői, a kiválasztott úttípusok

Az középkori úthálózatokat a használat módján alapuló, gyakran egymással átfedésben lévő hierarchikus rendszer határozta meg. Az utak pontos nyomvonala és funkciója idővel változhatott használat során, például felhagyhattak egyes régi útszakaszok használatával egy másik kedvéért.⁶³ Jellemző példa erre, amikor egy települések közötti összekötő út egyben egy távolsági út részét is képezi (12-es útszakasz része a 13-as útszakasz). Esetenként nem lehet legkisebb költségű útként értelmezni úthálózati elemeket, a települések közötti gerincutak kialakulását például a Hegyháton több vetélkedő hatás eredményezte, létrehozva egy nem feltétlenül optimális, közös használatban jól működő útrendszert.⁶⁴

A települési úthálózatok hierarchikus kategorizálása sem adhat teljes elemzési keretet a történeti úthálózatok térbeli vizsgálatához. A településhatáron belüli utak esetében még egyértelműen egy csoportba sorolhatók a kül- és belterületet összekötő ösvények és gyalogutak jellegük és vonalvezetésük szerint. A hierarchia szerint következő, és egy vármegyét leginkább jellemző, települések közötti (provinciális) útszakaszai jelentős változatosságot mutatnak. E kategórián belül egyaránt megtalálhatók rövid (>5 km) és hosszú útszakaszok (akár 30 km), amelyek nagyon hasonló funkciókat töltenek be. Összeköthetnek szomszédos településeket, gazdasági központokat (vásárhely, uradalmi központ) vagy szakrális helyeket (templomos település) a kiinduló településsel.⁶⁵

Az úthálózat bizonyos elemei meghatározóak, közlekedési kapcsolatok túlnyomó részét lefedik. A településekhez tartozó úthálózat alapját a szomszédos települések közötti kapcsolatok adják, amire tekinthetünk egy alaphálózatként. A középkori úthálózat ott volt a leűrűbb, ahol a mindennapi tevékenységek összpontosultak.⁶⁶ A gazdasági ügyletekről fennmaradt források, mind azt tanúsítják, hogy a szomszédság kiemelt szerepet játszott a társadalmi és gazdasági kapcsolatokban. Érdekes ezen felül a meghatározó csomópontokra is figyelmet szentelni,

⁶³ Máté, „A helyi úthálózat kutatásának néprajzi és településtörténeti kérdései” 580–586.

⁶⁴ Máté, „A helyi úthálózat kutatásának néprajzi és településtörténeti kérdései” 575–578.

⁶⁵ Szilágyi, *On the Road*, 89–91.

⁶⁶ Szilágyi, *On the Road*, 160–163.

melyekhez fontos térszervező szerepet társíthatunk. A vallási (egyházzal rendelkező települések), közigazgatási és gazdasági (vásáros helyek, birtokközpontok) központok lokális súlypontoknak tekinthetők. Az központi települések közötti vagy településekre tartó a kapcsolatok túlmutatnak az egyszerű szomszédsági viszonyokon, de Tolna vármegye területén belül értelmezhető a leginkább ez a kapcsolat típus, melyet Aston is szemléltetett.⁶⁷ Az középponti helyeket leíró Kubinyi-féle pontrendszer alkalmas az ilyen települések azonosítására.

Az elemzéshez a kiválasztott utak körét a legjellemzőbb és jól definiálható útvonalakra szűkítettem. Ezek az áruszállításra is alkalmas, gyakran használt szekérutak, amelyeknek kezdő- és végpontjai azonosított települések. A szomszédsági kapcsolatok teljes körű rekonstruálására törekedtem az útelemzés során, tekintettel a változatos terepi adottságokra. A központi helyekhez kapcsolódó utakat csak az ismertetett példák mentén elemeztem. Elsődleges cél a szomszédság alapú utakkal való összevetés volt a legkisebb költségű útelemzés megközelítésben.

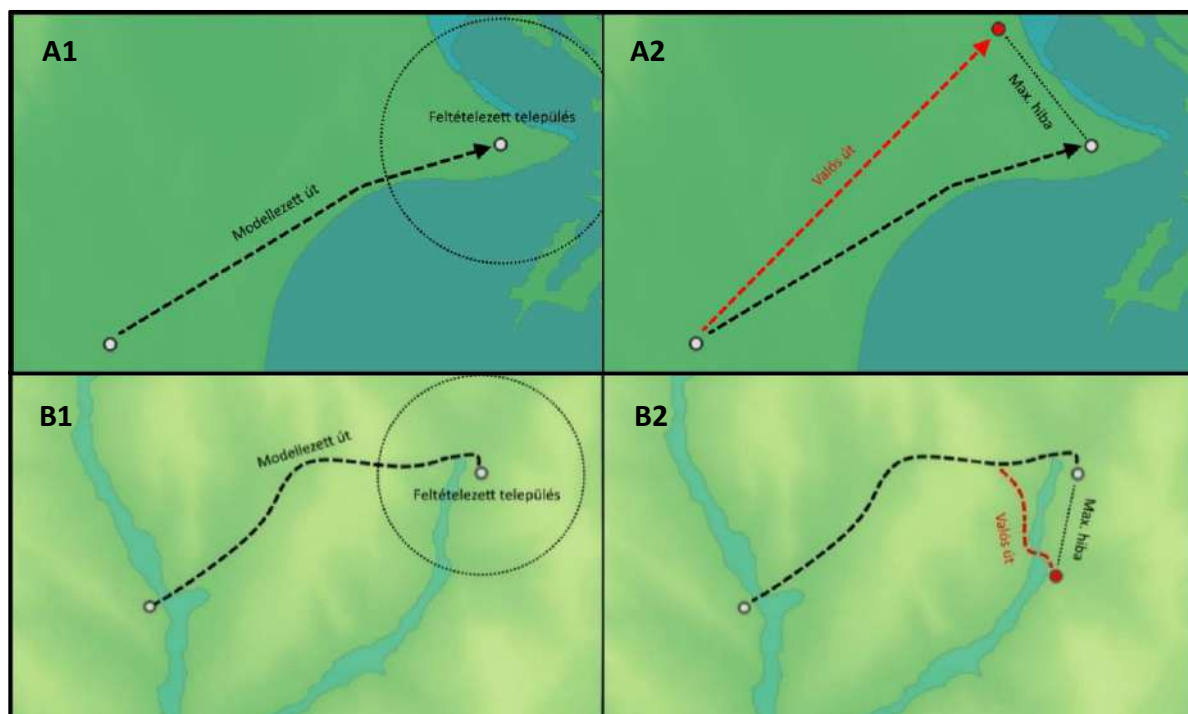
2.6. Települések és az utak definiálása

A települések és az ezeket összekötő utak idő során folyamatosan változó struktúrák voltak, egyszerűsítő feltételezések nélkülözhetetlenek vizsgálatuk során. A középkori falvak és mezővárosok topográfiája, belső utcaszerkezetük jellemzői jól ismertek elsősorban az Alföldön,⁶⁸ azonban a települések közötti utak modellezésében rendkívüli munka lenne minden vizsgált település részletes feltérképezése. A dolgozatban minden helyiséget egy kijelölt EOV koordináta jelöl, az ismert település középpontjában helyeztem el. A települések egy részénél nem pontosak a terepi adatok, de a helynevek alapján 250 méter sugarú körben megjelölhető az egykori település helye. Egyes települések esetén elképzelhető, hogy a völgyön belül, azonos földrajzi környezetben máshol terültek el. Ez a bizonytalanság elsősorban ott okozhat eltérést, ahol minimális az alternatív útvonalak költsége közötti különbség, vagyis egyenes az legjobb út két helyszín között.

⁶⁷ Aston, *Interpreting the Landscape, Landscape Archaeology and Local History*, 144.

⁶⁸ Pánya István, *A hódoltsági területek középkori és kora újkori településtopográfiájának kutatási módszertana Bács, Bodrog és Solt vármegyék példáján*, 106–107.

Feltételekkel kezelhető középkori útszakaszként egy modellezett legkisebb költségű út. Egyrészt számolni kell a DDM eredendő hibáival és a vízrajzi modellezés esetén tapasztalt hiányosságokkal, útkeresés végrehajtásából származó hibákkal. Az LCP utak instabilitása is számításba vehető, ha közel azonos költségű alternatívák léteznek, főképp hosszabb útszakaszok esetén.⁶⁹ Célravezető a modellezett utakat nyomsávként értelmezni, és „pufferrel” ellátni, minden modellezett útszakasz esetében 200 méter szélességű nyomsávot hoztam létre, amely az útvonalakhoz tartozó kisebb hibákat hivatottak jelezni. A pixelfelbontás 20x20 méter, vagyis 5-5 pixel eltérést definiáltam az útkeresés eredő hibájaként. Ha jól definiáltak a költségelemek és egyértelműen vezeti a domborzat az utakat, akkor várható, hogy az azonosított utakhoz közelítő végeredményt kapunk, ellenkező esetben jóval nagyobb a



8. ábra. A várható eltérések jellege a cél bizonytalanságának és földrajzi környezetének a függvényében (saját szerkesztés)

várható eltérés (8. ábra A, B). Az útelemzés eredményeként kapott utak meghatározhatók két koordinátákkal jelképezett, települést összekötő nyomsávként, amely a környezeti tényezők figyelembevételével a legkisebb költséggel teljesíthető. Ezek abban az esetben tekinthetők középkori nyomsávnak amennyiben a valós utak vonalvezetésével egybeesnek. Célravezető a legkisebb költségű utak tapasztalt eltéréseit a természeti környezet és alternatívák szemszögéből értelmezni. A hiba más elbírálást igényel amennyiben az minimális

⁶⁹ Herzog, "Issues in Replication and Stability of Least-Cost Path Calculations",

költségkülönbségként következménye, mint abban az esetben, ha vonalvezetésében teljesen más út a végeredmény.

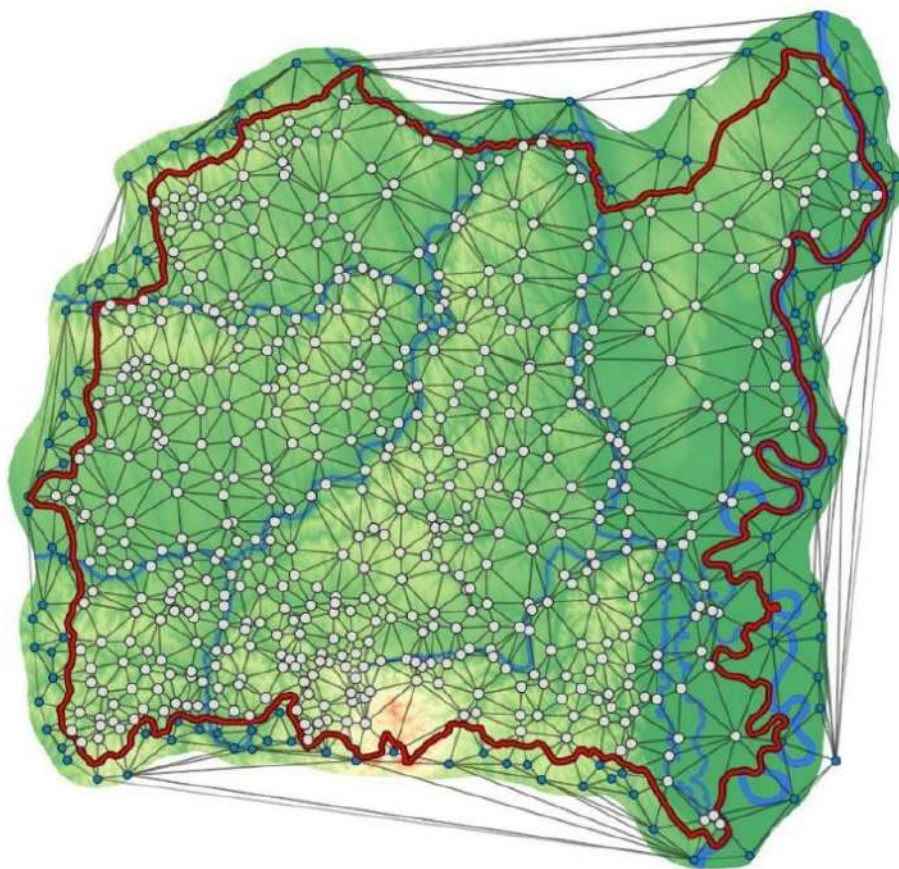
A szomszédsági kapcsolat két értelmezése érvényes, egyrészt az fizikai érintkezés településhatárok között, másrészt a térbeli közelség két település között, amely nem feltétlen jelentett szomszédságot. A kapcsolatok meghatározására elsősorban a Delanuay-féle háromszögelést alkalmaztam. Ez egy bevett módszer térbeli elemzésekben, amely úgy hoz létre háromszögeket három kiválasztott pont között, hogy maximalizálja a háromszögek legkisebb szögét, tehát létrejött háromszögek a lehető legkevésbé lesznek hegyesek. A háromszög oldalakat értelmezhetjük fizikai szomszédságot jelképező útkapcsolatként. (9. ábra) A szomszédok száma limitált lehet, mert a módszer önkorlátozó jellege miatt. Ezen felül, az összes települést szomszédosnak minősítettem, amelyek legfeljebb 3 km-re helyezkedtek el egymástól. Ennek a megközelítésnek azokon területeken van relevanciája, ahol sűrű a településhálózat és szomszédost követő település is elérhető, „szomszédsági” közelségben van. A határpontokat csak abban az esetben hasznosítottam, ha a kapcsolat megyehatáron belüli településhez kötötte őket az útkapcsolat, hogy a teljes, szomszédság alapú úthálózat létrejöhessen.

2.7. A térbeli elemzés költségtényezői

Az optimális útszámítás alapját egy vagy több költséggraszter képezi, amely cellánként tartalmazza az összes releváns paraméter értékét. A költségparaméterek precíz meghatározása és kalibrálása kulcsfontosságú a történeti útvonalak rekonstrukciójának a szempontjából. A régészeti célú legkisebb költségű útelemzések rendre ugyanazokat a meghatározó környezeti tényezőket azonosították: a domborzatot, a vízrajzot és a felszínborítás különböző tulajdonságait.⁷⁰ A költségelemek értelmezésében ugyanakkor változatos megközelítések figyelhetők meg, ahol egyaránt jelen vannak a precíz számítások és az egyszerűsítő feltételezések. A középkori úthálózat, különösen a kisebb jelentőségű útszakaszok, erősen ki voltak téve a természeti hatásoknak. Az utak járhatóságát meghatározta az időjárás, akár teljesen használhatatlanná válhattak ideiglenesen. Az útvonalak minőségét és vonalvezetését számos tényező befolyásolta: az időjárási viszonyok, a domborzati adottságok, a vízrajzi jellemzők, a talajtípus, a növényzeti borítás, valamint az emberi hatások. Az elemzésben a kettő

⁷⁰ Herzog, "Least-cost Paths – Some Methodological Issues.", 5.

legmeghatározóbb paramétert – a domborzatot, a vízrajzot – alkalmaztam út-költség tényezőként, a rendelkezésre álló adatok alapján. További költségtényezőként szerepelt a nagyobb vízfolyások határoló-funkciója és a hozzájuk kapcsolódó átkelők.



**9. ábra. Delanuay-féle háromszögeléssel azonosított szomszédos útkapcsolatok
(saját szerkesztés)**

3. ELEMZÉS ELŐKÉSZÍTÉSE

3.1. A 16. század eleji domborzat és vízrajz megjelenítése

Az úthálózat és egyes útszakaszok modellezésének fontos előfeltétele, hogy a korabeli földrajzi, tájhasználati és vízrajzi viszonyokat megfelelőképpen tükrözzék a költségrétegek. A domborzat és az újkori, vízszabályozásokat megelőző vízrajz összeségében jól értelmezhető és modellezhető. Elsősorban azért, mert a változásuk emberi mértékkel rendkívül lassú folyamat és a megfelelő eszközök rendelkezésre állnak a költségrétegek létrehozásához. A 16. század eleji tájhasználat csak mozaikosan ismert írott adatok alapján, és problémás visszakövetkeztetni az újkori források alapján, mert nincs tudomásunk a tájhasználat folyamatosságáról. Ezért ez a számottevő tényező nem kerülhetett be a költségelemek közé. A talajtípus költségeinek meghatározása sem bizonyult kivitelezhetőnek, ugyanis a rendelkezésre álló talajtani adatok nem összeegyeztethetők a szakirodalomban ismertetett talajtípus költség kiosztással.⁷¹ Természetesen korlátokkal szembesül modellezés a bemeneti adatok minősége és a végrehajtott szükséges módosítások miatt. A hibák egy részét kezelni lehetett, bizonyos esetben azonban tudomásul kellett venni a potenciális hibaforrást, elsősorban a vízrajzi modellezésben.

3.2. A Digitális Domborzatmodell előkészítése

Az ismertetett DDM raszterréteg nagy pontosságú, a középkori Tolna vármegye területén a domborzat meglehetősen változatos, ez esetben nem jellemző a DDM pontosság jelentősen befolyásolná az utak vonalvezetését.⁷² Ellenőrizetlen DDM-t ennek ellenére nem szabad alkalmazni, mert lejtőmodell pontatlanságát okozhatja, ezen keresztül pedig az optimálistól eltérő utakat eredményezhet.⁷³ A vizsgált terület lehatárolását követően a DDM felbontását 5×5 méterről 20×20 méteres pixelfelbontásra csökkentettem (GDAL, „raster resampling”, „nearest neighbourhood method”). A lépés egyszerre több célt szolgált. Egyrészt az elemzés terjedelme indokoltá tette, mert jelentősen gyorsított a számítások várható időigényén, $\frac{1}{16}$ -od részére csökkentette a raszter celláinak a (pixelek) számát, ami nagyjából 14 millió pixelt jelent. Ez azt jelenti, hogy egy 3 kilométer hosszú legkisebb költségű út 600 helyet mindössze 150

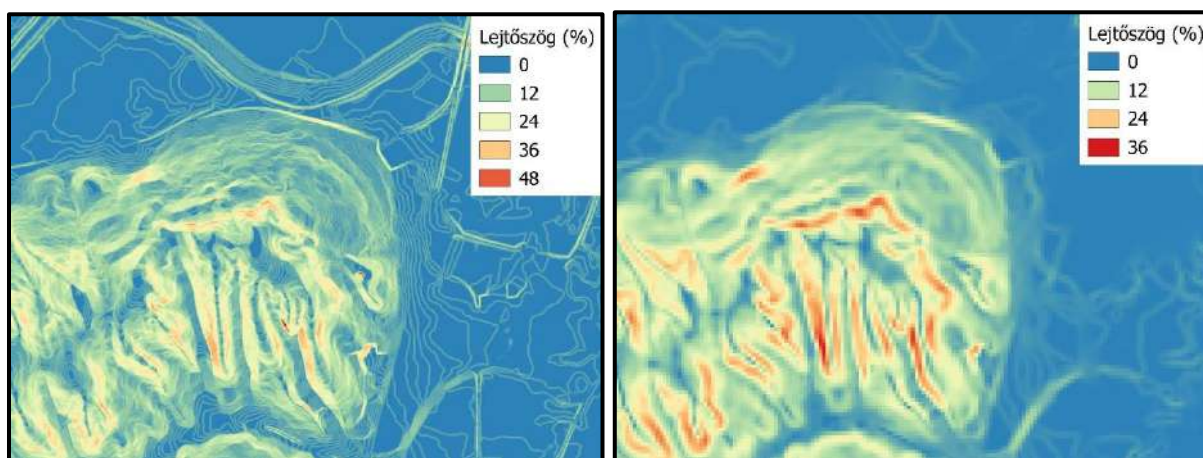
⁷¹ Talajtani adatok forrása: <https://dosoremi.hu/maps/> Elérés: 2024 október 28.

összefoglaló: Herzog, "Least-cost Paths – Some Methodological Issues.", 5.3

⁷² Herzog és Yépez. "The Impact of the DEM on Archaeological GIS Studies: A Case Study in Ecuador.", 1–18.

⁷³ Bővebben Telbisz, Székely, és Timár, *Digitális Terepmodellek*, 71-75.

lépésből azonosítható, ha egyenes vonalban fut, vagyis 75%-kal rövidített utat kell az útkereső algoritmusnak megvizsgálnia. Másodsorban az 5×5 méteres felbontás sok extrém és nehezen kezelhető részletet tart meg, hibákkal telítettebb marad a domborzatmodell. A 20×20 méteres cellaméretnél az új pixelfelbontás szükségszerűen simítja a domborzatot. Az emberi tevékenység kisebb nyomait, például pont a vizsgált utak fizikai lenyomatát minimalizálta, amelyek kifejezetten rontottak volna az elemzésen. A relatíve alacsonyabb felbontáson a terep sajátosságai és költségelemek továbbra is kivehetők, a lejtőmodellek extrém, 40% feletti lejtő meredeksége redukálódott, azonban a merek lejtők hatása szinte ugyanaz maradt út vonalvezetés szempontjából (11. ábra).

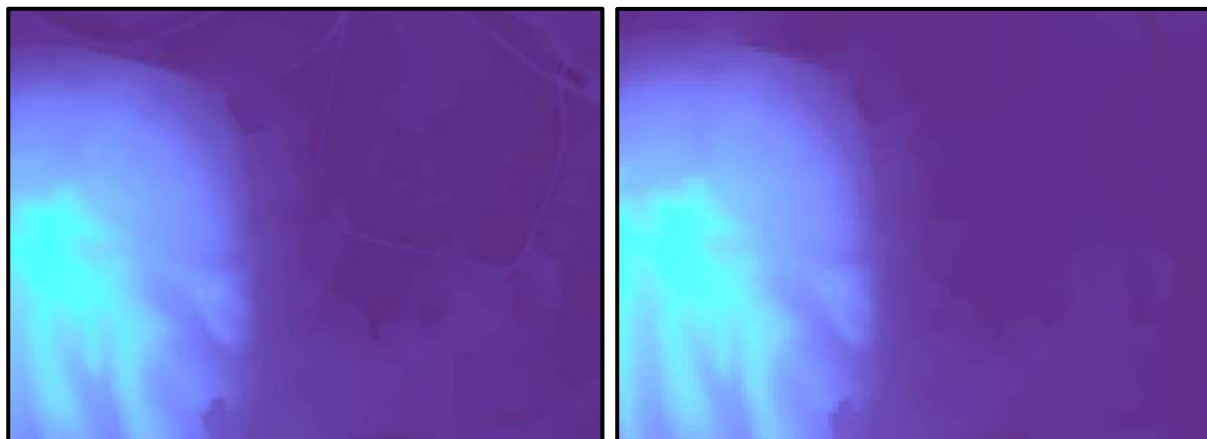


10. és 11. ábra. A felbontás csökkentésének hatása a lejtőszögre és digitális domborzatmodellre (saját szerkesztés)

A rendelkezésre álló DDM rétegből el kellett távolítani a modern objektumokat (gátak, csatornák, közlekedési infrastruktúra, jelentős építmények, ipari területek) A mesterséges tereptárgyak és vízfelszínek kitörléséhez határoló poligonokat (felületeket) alkalmaztam, melyekkel kimetszettem a raszterből a kérdéses részleteket. (12-13. ábra) A hiányokat interpolálással helyettesítettem a domborzatban (SAGA, „close gap”). A felhasznált domborzatmodell kisebb hibája, hogy „teraszos” a felszín egy része (lásd 10. ábra), általában a lankás domboldalak, folyóvölgyek, amely a látható szintvonalakban nyilvánult meg.⁷⁴ A létrehozott lejtőmodell ellenőrzésekor nem ítéltam jelentősnek a terasz hatást, a felbontás csökkentésének köszönhetően. Van lehetőség simított felszín létrehozására szintvonalakból, szintén interpolációs módszerrel (SAGA, „B spline interpolation”) amelyeket a teraszok

⁷⁴ Telbisz, Székely, és Timár, *Digitális Terepmodellek*, 49.

kezelésére több beállítással sem hoztak kielégítő végeredményt sok szempontból rosszabbá tették a DDM-et, elősorban a lejtőmodell megváltozása miatt.



**11. és 13. ábra. A mesterséges építmények eltávolítása a domborzatmodellből
(saját szerkesztés)**

3.3. Vízrajzi modellezés

Hidrológiai modellezéssel, áradások és villámárvizek szimulálásával kijelölhetők a nagyobb, rendszeresen víz borította területek és a víz által veszélyeztetett területek. Ezek a területek (árterek, lokális vízgyűjtők, völgytalpak) a vizenyős talaj és az ideiglenes elöntés veszélye miatt kedvezőtlen terepet jelentenek állandó utak létrehozásához. Az árterek vagy legszűkebb részén létrejött folyami átkelőket, vagy a vízszabályozás előtti úthálózat is tekinthető egyértelmű bizonyítékként erre vonatkozóan.⁷⁵

A folyómedrek nem azonosíthatók a 16. század elejéről, de nem szükséges a valós meder, csak a települések relatív helyzetének ismerete. A 18. századi szabályozás előtti mederjelleg, a határoló szerep, és az egykori települések helye ismert az átkelőhelyekkel egyetemben. Ezek az adatok elégségesek, hogy a folyó meder betöltse szerepét, és az úthálózat elemeinek racionális utat lehessen kijelölni. A középkori mederjellemzők hiteles megjelenítése elsősorban abban játszik szerepet, hogy az átkelők valóban szűk keresztmetszetként jelenjenek meg, és a kijelölt medrekben ne jöhessen létre út, tekintettel arra, hogy vízi utak elemzést nem érinti a dolgozat. A késő középkori folyómedreket az EKF térképszelvényeinek korrigált medrei, és további 18.-19. századi medrek és korábbi medermaradványokból alkotott mesterséges

⁷⁵ K. Németh, *A középkori Tolna megye települései. Településtörténeti adattár*, 484–487.

medrek jelképezik, kiegészítve a korábbi állapotokról szóló ismeretekkel, és a környéket érintett kutatásokkal.⁷⁶

Az utak vonalvezetésének szemszögéből fontosabb az ártéri és vízgyűjtő területek azonosítása, mint az élő folyómederé. A korábbi útmodellezésekben vegyes volt a vizek problémájának a megközelítése melyektől eltérő módon kezeltem a vízrajzot.⁷⁷ Mesterházy Gábor vízrajzi modellezés alapján végeztem el a folyamatot, de eltérő célokkal két részre osztottam a vízrajzi modellezést.⁷⁸ Egyrészt a rendszeres áradásokat modelleztem egy 7+1 napos árhullámmal az középkori vármegye széles ártérrel rendelkező, jelentős vízfolyásain. Másrészt a teljes területen 50mm, 4 órán belül lehulló, egyhavi átlagcsapadék gyűjtőhelyeit modelleztem 12 órával későbbi adatfelvétellel. A hozzáadott időtartam az átfutási időt takarta, amely a modellek futásához szükséges volt, hiszen a víznek el kellett önteni a terület vízjárta részeit. A két eltérő esemény modellezése kettő, egymást területileg kiegészítő hatást mutatott meg. Az árhullám rendszeresen elöntött ártereket töltötte meg, míg a nagy mennyiségű csapadék a kisebb vízgyűjtőket és a völgytalpakat.

Hidrológiai modellezések előkészítésekor biztosítani kell a víz lefolyását a DDM-en.⁷⁹ Az említett „teraszos területek a vízrajz szempontjából problémát okoznak mert lefolyástalan területnek tekinthetők. A vizeket levezető folyómedrek reprezentálják lefolyást, ezeket a DDM-be „beleégettem”, vagyis 5 méteres mélységű medreket vontam ki a domborzatból. Ezt követően a teljes raszteren iteratív módszerrel feltöltöttem az összes 0,5 méternél kisebb mélyedést (SAGA „Fill Sink” eljárás). Ez biztosítja a vizek lefolyását a teljes területen a beégetett folyómedreken keresztül, és megakadályozza, hogy lokális mélyedésekben megálljon egy szimulált áradás. A módosított DDM kizárólag vízrajzi modellezéshez volt használható, mivel a domborzatot több helyen jelentősen módosítja a feltöltési eljárás. Utolsó lépésként 25 részre daraboltam a teljes területet a vízrajzi modellezéshez (GDAL „transform raster” eszköz). A raszter feldarabolása kétségtelenül hatással lehet az árhullámok és vízfolyások folytonosságára, ezért a feldarabolt egységek között jelentős átfedést alakítottam ki, amely

⁷⁶ Lásd: Pánya István, "A Vajas folyó a történeti forrásokban," *Hidrológiai Közlöny* 101, no. 2 (2021): 72–80.

⁷⁷ Herzog, "Least-cost Paths – Some Methodological Issues.", 5.4

⁷⁸ Mesterházy, "Legkisebb költségű úthálózatok modellezése síkvidéki környezetben a neolitikumtól a középkorig.", 174-177.

⁷⁹ Telbisz, Székely, és Timár, *Digitális Terepmodellek*, 65.

hatékonyan kezeli a problémát. A feldarabolt felszínen részletekben hajtottam végre a szimulációt a korlátos számítási kapacitások miatt.

Árhullám modellezése

Vízfolyás (korabeli név)	A kiinduló árhullám vízhozama (kategória)
Baranya-csatorna (Széki-patak)	$150 + 15 \frac{m^3}{s}$ (3)
Báta (középkori Sárvíz mellékága)	$100 + 15 \frac{m^3}{s}$ (3)
Duna	$4000 - 2500 \frac{m^3}{s}$ (1)
Kapos	$150 + 25 \frac{m^3}{s}$ (2)
Koppány (Füzegy)	$150 + 15 \frac{m^3}{s}$ (3)
Sió	$150 + 15 \frac{m^3}{s}$ (3)
Sárvíz (Sár)	$150 + 55 \frac{m^3}{s}$ (2)
Völgységi (Hidas)-patak	$150 + 15 \frac{m^3}{s}$ (3)

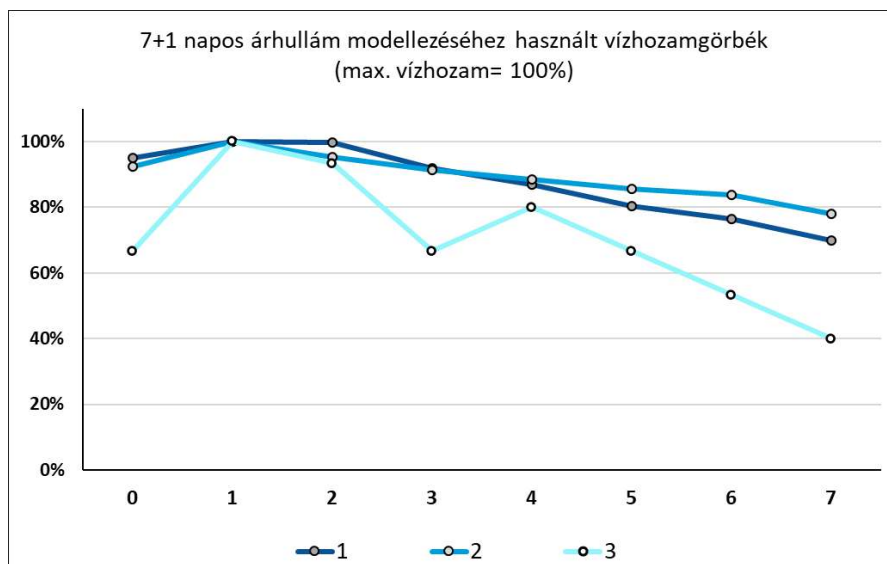
1. táblázat. Az árvíz modellezéséhez használt bemeneti értékek

A vízhozam adatok a vízügyi hatóság adatbázisaiból származnak és a 2010-14 között csapadékosabb időszak vízhozamait tartalmazták. A bemeneti pontokhoz lehető legközelebbi vízmérő állomások adataival dolgoztam.⁸⁰ A Duna (1), a Kapos és a Sárvíz (2) saját paramétereiket kapták, az összes kisebb vízfolyást azonos módon kezeltem (3). A szemléltetett vízhozam görbéket alkalmaztam az áradások szimulációjában (14. ábra).

A Sárvíz vízhozama manapság kisebb, mint a Kapos folyóé, azonban a szabályozások előtt a Kapos a Sárvíz mellékvize volt. Ebből kifolyólag a Kapos kimeneti értékének kicsivel több mint kétszerese a Sárvíz értéke a Kapos két folyó egyesülését követően a modellben. A beégetett folyómedrek hatásával számolni kellett a bemeneti adatoknál. A Duna esetén a „Fill Sink” parancs feltöltötte a széles medret, ezért az átlagos vízhozamot kivontam az árhullámból. A kisebb folyókon ellenben 3-5 méter mély és 20 méter széles mestereséges, beégetett folyómedrek megmaradtak, jóval nagyobb keresztmetszettel, mint maguk a folyók. Minden

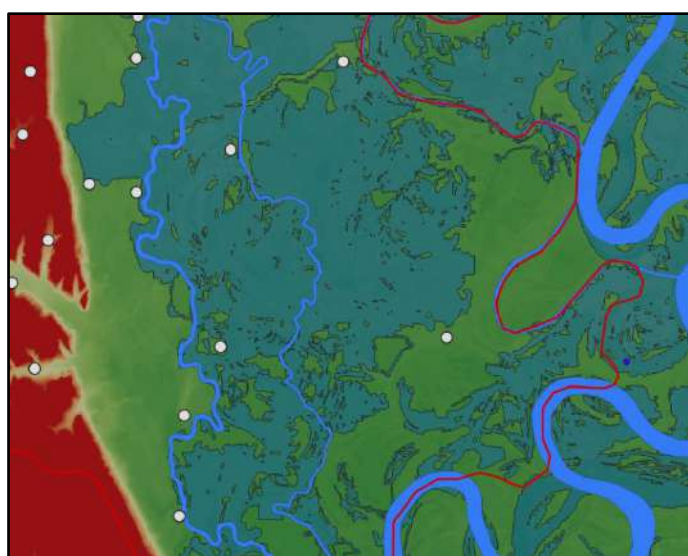
4. ábra
5. ábra

⁸⁰ Adatok forrása: <https://data.vizugy.hu/> Elérés: 2024 szeptember 23.



**14. ábra. 7+1 napos vízhozamgörbék vízfolyások mérete szerint.
(saját szerkesztés)**

esetben $150 \frac{m^3}{s}$ vízhozam hozzáadása szükséges és elégséges volt a folyómedrek feltöltéséhez vízzel, így a tényleges többlet víz áradást tudott okozni. A 7 napos időtartammal cél a tartós elöntés modellezése volt. A kiinduló paraméterekhez minden egyes vízfolyás egyesülésnél hozzáadtam a beérkező vízhozamokat a modell futás kimenetekből. Az árhullám okozta eltolódás minden esetben pótlásra került, az árhullám mértékét minden szimuláció indításakor azonosnak tekintettem a folyásirányban megelőző bemenetekkel. A programban lehetőség van szétosztani a bemeneti értékeket, törekedtem arra, hogy arányosan érkezzen a víz a folyómedrekbe és az ártérbe. Az árhullámok elárasztották az ártereket, kivéve az vízjárta területek belső részét(15. ábra), és jól lefedték a véletlenszerűen kiválasztott, víz által borított

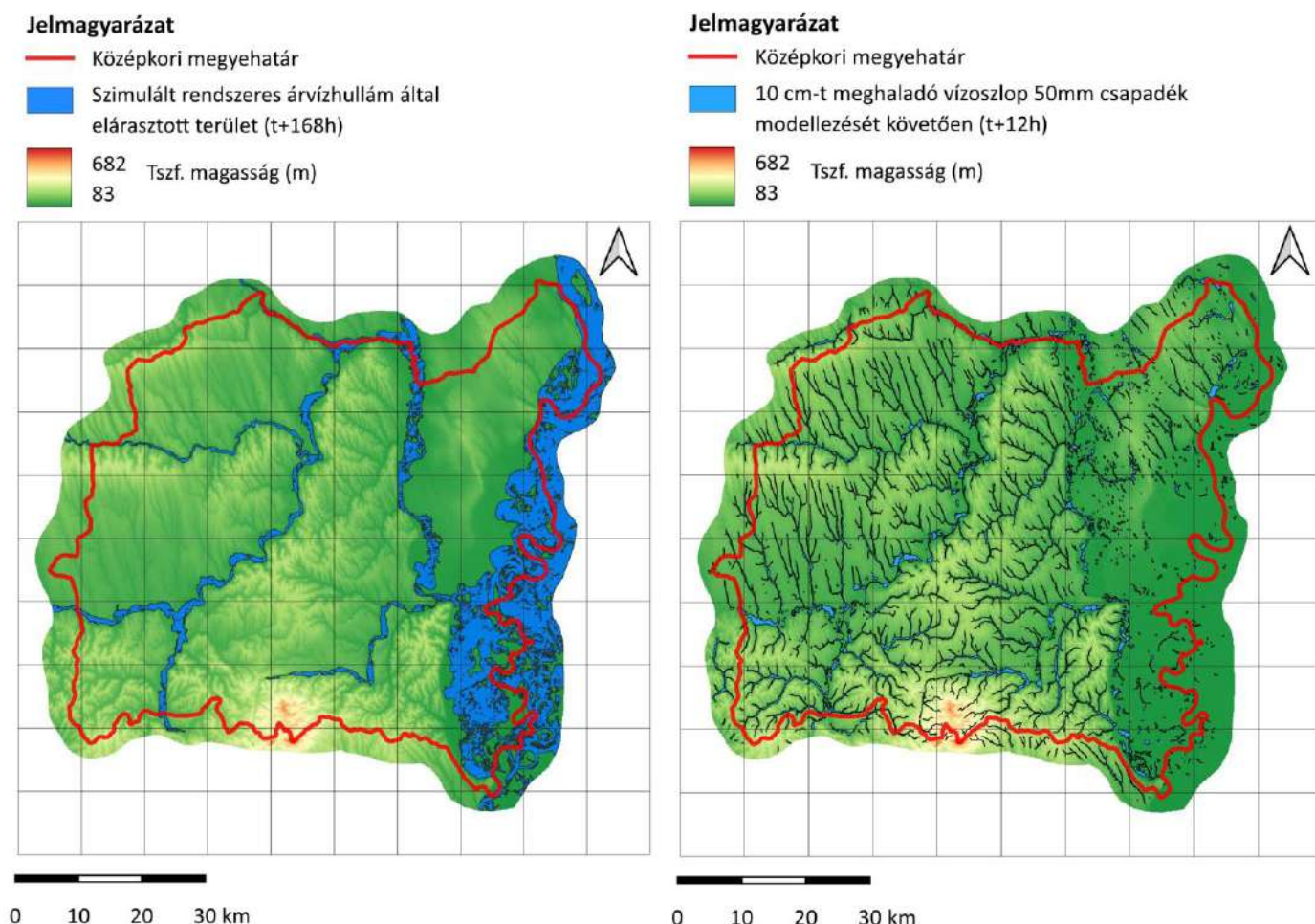


15. ábra. Az árhullám lefolyásának a tökéletlensége a széles ártérben. (saját szerkesztés)

területeket Az árterek legbelső részei nem relevánsak utak szempontjából, mivel települések alig találhatók, a valóságban nem voltak alkalmasak közlekedésre. Ezen a területen érdemes lenne a vízi közlekedés lehetőségeit vizsgálni.

Nagy mennyiségű csapadék modellezése

A kiválasztott 50 mm csapadékösszeg jellemzően jelentős, egyhavi csapadék átlagnak felel meg a vidéken.⁸¹ A 12 óra futási időt követően az érdemi, legalább 10 cm magasságú vízoszlopok kerültek kimentésre. Az így kapott víz borította területek egy részén előjöttek a domborzatmodell lankásabb területein található már feltöltött teraszos felületformák. A vízfelszín egy része összefüggéstelen lett, ezt a vektor réteg kézi kiegészítésével lehetett javítani. A szétaprózódott rétegeket összevontam és javítottam QGIS beépített műveleteinek segítségével (QGIS/GDAL „buffer” és „union” műveletek). Ezután a fennmaradó kis méretű, 5×5 pixelnél (100×100m) nem nagyobb poligonokat kivettem az elemzésből, az áttekinthetőség érdekében. A végeredményt a domborzattal összevetve ellenőriztem és a



16 és 17. ábra. Az modellezett vízköltség rétegek (saját szerkesztés)

⁸¹ Adat forrása:

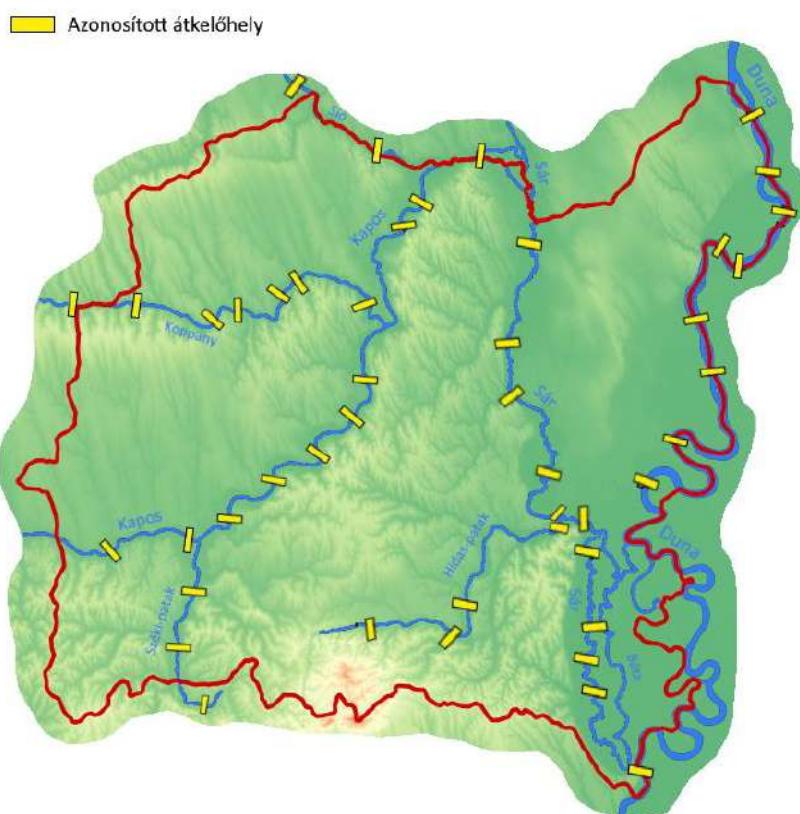
https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/altalanos_eghajlati_jellemzes/csapadek/adat.

Elérés: 2024 szeptember 25.

fennmaradó hibákat kézzel javítottam. A szimulációval létrehozott és megtisztított vektorréteg a csapadékos időjárás okozta víztömeg által veszélyeztett területeket rajzolta ki. Ezek nem tekinthetők állandó utak számára alkalmas terepnek. Bár általában kedvező, sík domborzati viszonyok jellemzők, az alkalmi elöntés és a járhatatlanná válás veszélye miatt mégis költségtényezőként kell tekinteni az ilyen területekre.

3.4. A költségrétegek létrehozása

A domborzat és vízrajz költségrétegei alkották az útelemzés bemeneti értékeit. Az értékek megállapításában a korábbi elemzések és a 16. századi környezet hiteles megjelenítése játszott szerepet. Alapvetően minden egyes, oldalával szomszédos raszter cella közötti lépés költségét



18. ábra. A vármegye azonosított középkori vámjai, hídjai és egyéb átkelőhelyei a jelentősebb vízfolyásokon (saját szerkesztés)

1-nek tekintette az modell, amennyiben teljesen sík terepet történt az útkeresés. A költségrétegek három részre oszthatók. A vonalvezetésben legfontosabb, lejtőszög alapú költségszámításnál a cellaértékek súlyozását a költség függvény határozza meg. A vízrajzi elemzésnél a két típusú vízborítás eltérő súlyokat kapott: a nagy mennyiségű csapadékból származó ideiglenes vízborítás (5-ös költségérték), valamint a folyók árterületei (10-es költségérték). Amennyiben fedte egymást a két réteg, a nagyobb értéket vettem figyelembe az

összevonás művelet során (QGIS, „merge” művelet). A magas költségek célja a hagyományos megközelítés szellemében a vízjárta területek kiemelése akadályként, hogy az út lehetőleg ne haladjon huzamosan ilyen területen. A fő oka annak, hogy a nem lehet egységes kategóriákat készíteni a vízrajzi modellezés végeredményéből, az a változatos domborzat és nagy földrajzi kiterjedés, a költségfelbontás síkvidéken jól végrehajtható.⁸² Az ártéri területeken várható, hogy a legkisebb költségű utak kevésbé kifinomult vonalvezetéssel rendelkeznek.

Tényező	Költség
Csapadék által veszélyeztetett területek	5
Rendszeresen árvíz érintette területek	10
Lejtőszög	költségfüggvény szerint
Folyók (mint akadályok)	50000
Átkelő	2

2. táblázat. A meghatározott költségértékek

Az átkelőket az vámok és átkelőhelyekről szóló írott adatok, helynevek és az EKF alapján (gátak és hidak) határoztam meg a jelentős vízfolyásokon. A vízfolyások külön kaptak egy nagyon magas költségértéket, amely az útszámítás szempontjából végtelennek, azaz átjárhatatlannak minősítette a vízfolyások által érintett rasztercellákat. Az ismert átkelőknél ez a határoló érték el lett tüntetve a költségrétegről.

3.5. LCP modellezés költségfüggvénye

A térinformatikai szoftverek beépített „Least Cost Path” moduljai korlátozottan használhatók, mivel nem paraméterezhetők és statikus költséggraszterrel dolgoznak. Ezek a modulok elsősorban kevés pont közötti optimális út azonosítására készültek, ezért nagyobb úthálózatok elemzésére, illetve jelentős mennyiségű út kiértékelésére nem alkalmasak. Ezzel szemben a modellezéshez írt Python scriptek nemcsak jól definiált költségfüggvények létrehozását tették lehetővé, hanem a paraméterek rugalmas módosítását is.

⁸² Mesterházy, "Legkisebb költségű úthálózatok modellezése síkvidéki környezetben a neolitikumtól a középkorig.", 178.

Olyan költségfüggvényre esett a választás, amely a leginkább jellemzi az állandó településeket összekötő, szekérrel is járható útvonalakat. A szekérutakra alkalmazott általános költségfüggvény ideális kiindulópontnak tekinthető.⁸³ Az alapvető költségfüggvény $1 + (s / \hat{s})^2$, ahol „s” a lejtőszög „ $\hat{s}$ ” pedig azt a kritikus lejtőszöget jelöli, amely felett nem drasztikusan megnő a lejtőn haladás költsége. A megközelítés jelentős előnye, hogy a kétirányú utaknál a lejtőkre szimmetrikus a költségszámítás (azonos költségű a pozitív és negatív irányú, azonos mértékű lejtés), így az út irányát nem szükséges figyelembe venni. Bár a valóságban ennél összetettebb a kétirányú utak vonalvezetése,⁸⁴ a kismértékben eltérő útszakaszokat tekinthetjük egy nyomvonal részének.

A paraméterezés döntő jelentőségű mind az úthálózatot meghatározó költségtényezők kiválasztásában, mind a földrajzi környezet modelljének finomításában. Tekintettel voltam az utak nagy számára is, amelyek a költségtényezők és a költségfüggvény komplexitásának az ésszerű megválasztása mellett szólt. Az algoritmus útkeresési paraméterei (heurisztikus súly, fordulás költsége és lehetséges lépések) mellett az alábbi költségfüggvény határozta meg az utakat:

$$f(\text{költség}) = 1 + \text{vízfelület} + \text{határoló vízfolyás} + \min((\text{lejtőszög} * \max(x, 1)), 5) + \left(\frac{\text{lejtőszög}}{\text{kritikus lejtőszög}}\right)^y$$

Ahol a *vízfelület* és *határoló vízfolyás* és a *lejtőszög* az adott cellához tartozó állandó értékek. A lejtőszög meghatározható mind hajlásszöggént, mind százalékos meredekségként; az elemzés az utóbbi megközelítést alkalmazza. A lejtőszöget tartalmazó legfeljebb 5 értékű komponens elsődleges célja, hogy biztosítsa, a kritikusnál kisebb lejtőszögek között is lehetséges legyen az *x* változó függvényében (lineárisan) differenciálni. A kritikus lejtőszög mellett a kitevő növelését (kritikus lejtő hatásának fokozása) potenciálisan hasznos, változtatható paraméternek definiáltam.

⁸³ Herzog, "Least-cost Paths – Some Methodological Issues.", 5.1.4

⁸⁴ Máté, „A helyi úthálózat kutatásának néprajzi és településtörténeti kérdései”, 579.

4. AZONOSÍTOTT UTAK MODELLEZÉSE

Az útvonalak értékelése grafikus elemzésen alapult. A nyomvonalak egyezését, illetve az eltérések típusát és mértékét (kisebb nyomvonal-ingadozások, jelentős eltérések, költségelemek realiztikus figyelembevétel) kvalitatív módszerrel határoztam meg, az ismert úthasználati jellegzetességek fényében. A nyomvonal azonosítás pontossága (egybeesés) és minősége (hibajelleg) szerepet játszott a költségfüggvények teljesítményének értékelésében. Az utak eltérő környezetben futottak, ezért várható volt, hogy több költségfüggvény segítségével lehet az azonosított utakat, úttípusokról hitelesen LCP modellt készíteni.

Jelentős eltérésként tekintettem az útvonal karakterisztikájának különbségére, például amikor völgy követése helyett domboldalon vezet az út, vagy amikor legkisebb költségű út egyenes helyet kanyarogva kötötte össze a két települést. A megfelelő költségfüggvény kiválasztásához, lehetséges paramétereket egy egyszerű kiinduló költségfüggvény módosításával teszteltem. A legígéretesebb kombinációk kiválasztása a tesztelési eredmények alapján történt; terjedelmi korlátok miatt csak a változás hatásait legjobban szemléltető útszakaszok vizualizációi szerepelnek. Az elemzés során differenciáltam a domborzati jelleg alapján, figyelembe véve a vízrajz és lejtőszög dominanciáját a völgyek szélességét a domborzat tagoltságát és az útvonal szintváltozásának számát.

4.1. Az útszámítás paramétereinek szelekciója

Paraméter	A referencia érték	Alternatívák
lépés mélység (cella távolság)	2	1, 3
irányváltás költsége (t)	0	0.5, 1, 2
kritikus lejtő meredekség (s)	8%	6%, 10%, 12%
kritikus lejtő hatása (y)	2	4, 6
alacsony lejtőszög büntetőtag súlya (x)	0	0.25, 0.5, 1
heurisztikus súly (h)	1	0.5, 2, 5

3. táblázat. Az LCP modellezés során vizsgált paraméterek

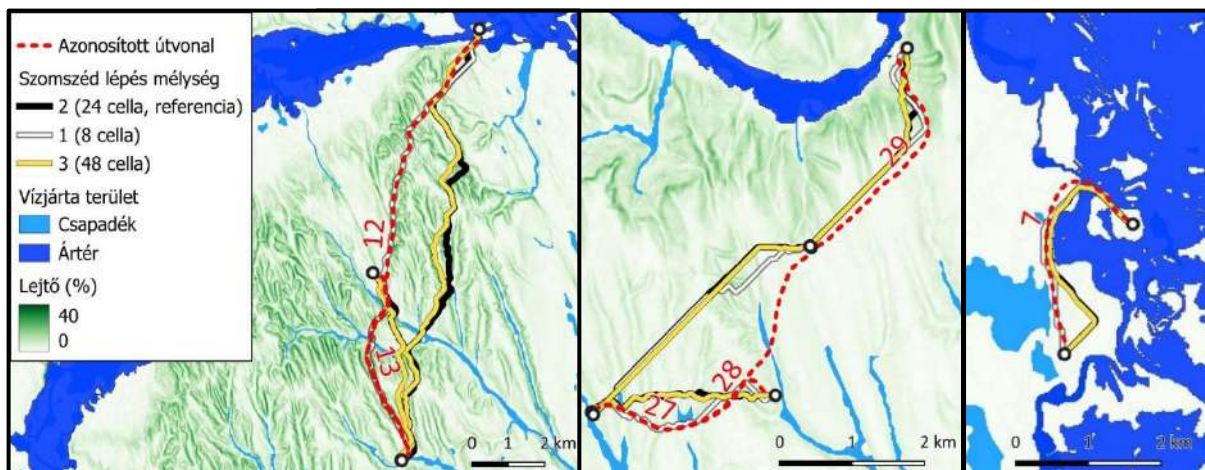
A paramétereket egyesével vizsgáltam, értelmezve változtatásuk hatását A döntést grafikus alapon, az nyomvonal változásával összhangban hoztam meg. Terjedelmi okok miatt kiválasztott leginkább jellemző útszakaszokon keresztül szemléltettem a várható hatást. A paramétereket az fenti táblázat tartalmazza (3 táblázat). A végső költségfüggvény(ek) meghatározásakor figyelembe vettem a jól teljesítő paramétereket, a változatos domborzati és vízrajzi viszonyokat is. A kiinduló lehető legegyszerűbb költségfüggvény $f(0) = 1 + \text{víz költségek} + \left(\frac{\text{lejtő \%}}{8 \%}\right)^2$ már önmagában is meggyőző eredményeket hozott. Különösen azokon a szakaszokon, ahol markáns domborzati viszonyok domináltak és az útvonalvezetés közel egyenes volt.

Az útkeresés mélységének változtatása A* algoritmusban

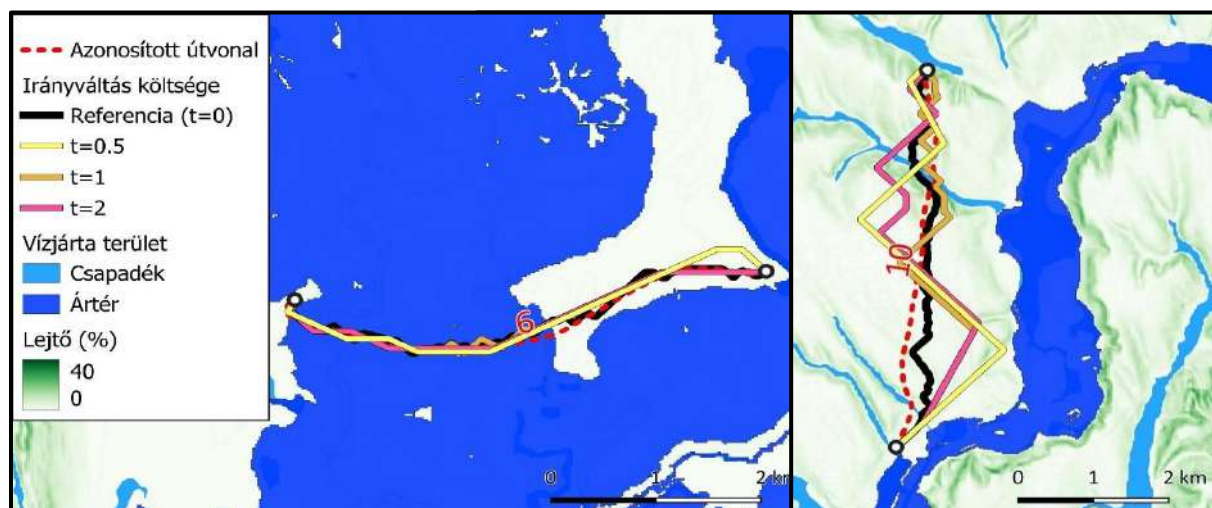
Huber és Church, vizsgálata alapján⁸⁵ a lehetséges lépések számának növelése útkeresés javítását hozza magával. Esetünkben azonban majdnem az ellenkezője tapasztalható: a 48 (7x7) területű keresés szinte minden esetben a legrosszabbul teljesítő, míg a 8 (3x3) cellás a legjobb választás volt. Bizonyos esetekben kevésbé teljesített jól a 8 cellás keresés, mint a 24 cellás keresés (9-es és 18-as egyenes útszakaszok), de ezen felül a legkisebb keresés előnye egyértelmű az LCP utak modellezésében a megadott beállítások és költségfüggvény mentén.

Két ok sejthető a 8 cellás keresés jó teljesítménye mögött. Egyrészt a pixelfelbontás miatt a szűk völgyek nyomvonalát (12, 13, 29 északi szakasza) 20 helyett 40-60 méter-es lépésekkel hajlamosabb elhagyni az algoritmus útkeresése egy látszólag olcsóbb út kedvéért. Ez a hatás tapasztalható kevésbé markáns területeken (28), ahol a két település közötti mély völgy magas lejtőszög értékeit a kiátlagolás lecsökkenthette. (1. tábla) A másik, hangsúlyosabb ok az, hogy az A* esetén a cél felé tett nagyobb lépések a heurisztikus súly miatt sokkal olcsóbb lehet, ha minimális a domborzatból származó költség. Ez esetben egyértelműen hibás megközelítés nagyobb keresési terület használata a heurisztikus súly miatt, amely ilyenkor képes a költségmezők „átugrására” és irreális LCP utak létrehozására (7-es út).

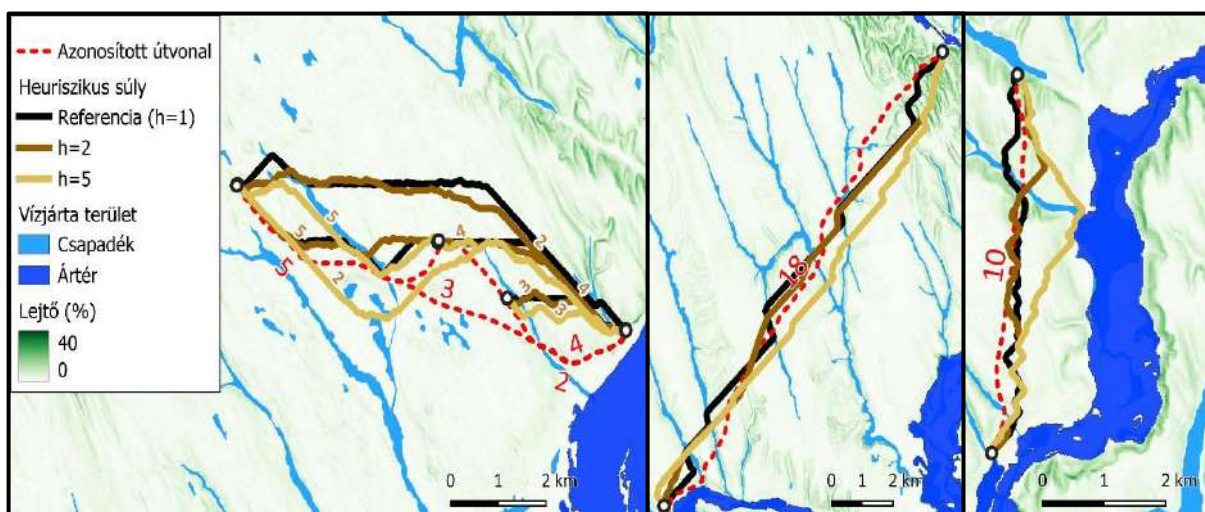
⁸⁵Huber és Church, „Transmission Corridor Location Modeling”, 114–132.



1. tábla. Az szomszéd lépés megválasztásának hatása az LCP utak modellezésében.
 (saját szerkesztés)



2. tábla. Az irányváltás hatása költségtenyezőként az LCP utak modellezésében.
 (saját szerkesztés)



3. tábla. A heurisztikus súly paraméterezésének hatása az LCP utak modellezésében.
 (saját szerkesztés)

A heurisztikus súly megváltoztatása

A heurisztikus súly növelése eltérést jelent a legkisebb költségű utak elemzésétől, ugyanis, ha nem teljesülnek a heurisztikus feltételek, akkor nem garantált, hogy a legkisebb költségű utat kapjuk végeredményként. Ahol relevanciája van a súly növelésének, azok a hosszabb útvonalak. A távolság csökkentés preferenciája úgy értelmezhető, hogy az út megtételéhez fontosabb a gyorsaság, mint hogy a lehető legolcsóbban tegyük meg az útszakaszt. Ez a logika hosszabb útvonalak esetén bizonyos esetekben jobb eredményre vezet.

A kétszeres súly kismértékben minden esetben javít az út vonalvezetésén, elsősorban azon a szakaszon, ahol kisebb volt a domborzatból fakadó költség (2, 18-as útszakasz). Az ötszörös súly kifejezetten rontott, teljesen más domborzaton vitte a keresztül az LCP utakat, mint a valóságban történt (2. tábla).

Irányváltás költsége

Az irányváltás büntetése ott merülhet fel, ahol az egyenes útvonal preferált: vagy a domborzati viszonyok lehetővé teszik az egyenes haladást, esetleg az út nagyrészt kedvezőtlen terepen fut. Ilyenek a vízjárta területek, ahol optimálisabb minél kevesebb oldalirányú lépést tenni. A fordulás költsége 1-es és 2-es költségértékkel jól simít az útvonalon a referencia költségfüggvényhez képest, ahol nincsen domborzat, és a vízrajz a meghatározó (6). A vízrajz által dominált területen az út kevesebb fordulót tartalmaz, vagyis rövidíti az út hosszát a 24 cellás lépés esetén. Jelentős szintkülönbség esetén a megközelítés egyáltalán nem működik (10), teljesen megváltoztatja az útkeresés logikáját (3. tábla).

Kritikus lejtő hatásának megváltoztatása

A kritikus lejtő hatását tartalmazó tag kitevőjének növeléskor az előzetes várakozás az, hogy az LCP utak még inkább elkerülik az éles domborzati váltásokat, nagy lejtőszögeket. A lankásabb és sík területeken ez lényegében nem változtat a kiindulási utakon. Ahol meghatározó a lejtő meredeksége, ott a magasabb kitevő megfontolandó módszernek tűnik a serpentinekét utánzó útvezetés azonosításra, a hatvány kitevő növelésével a hatás jobban érzékelhető. A 14. és a 20. út esetében például jól követte a valós utat, minimális eltéréssel, ami azt mutatja, hogy bizonyos esetekben, ahol szélesebbek a völgyek alja és a hegygerincek teteje, a módszer működőképes. Ezzel szemben a 8. és 19. számú út esetén kifejezetten eltérő eredményt

produkált, a módszer hegygerince és völgybe is „túlillesztette” az utat, ami nyilvánvalóan nem felel meg a valós útvonalvezetésnek (4. tábla).

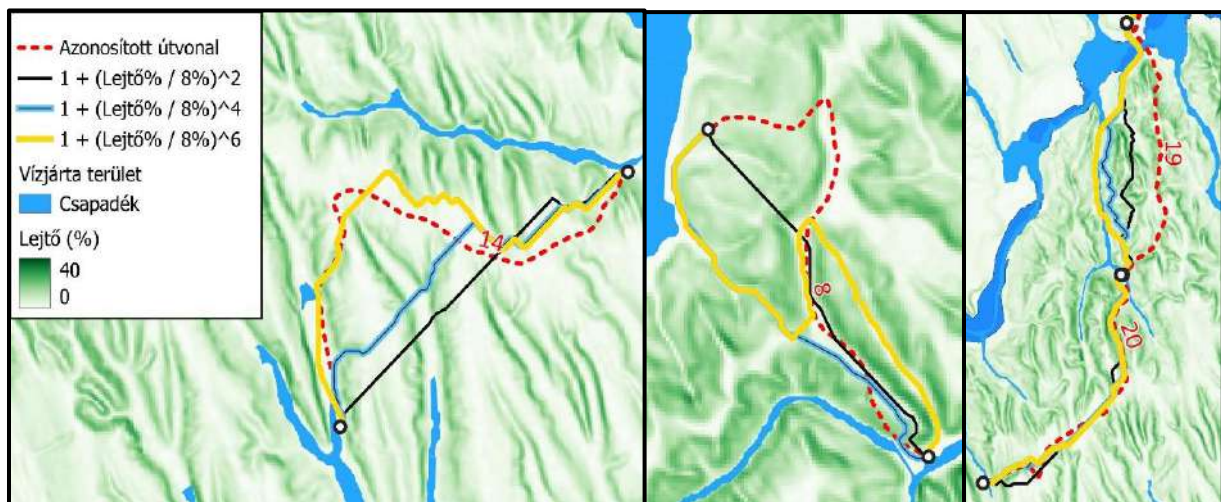
Kritikus lejtőszög megválasztása

A kritikus lejtőszög meredekségét 8-15%-ban adja meg a szakirodalom.⁸⁶ A kiinduló 8% konzervatívabb érték, erről a skáláról. A kritikus lejtőszög növelése, vagyis a büntetés csökkentése esetén inkább gyengébben teljesít az LCP (20-as útszakasz). Egyes esetekben (16,19) egészen javított a kritikus lejtőszög csökkentése, azonban a 17-es számú út esetén a kritikus lejtő megváltoztatta az út vonalvezetését a hatványkitevő esetében tapasztalt módon. A 6%-os szigorúbb kritikus érték egyértelműen értékelhető alternatívaként a 8%-is értékhez képest (5. tábla).

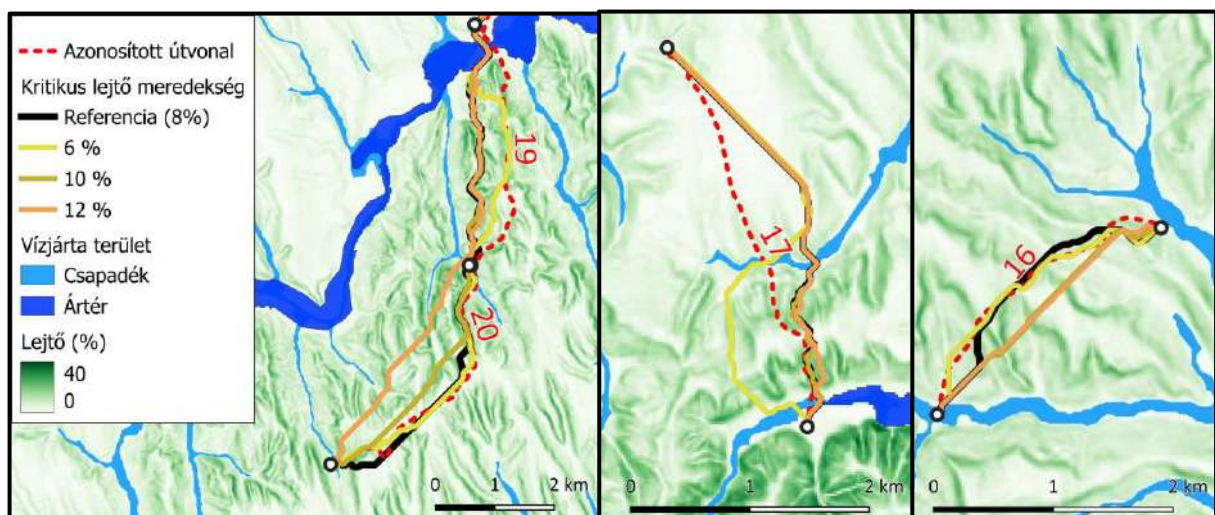
Kevésbé meredek lejtőszögek differenciálása

A paraméterek közül a legkisebb lejtőszögekre megalkotott büntetőtag a kevésbé költséges alternatívák közötti differenciálást szolgálja. A sík vidékek esetén a vízrajz, a tagolt domboságok esetén a lejtő mértéke nagyon erős befolyásoló tényező. Azonban jelentős területeket jellemez Tolna vármegye egykori területén egyfajta átmeneti, lankás domborzat akár a kritikusnál kisebb lejtéssel. Általánosságban jól teljesít az új tag, az 0,25-ös súly (x) akkor is, ha nagy lejtőszög volt az úton, cserébe kevésbé tért el a referencia költségfüggvény alkotta LCP út vonalvezetésétől (10, 29). A 0,5-ös és 1-es súly érték kifejezetten akkor jó hatású, amikor hegygerincet követett az azonosított út vagy a meredek lejtők elkerülését preferálja (27, 30, részben 28). Pont emiatt nem működik jól, ha az út nem a domborzat lankásabb részén halad (10). A költség tag hasznos kiegészítésnek tekinthető bárhol, ahol a domborzat jelentékeny tényező és az útvezetés más szempont nem írja felül (6. tábla).

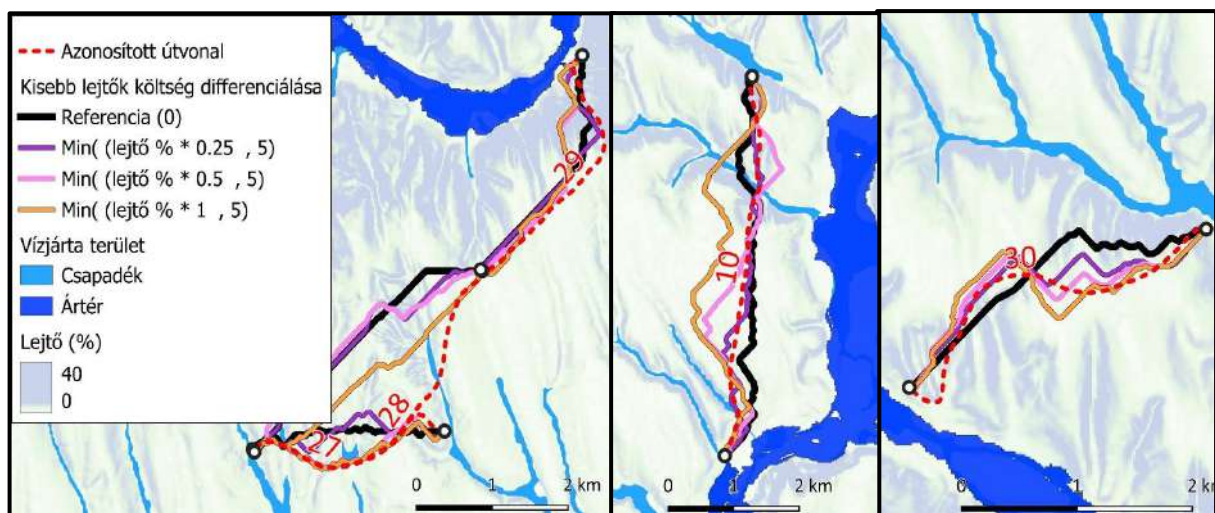
⁸⁶ Herzog, "Least-cost Paths – Some Methodological Issues.", 5.1.4



4. tábla. Kritikus lejtő hatásának a megnövelése az LCP utak vonalvezetésére.
(saját szerkesztés)



5. tábla. Különböző kritikus lejtő meredekség értékek hatása az LCP utak vonalvezetésére.
(saját szerkesztés)



6. tábla. A kisebb lejtők közti differenciálás hatása az LCP utak vonalvezetésére.
(saját szerkesztés)

4.2. A legjobb utakat eredményező költségfüggvények

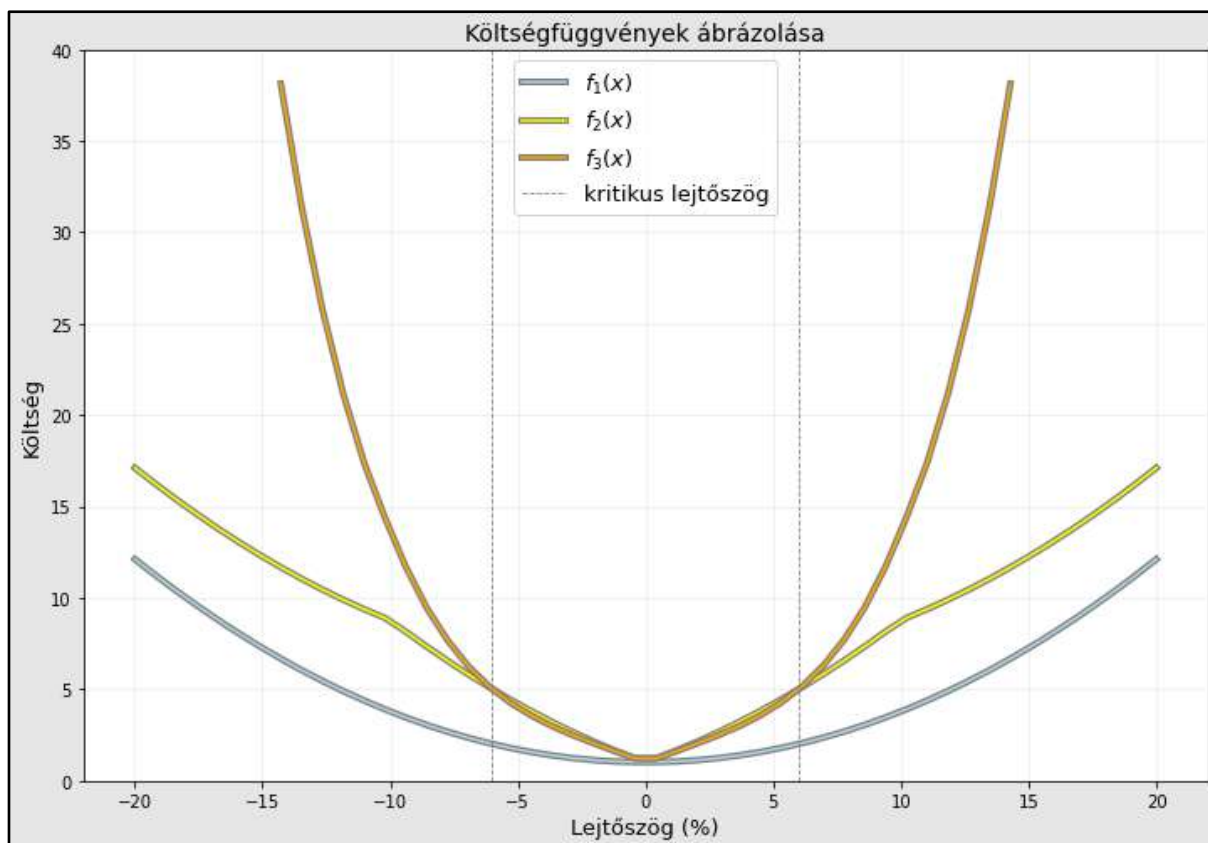
A paraméterek elemzését követően költségfüggvényeket alkottam a vizsgált értékek felhasználásával. A döntés során az összes LCP utat összevetettem meghatározott, limitált opciók között. A lehető legjobban teljesítő költségfüggvények megalkotására törekedtem, és arra, hogy lehetőleg az összes útra találjak legalább egy értékelhető megoldást. A 8 cellaszámú (szomszédos) lépés keresés preferált volt minden esetben, szintúgy a 6%-os kritikus lejtőszög. Az irányváltás költségének használata irrelevánsnak bizonyult ahogy a heurisztikus súlyé is, legalábbis a rövidebb útszakaszok esetén. A három választott és a kiinduló költségfüggvény LCP útjai 30-ból 7 esetben nem találta meg az azonosított nyomvonalat nagyobb kitérők nélkül (1,3, 5, 17, 18, 21, 24) melyből 3 központi helyekhez köthető út volt egykor (4,18,24). A többi, 23 esetben legalább 1 LCP út minimális eltéréssel követte a történeti forrásból vagy terepen azonosított útszakaszt. A hosszabb utaknál a „jól” modellezett LCP utak az esetek felében volt azonosítható (4/7), míg a szomszédos települések között utak több mint 80%-ára talált megoldást a megközelítés (19/23).

$$f(1) = 1 + \text{víz költségek} + \left(\frac{\text{lejtőszög}}{6\%}\right)^2$$

$$f(2) = 1 + \text{víz költségek} + \min((\text{lejtőszög} * 0,5), 5) + \left(\frac{\text{lejtőszög}}{6\%}\right)^2$$

$$f(3) = 1 + \text{víz költségek} + \min((\text{lejtőszög} * 0,5), 5) + \left(\frac{\text{lejtőszög}}{6\%}\right)^4$$

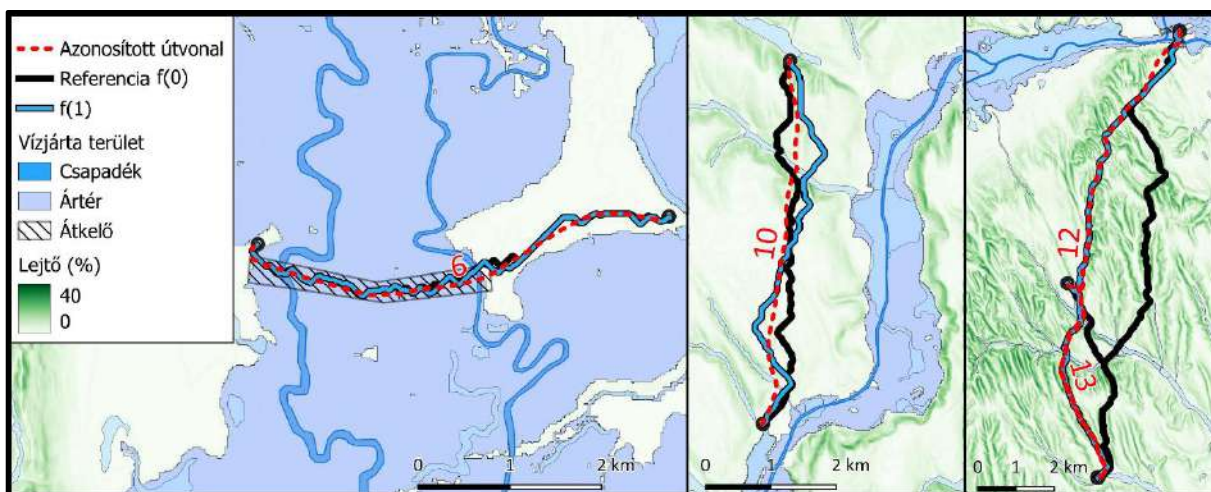
Érdemes hangsúlyozni, hogy kvalitatív az útvonalak megfelelő - nem megfelelő skálán értékelése, az egyes költségfüggvények erősségeit, gyengeségeit és hasznosíthatóságukat az alábbiakban értékelem (7-9. tábla). Az $f(1)$ költségfüggvény vízrajz által dominált területek és a domborzat által determinált utakon, illetve egyenes vonalvezetés rekonstruálásban teljesített jól a hosszabb útszakaszokon. (6, 10, 12, 13). A nyílt területeken, domborzat vagy vízrajz által kevésbé lehatárolt területen az egyenes vonalvezetés nem volt jellemző ezért ez a költségfüggvény nem teljesít jól ebben a környezetben. A második számú, $f(2)$ költségfüggvény általánosságban a legjobban teljesítő az utak rekonstruálásában,



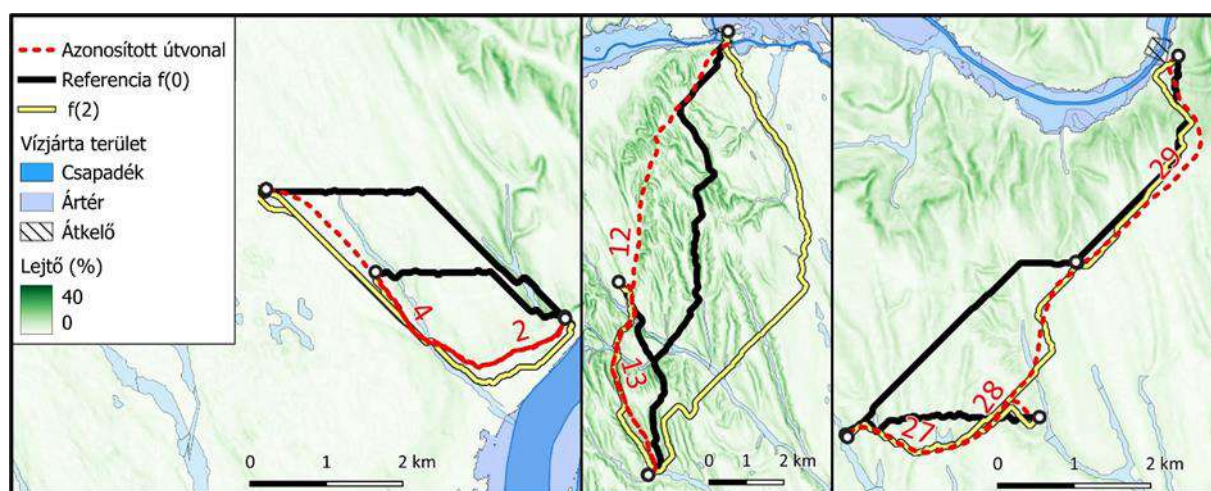
19. ábra . A költségfüggvények a lejtő meredekség függvényében (saját szerkesztés)

átmenetként $f(2)$ és $f(3)$ között. A változatos domborzaton, ahol a lejtő nem túl meredek (2,4) megtalálta a középkori út vonalvezetését, illetve azokban a helyzetekben is kiválóan teljesített az LCP, ahol az ismert út kikerülte a nagyobb lejtőszögeket (27, 28). Ahol a tagolt domborzat alapvetően vezette az utakat, ott sikeresen azonosította a nyomvonalat a költségfüggvény paraméterezés (13,29), azonban a változatosabb földrajzi környezetben – amely a hosszabb útszakaszokra jellemző – már az nyomvonalától eltérő útvezetést (12) hozott eredményül. Az $f(3)$ függvény a nagyobb hatványkitevőnek köszönhetően, jobban lekövette a kevésbé meredek utakat, és sikeresen követte az alacsony lejtőszöget preferáló, kanyargó útszakaszok vonalvezetését (8, 11, 14). A megnövelt kitevő miatt összességében kicsit rosszabbul teljesített az $f(3)$: jellemző probléma a nem indokolt kerülők létrehozása, általában a völgytalpakban.

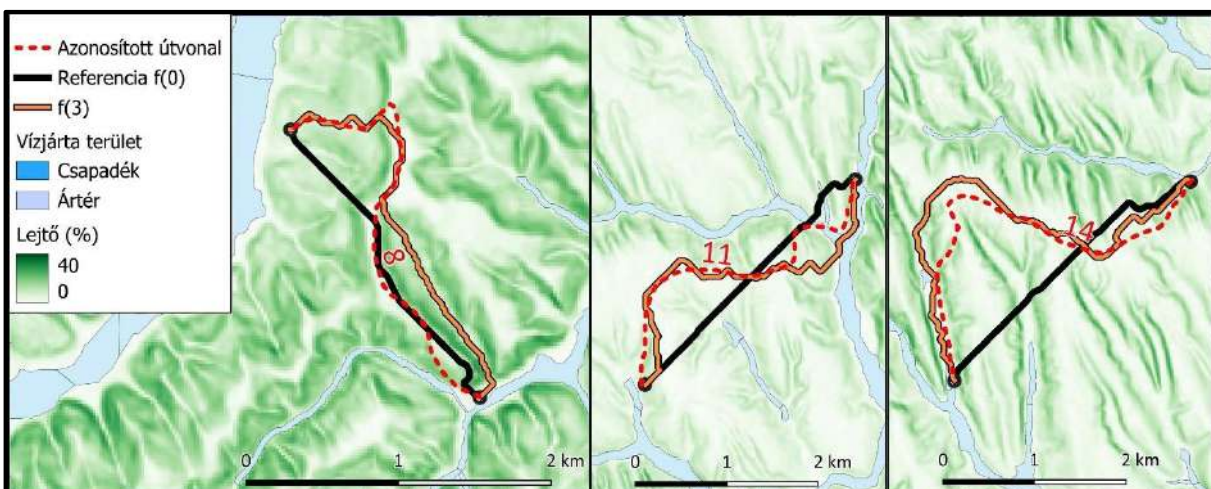
Két esetben az kiinduló $f(0)$ függvény volt a legjobb választás. Mind a két esetben (9,15, lásd függelék) víz és meredek lejtő között hosszan futó útról beszélhetünk, itt valószínűleg határesetről beszélhetünk, ahol minimális költségkülönbség van a tényleges és az LCP nyomvonal között, költség meghatározásától függően.



7. tábla . $f(1)$ költségfüggvény a legjobban teljesítő környezetben (saját szerkesztés)



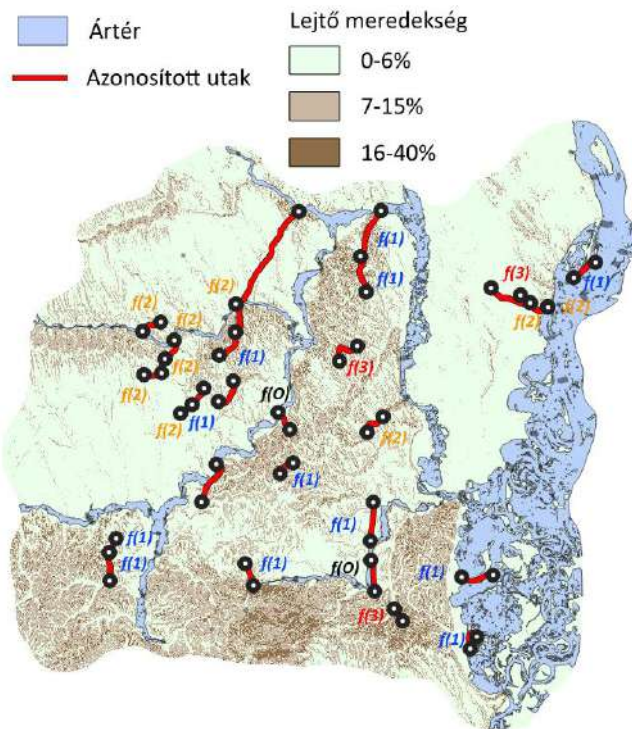
8. tábla . $f(2)$ költségfüggvény a legjobban teljesítő környezetben (saját szerkesztés)



9. tábla . $f(3)$ költségfüggvény a legjobban teljesítő környezetben (saját szerkesztés)

5. MODELLEZÉS EREDMÉNYEI

5.1. Területi jellemzők és a LCP utak kapcsolata



20. ábra. A földrajzi környezet és a legjobb költségfüggvények vázlatos kapcsolata (csak jó LCP utak esetén)

esetén. $f(1)$ a legjobb választás, míg a lankásabb területeken, ahol a kritikusnál kisebb (6%) lejtőszög a jellemző, ott $f(2)$ teljesített a legjobban. A tájegységek közötti határterületeken és a tagolt domborzat nem lehet egyértelmű megoldást azonosítani. Ez esetben is $f(2)$ használata tűnik logikusnak, mert ez a költségfüggvény felépítéséből adódóan egyszerre több eltérő környezetben jól teljesített.

5.2. Úthibák, LCP korlátai az eredmények értelmezésében

Külön kell szólni, a kevésbé azonosítható utakról, és a mögöttes okokról. A DDM felbontása és használati módja hatással van költségszámításra. Több esetben előfordult, hogy egy út egy völgy másik pontján ereszkedett le, amit pixelfelbontás csökkentése okozhatott. A tapasztalható eltérés nem volt jelentős, az utak azonosításának szemszögéből nézve. Helytelen adat szintén ronthat, vagy egyenesen ellehetetlenítheti az LCP elemzéssel az út követését. Erre példaként hozható a 17.-es útszakasz, mely esetén Máté Gábor több középkorra datálható út maradványát is azonosította erodálódott völgyekben, amik mai domborzati viszonyok között nem járhatók (ábra). Ebben az esetben az LCP modell – helyesen – nem találta meg az utat a

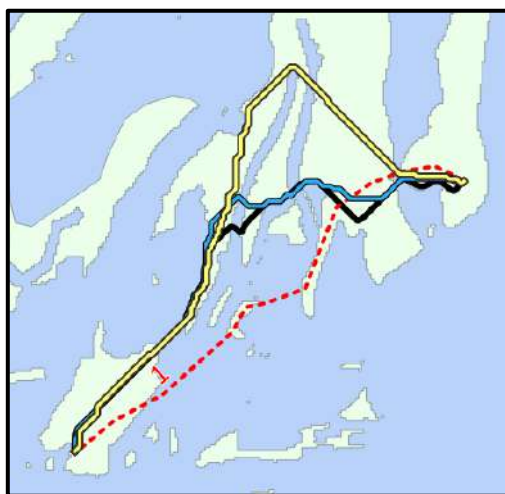
Összességében a domborzat és a vízrajzot felhasználó LCP modellezés sikeres eszköznek bizonyult a valós utak azonosításában. A tapasztalt mintázatok kiértékelése és csoportosítása a földrajzi környezetből kiindulva nem egyértelműen eldönthető. Egyes területeken döntést lehet hozni a legjobb költségfüggvényről, más területeken viszont mind a négy, az elemzési keretek között sikeresnek bizonyult a megközelítés megfontolásra érdemes. Az ártéri területeken és meredek lejtők

mai ismeretinkből kiindulva.⁸⁷ A sík területen az árhullám modellezése is okozhat jelentős eltérést az egyébként várható úttól. Az 1-es útszakasz Madocsáról kiindulva egy árterest szel át, azonban az ártéri területen egy költség szempontból olcsóbb útvonal jött létre, amely a valóságban nem valószínű, hogy járható szárazulat. Ezt a hidrológiai modellezéssel javításával, a modellezés részletességének növelésével javítani lehet. (ábra)

Az utak vonalvezetésében esetünkben számos, a más elemzésben sikerrel alkalmazott paraméter nem volt költséggel ellátható információ hiányában, mint a talaj vagy növényborítottság.



21. ábra. Az LCP által elkerült középkori ma már járhatatlan 17-es útszakasz. (Máté Gábor felvétele)
Forrás: Máté, „A helyi úthálózat kutatásának néprajzi és településtörténeti kérdései”



22. ábra. A tökéletlen vízrajzi modellezésre érzékeny költségfüggvények az 1. számú út esetén. (saját szerkesztés)

A legfontosabb korlátozó tényező, hogy az utakat több külső hatás létre, amely miatt folyamatosan alakultak át és szűntek meg. Nem tudjuk meghatározni, hány variánsa létezhetett ugyanannak az útnak, és hogy ezekből mi az, ami költségtényezővé nem alakítható, amilyenek a korabeli emberi vagy gazdasági kapcsolatok. Amennyiben a költségelemzés helyesen azonosít egy ismert útvonalat, az nem feltétlen az egyetlen élő útkapcsolat két pont között. Megfigyelhető olyan LCP út, amely szinte tükörképe volt a történeti azonosított útnak, különösen lankásabb vagy síkvidéken (2, 3, 4, 5. útszakaszok), itt a költségek közötti minimális eltérés megértése segíthetne a megoldásban. Ez a probléma hatványozottan jelentkezik

⁸⁷ Máté, „A helyi úthálózat kutatásának néprajzi és településtörténeti kérdései” 585.

magasabb hierarchiaszinten lévő utak rekonstrukciójában, ahol sokkal több potenciális közel azonos költségű alternatíva létezhet az útszakaszon belül.

5.3. Szomszédos települések közötti utak tulajdonságai

Az azonosított nyomvonalak vizsgálata alapján néhány következtetés levonható a késő középkori vonalvezetéssel kapcsolatban elsősorban a rövidebb útszakaszokon. A szomszédos helyiségek közti utak esetében a valós utakat nagyon nagy mértékben meghatározták a domborzati és vízrajzi tényezők, legalább az egyik ismertetett költségfüggvény alkalmazásával nagy biztonsággal lehetett középkori útszakaszt azonosítani két település között az helyi modellezett domborzati és vízrajzi viszonyok között. Ez különösen ott, ahol kevés lehetőség van az út vonalvezetésének a megválasztására. Az is érzékelhető, hogy a rövidebb útszakaszok esetében a költségfüggvény minimalizálása, tehát az LCP megközelítés jobban teljesít más elgondolásokkal szemben, mint amilyen a távolság az útkeresés finomhangolásának módszerei.

5.4. Központi települések és útkapcsolataik

A központi helyek közötti és az oda vezető utakról kettős kép rajzolódik ki. Amennyiben szomszédságban vagy relatív közelségben helyezkedtek el ezek az települések, alkalmazhatóak voltak az útkereső algoritmusok az utak valósághű reprezentációra. A nagyobb távolságok esetén, különösen ott, ahol több földrajzi környezet és akadály váltja egymást (18-as út), már sokkal árnyaltabb a kép. Egyrészt a LCP költségének kipróbált beállításai a valóstól jelentősen eltérő útvonalakat eredményeztek. A heurisztikus súly drasztikus növelésével, az optimális költség helyett az rövidebb úthossz preferenciája már jobb eredményeket produkált. Ebben a kontextusban az út megtételéhez szükséges idő optimalizálására is törekvő utaknak tekinthetők a távolsági, középponti helyiségekbe irányuló utak. Ez is a racionális úthasználatként értelemezhető, a késő középkori útviszonyok között.

Érdemes kitérni egy jelenségre, amely a távolsági utak vonalvezetésére valószínűleg hatással volt, ez pedig más útvonal közelében fekvő települések. Amennyiben elfogadjuk, hogy a szomszédos települések közötti lokális utakat elsősorban az út megtételéhez szükséges befektetett energia minimalizálása vezérelte, akkor az ilyen utak láncolatáról is feltételezhető, hogy egy viszonylag olcsó út lehetett. A települések térszervező ereje is szerepet játszhat ebben, valószínűleg kedvezőbbek voltak a haladás feltételei a települések közelében, mint a

távolabb tőlük lehetett. Logisztikai és megbízhatósági szempontok is szerepet játszhattak, egyszerre lokális és távolsági funkciót betöltő utak jobban járhatók, esetleg biztonságosabbak voltak.⁸⁸ Az utak kialakulása is izgalmas kérdés a hosszabb útszakaszok esetén. A 16. századi vonalvezetés esetén kérdéses, hogy mennyire volt jellemző egy esetleg korábban még optimális úthálózat tovább élése hosszabb útszakaszokon, már megváltozott településföldrajzi viszonyok között. A jelenséget több esetben azonosították úthálózatok elemzése során.⁸⁹

5.5. úthálózat rekonstrukció a szomszédos települések között

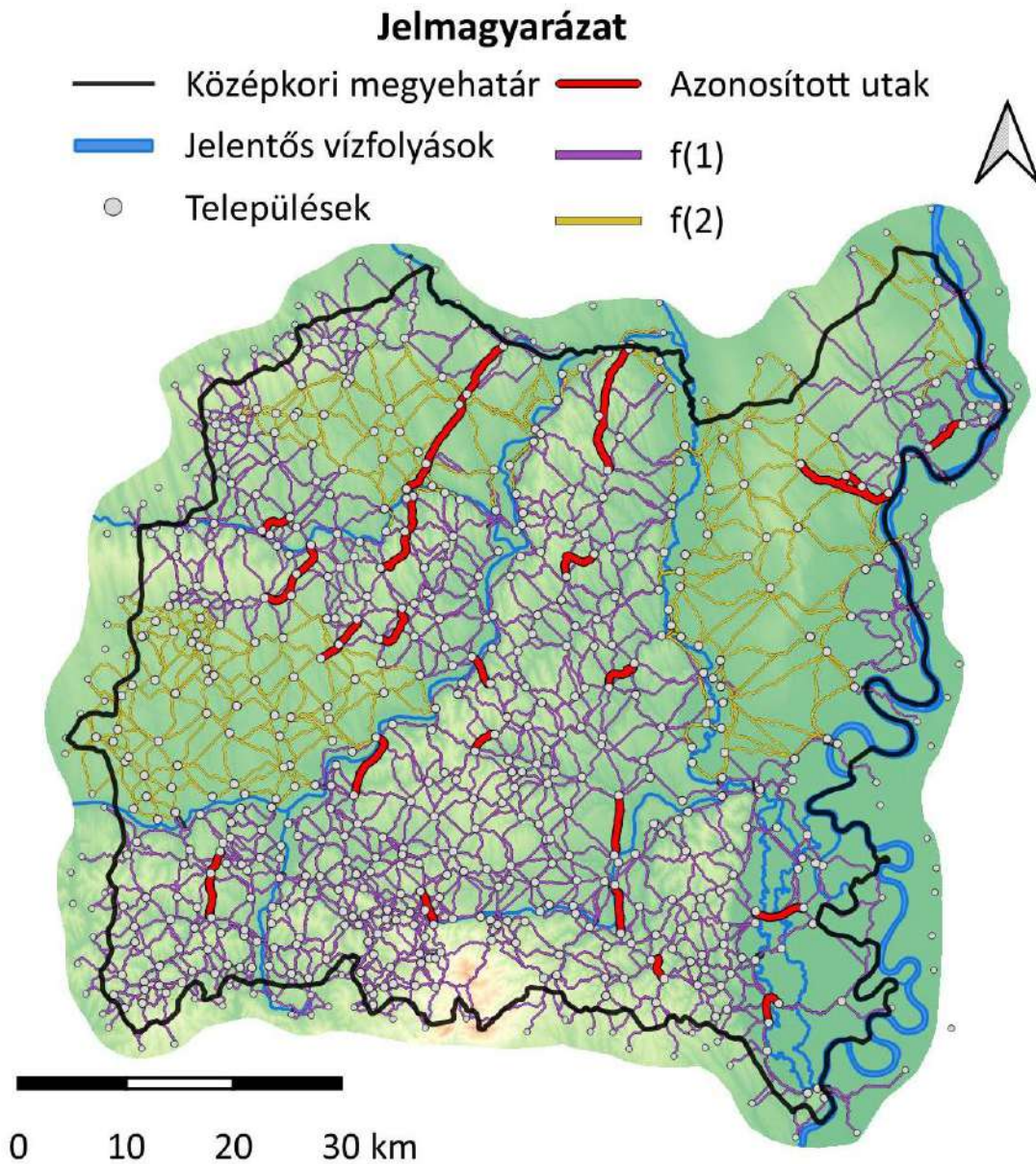
Az eredmények tükrében egy egyszerűbb szomszédos települések közötti utakat tartalmazó úthálózati rekonstrukciót alkottam. két kiválasztott költségfüggvény, az $f(1)$ és $f(2)$ a vizsgált utakat jól reprezentálta, kissé eltérő földrajz környezetekben. Ha az út ártérben, vagy legalább 10%-os lejtő meredekség közelében haladt, tehát befolyásolta a vonalvezetést az extrém felszín, az $f(1)$ költségfüggvény érvényesült. A fennmaradó területek, melyek lankás dombvidékeket és nyílt síkságokat takar az $f(2)$ függvény által generált LCP utak alkotják az úthálózatot. A Delanuay háromszögelés által meghatározott szomszédos kapcsolatok és a 3 kilométer távolságon belüli települések közötti utakkal együtt, Tolna vármegye települései között nagyjából 2000 útszakasz azonosítható.

Látványos a modellezett, „alaphálózatnak” is nevezhető útszakaszok struktúrája. A leegyszerűsített úthálózat modelljén az útszakaszok, pontosabban az azokat jelképező nyomvonalak jól lekövezték azonosított útszakaszok vonalvezetését (22. ábra). Igazi korlátot az utak egyéni vonalvezetésének meghatározása jelenti. A két megkülönböztetett földrajzi környezet között szintén érzékelhető a különbség. A nyílt területéén egyenletesebb az településeket összekötő utak térbeli megoszlása, hasonlóképp a felhasznált háromszögelés módszer háromszögeinek az oldalaihoz. A tagoltabb területeken utak vonalvezetése jelentősen tér el, azonos domborzaton. Egyes területeken a részletes térképlapokon útkötegek figyelhetők meg,⁹⁰ tehát vannak olyan útszakaszok, ahol az legkisebb költségű helyi utak is forgalmasabb utakká alakulnak. A vizsgált költségtényezők és határoló vízfolyások betöltik a szerepüket.

⁸⁸ Szilágyi, *On the Road*, 91, 97–107.

⁸⁹ Stibrányi 2015 85.

⁹⁰ Lásd: Függelék



23. ábra. Áttekintő térkép a szomszédság alapú, 16. század eleji rekonstruált (szekér)úthálózatról Tolna vármegye ismert települései között (saját szerkesztés).

ÖSSZEGZÉS

Az utak régészeti célú modellezése párhuzamosan fejlődött a GIS szoftverekkel és változatos minőségben és formában hajtottak végre elemzéseket elsősorban az LCP modellezés használatával. A módszer egyszerű használatának köszönhetően az elméleti megfontolások és az utakat kereső algoritmusok vizsgálata is háttérbe szorul a költség számítással szemben.⁹¹ Bár előszeretettel alkalmazzák útelemzésekhez, nagyobb léptékű kutatások nem jellemzőek. Magyarországon a módszer eddigi alkalmazása korlátozott volt utak vagy úthálózatok rekonstrukciójában, számos történeti és terepi kutatás mellett. A hagyományos írott és régészeti forrásokon alapuló útkutatás nagyon erős kiegészítő eszköze lehetne nem csak nyomvonalak azonosításában, hanem a településtörténet és településhálózatok működésének, rendező elveinek megértésében és elemzésében.

Az számítások helyes végrehajtásában kiemelt szerepe volt a lehetőségek szerinti legalaposabb térbeli modellezés előkészítésének, és a bemeneti adatok minőségének. A jól definiált műveletek ellenére is számos esetben tapasztalható volt felbontás hibájából vagy tökéletlen vízrajzi modellezésből fakadó hibák, melyek egyes utak vonalvezetését nagy mértékben befolyásolták. Tanulságos az útkeresés műveletének megtervezése és végrehajtása a megfelelő algoritmus segítségével, ugyanis nagy mértékben javíthat az útkeresés minőségén, ha lehetőség van igazítani a beállításokat a helyi viszonyokhoz. Ez igaz a költségtényezők vizsgálatára és a költségfüggvények meghatározására, a függvény hagyományos, grafikus alapú szelekciója is sikeres volt, azonban lett volna még tér a végeredmény javítására a megközelítés alkalmazásával.

A dolgozatban a késő középkori utak azonosítása a legkisebb költségű útkeresés végrehajtásával jó eredményekhez vezetett. Az esetek többségében LCP modellezéssel sikerült szinte pontosan azonosítani a nyomvonalakat. Ez önmagában erős érv amelllett a gondolat mellett, hogy az utak vonalvezetését a környezet determinálja. A rövidebb útszakaszok és települések közötti kapcsolatok esetén ez egyértelműen tapasztalható volt, míg hosszabb útszakaszok esetén korántsem ilyen egyszerű az utak értelmezése. Természetesen az optimális út nem feltétlenül esett egybe a minimális költségű utakkal, mivel történeti előzmények, jogi vagy más tényezők is befolyásolhatták az utak vonalvezetését. Megfelelő feltételek mellett a

⁹¹ Herzog, "Least-cost Paths – Some Methodological Issues.", 3.

környezet modellezése elégséges bemeneti információ a jó eredményekhez két távolabbi pont között. Az rekonstruált lehetséges úthálózat hitelesen jelenítette meg a megye úthálózatának egyik alapvető úttípusát, lehetőséget adva a településhálózat megértéséhez.

Kitekintés

Az úthálózat rekonstrukcióra irányuló kutatások számos lehetőséget kínálnak a történeti térszerkezetek és térbeli kapcsolatok mélyebb megértéséhez. A módszertan igazi erőssége abban rejlik, hogy képes új dimenziót nyitni a történeti térhasználat megértésében. Nem csupán útvonalakat rekonstruál a domborzat alapján, hanem feltárja azokat az összefüggéseket, kapcsolatrendszereket, amelyek korábban nem, vagy csak nehezen voltak láthatók és értelmezhetők.

A módszertan fejlesztésére, további finomítására van lehetőség és kívánatos lenne. Az egyszerű értékelési és páramét erezési módszer esetén lehetne hatékonyabb megközelítést keresni, ahogyan a költségfüggvény megválasztása sem történt ideális módon, elsősorban a kvalitatív megközelítésnek miatt. Ezeknek a változtatásoknak az elsődleges célja a hibák minimalizálása lehet, azonban az adatminőség javításában is van potenciál, ehhez az új generációs távérzékelési lehetőségek, mint a LIDAR, hatalmas segítséget nyújthatnak, nagy mennyiségű elérhető új adatra azonban még várni kell. Bár a jelenlegi kutatás technikai és terjedelmi korlátok miatt nem alkalmazott gépi tanuláson alapuló modelleket, jövőbeli kutatási irányként szintén van benne perspektíva. Az útkereső algoritmusok finomhangolása segíthet részletes képet adni az úthasználatról, akár lehetne az utakat vonalvezetésük éppen érvényes jellege szerint feldarabolni, és LASSO vagy hasonló megközelítésben értelmezni.

A kutatás legnagyobb lehetősége a régészeti és történeti forrásanyag újszerű hálózatelemzési módszereiben rejlik akár a jelenleg rendelkezésre álló módszertannal. Az 1990-es években Engel Pál történész nevével fémjelzett, saját korában újtató, de csak településekre és birtokokra fókuszáló középkori topográfia kutatás volt, amely értelmezés tekintetében új dimenziókat nyitott történeti adatokhoz a térinformatikai feldolgozással.⁹² A közeljövőben az (út)hálózatalapú megközelítés nyithat hasonló új kaput a kapcsolatrendszerek elsősorban földrajzi alapú feltárásához, amelyek rejtve maradtak az ismert településtörténeti adatainkban. Lehetőség nyílna a lelőhelyek közötti kapcsolatok vizsgálatára, a történeti

⁹² Engel Pál, *Magyarország a középkor végén* (2021)

személyek és események közötti térbeli összefüggések rekonstruálására fennmaradt források esetén, valamint a gazdasági kapcsolatok elemzésére. Különösen ígéretes terület a középkori helyi hálózatok alapos kiértékelése, ahol a rekonstruált úthálózatok képesek lehetnek feltárni teljes viszonyrendszereket. Magasabb úthierarchia szinten nem biztos, hogy megfelelő a teljességre való törekvés, azonban itt is lehetséges új típusú struktúrák, társadalmi és gazdasági kapcsolatok azonosítása.

IRODALOMJEGYZÉK

Ádám, László, Marosi, Sándor, és Szilárd, Jenő, szerk. *A Dunántúli-dombság: Dél-Dunántúl. Magyarország tájféldrajza (4)*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 1981.

Aston, Michael. *Interpreting the Landscape: Landscape Archaeology and Local History*. London: Routledge, 1985.

Bödőcs, András. *A római kori úthálózat térinformatikai vizsgálata a mai Magyarország területén*. Doktori disszertáció. Budapest: ELTE BTK, Régészettudományi Intézet, 2008.

Carroll, Fiona, és Carroll, Edward. "Budget Travel in the Mediterranean: A Methodology for Reconstructing Ancient Journeys through Least Cost Networks." *Journal of Computer Applications in Archaeology* 5, no. 1 (2022): 35–56. <https://doi.org/10.5334/jcaa.88>.

Conrad, O. et al., *System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4*. (2015).

Coulthard, Tom J., et al. "Integrating the LISFLOOD-FP 2D Hydrodynamic Model with the CAESAR Model: Implications for Modelling Landscape Evolution." *Earth Surface Processes and Landforms* 38, no. 15 (2013): 1897–1906 <https://doi.org/10.1002/esp.3478>

Engel, Pál. *Magyarország a középkor végén* (2021).

Internetes változat: <https://tti.btk.mta.hu/images/kiadvanyok/engel2020/Engel2020.zip>

Elérés: 2024 november 15.

E. W. Dijkstra. „A Note on Two Problems in Connexion with Graphs.” *Numerische Mathematik* 1 (1959): 269–271. <https://doi.org/10.1007/BF01386390>

Feldman, S. C. "GIS, Remote Sensing Analysis Used to Select Potential Route." *Pipeline and Gas Industry* 79, no. 5 (1996): 52–55.

Ferguson, Dave, Maxim Likhachev, és Anthony Stentz. "A Guide to Heuristic-based Path Planning." 2005.

Gowen, K. M. és de Smet, T. S. "Testing Least Cost Path (LCP) Models for Travel Time and Kilocalorie Expenditure: Implications for Landscape Genomics." *PLOS ONE* 15, 9 (2020). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0239387>

Gáti Csilla. „Légi lézerszkennelés eredményei a Pécs melletti Jakab-hegyen: Óskori földvár, középkori kolostor.” *Magyar Régészet* 6, sz. 3 (2017): 12–20.

Glaser, Lajos. „A Dunántúl középkori úthálózata.” In *Századok* 63–64 (1929–1930): 138–167, 257–285.

Herzog, Irmela. "The Potential and Limits of Optimal Path Analysis." In *Computational Approaches to Archaeological Spaces*. szerk. A. Bevan és M. Lake, 179–211. Point Reyes, CA: Left Coast Press, 2013.

Herzog, Irmela, „Least-cost Paths – Some Methodological Issues,” *Internet Archaeology*, 36 (2014)

Herzog, Irmela, és Alden Yépez. „The Impact of the DEM on Archaeological GIS Studies: A Case Study in Ecuador.” (Vienna: International Conference on Cultural Heritage and New Technologies, 2015): 1–18.

Herzog, Irmela. "Issues in Replication and Stability of Least-Cost Path Calculations." *Studies in Digital Heritage* 5, no. 2 (2022): 131–155. <https://doi.org/10.14434/sdh.v5i2.33796>

Hart, P. E., N. J. Nilsson, és B. Raphael. „A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths.” *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics* 4, no. 2 (1968): 100–107. <http://dx.doi.org/10.1109/TSSC.1968.300136>

Holte, Robert C. „Common Misconceptions Concerning Heuristic Search.” *Proceedings of the Third Annual Symposium on Combinatorial Search* (2010): 46–51.

Huber, D. L., és R. L. Church. „Transmission Corridor Location Modeling.” *Journal of Transportation Engineering* 111, sz. 2 (1985): 114–132.

Joacim Gärdss és Martin Oscarsson. *Exploring the Use of GIS-Based Least-Cost Corridors for Designing Alternative Highway Alignments*. BSc diss., KTH, School of Architecture and the Built Environment, 2019.

K. Németh András, „Tolna megye központi helyei a középkorban,” *URBS: Magyar Várostörténeti Évkönyv VIII* (2013): 213–247.

K. Németh András. „Adatok Tolna megye középkori útjainak kutatásához.” In *Fiatal Középkoros Régészek V. konferenciája* (Ferenczy Múzeum, Szentendre, 2013. november 21–23., 2014): 177–188.

K. Németh András, *A középkori Tolna megye települései. Településtörténeti adattár*. (Kézirat, 2015)

K. Németh András és Máté, Gábor. *Horhosok, puszták, bűvölíkok: Tájérténeti tanulmányok a 16–18. századi Dél-Dunántúlról. Studia Ethnologica Hungarica* (20). Budapest: Pécsi Tudományegyetem Bölcsészettudományi Kar Társadalmi Kapcsolatok Intézete Néprajz-Kulturális Antropológia Tanszék; L'Harmattan, 2020.

Kubinyi András. *Városfejlődés és vásárhálózat a középkori Alföldön és az Alföld szélén* (Szeged: Dél Alföldi Évszázadok 14, 2000): 13–16.

Lay, M. G. . *Ways of the World: A History of the World's Roads and of the Vehicles That Used Them*. New Brunswick, NJ: Rutgers University Press, 1992.

Lewis, Joseph Lewis, "Explaining Known Past Routes, Underdetermination, and the Use of Multiple Cost Functions," *Journal of Archaeological Method and Theory* 31 (2023) 854–874.

Madkour Amgad, Walid G. Aref, Ur Rehman Faizan, Abdur Rahman Mohamed, Basalamah Saleh, "A Survey of Shortest-Path Algorithms." *arXiv preprint*, 2017.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.02044>. Elérés: 2024 október 8.

Máté Gábor. *A Mecsek-vidék tájtörténete: Táj és ember viszonyának változása háromszáz év tükrében*. Doktori disszertáció. Pécs: PTE TTK, 2013.

Máté Gábor. „A helyi úthálózat kutatásának néprajzi és településtörténeti kérdései.” *Ethnographia* 125, sz. 4 (2014): 571–587.

Mesterházy Gábor. "Legkisebb költségű úthálózatok modellezése síkvidéki környezetben a neolitikumtól a középkorig." *Communicationes Archaeologicae Hungariae* 2017 (2018): 173–192.

Neteler, Markus, Bowman M.H., Landa Martin, és Metz Markus, „GRASS GIS: A multi-purpose open source GIS,” *Environmental Modelling & Software* 31 (2012): 124–130.

Parcero-Oubiña, C., Smart, C., és Fonte, J. „Remote Sensing and GIS Modelling of Roman Roads in South West Britain.” *Journal of Computer Applications in Archaeology* 6, no. 1 (2023): 62–78. <https://doi.org/10.5334/jcaa.109>.

Pánya István. „A Vajas folyó a történeti forrásokban.” *Hidrológiai Közlöny* 101, no. 2 (2021): 72–80

Pánya István. *A hódoltsági területek középkori és kora újkori településtopográfiájának kutatási módszertana Bács, Bodrog és Solt vármegyék példáján*. Doktori disszertáció. Szeged: SZTE TTIK, Földtudományok Doktori Iskola, 2022.

Pánya István. „Úttalan utakon. Adatok a késő középkori Bodrog vármegye úthálózatához.” In *Mohács szimfónia: Tanulmányok a mohácsi csatával kapcsolatos kutatások eredményeiből*, szerk. Varga Szabolcs és Türk Attila, 47–60. Budapest: Pázmány Péter Katolikus Egyetem BTK, Régészettudományi Intézet, Martin Opitz Kiadó, Duna-Dráva Nemzeti Park Igazgatóság, 2022.

Pánya István. „Fejér megye solti székének történeti földrajza,” in *Alba Regia: Annales Musei Stephani Regis*, 45., szerk. Szöllősy Csilla és Pokrovenszki Krisztián (Székesfehérvár: Fejér Megyei Múzeumok Igazgatósága, 2017): 135–180.

Papp László és Végh József, szerk. *Somogy megye földrajzi nevei* Budapest: Akadémiai Kiadó, 1974.

Pesti János, szerk., *Baranya megye földrajzi nevei I–II*. Pécs: Baranya Megyei Levéltár, 1973, 1982.

Pető Zsuzsa Eszter. "Római vagy középkori? Történeti utak a Pilisben." *Magyar Régészet*, sz. 6, 3 (2014): 1–8.

Rosta Szabolcs. *A Kiskunsági Homokhátság 13–16. századi településtörténete*. Doktori disszertáció. Kecskemét: Katona József Múzeum, 2014.

Seifried, Rebecca M., és Gardner C.A.M. . "Reconstructing Historical Journeys with Least-Cost Analysis: Colonel William Leake in the Mani Peninsula, Greece." *Journal of Archaeological Science: Reports* 24 (2019): 391–411 <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.01.014>

Stibrányi Máté. *Fejér megye középkori templomos helyei*. Doktori disszertáció. Budapest: ELTE BTK, 2015.

Szilágyi, Magdolna. *On the Road: The History and Archaeology of Medieval Communication Networks in East-Central Europe*. *Archaeolingua: Series Minor*, 35. kötet. Budapest: Archaeolingua, 2014.

Szilágyi, Magdolna. „Római utak a középkori Dunántúlon: Az utak nevei és szerepük a középkori térszervezésben." *Történelmi Szemle* 56, sz. 1 (2014): 14–19.

Telbisz Tamás, Székely Balázs, és Timár Gábor, *Digitális Terepmodellek. Adat, látvány, elemzés* Budapest: 2013. Elérés: 2024. november 15. <https://mek.oszk.hu/12000/12042/>

Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, és Clifford Stein, *Új algoritmusok*. Budapest: Scolar Kiadó, 2003. 500.

Verhagen, P., Brughmans, T., Nuninger, L., és Bertoncello, F. „The Long and Winding Road: Combining Least Cost Paths and Network Analysis Techniques for Settlement Location Analysis and Predictive Modelling.” In *Archaeology in the Digital Era*, szerk. Philip Verhagen és Graeme Earl, 357–366. Amsterdam: Amsterdam University Press, 2014.