

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM
INFORMATIKAI KAR

Útvonal és időkötség tervezésének problémája terepi körülmények között

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA DOLGOZAT

Készítette:

Sárközy Zsófia

Témavezető:

Dr. Albert Gáspár

egyetemi docens

ELTE Térképtudományi és Geoinformatikai Intézet

Budapest, 2022

„A Kulturális és Innovációs Minisztérium ÚNKP-22-2 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.”



Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
1.1 Az útvonaltervezés matematikai háttere	4
1.1.1 Dijkstra-algoritmus	5
1.1.2 Távolságszámítás raszteren	5
1.1.3. Költségraszter és kumulált költségraszter	6
1.2 Terepi útvonaltervezési algoritmusok	6
1.2.1 Útvonaltervezés egészségügyi ellátásban	6
1.2.2 Tobler függvényei	10
1.2.3 Térinformatikai alapú útvonaltervezés tájfutótérképeken	11
1.3 A terepi útvonaltervezés felhasználása	14
2. Alapadatok és módszerek	15
2.1 Domborzatmodell készítése	15
2.2 Modellek által alkotott útvonalak	16
2.2.1 Útvonaltervezés fedettség és úthálózat alapján	16
2.2.2 Útvonaltervezés lejtőmeredekség és úthálózat alapján	18
2.2.3 Útvonaltervezés fedettség, úthálózat és domborzat alapján	18
2.3 Felhasználói útvonalak gyűjtése és elemzése	19
2.3.1 Útvonalak gyűjtése	19
2.3.2 Útvonalak elemzése	20
3. Eredmények	21
3.1 Felhasználói tesztek eredménye	21
3.2 Útvonaltervezési algoritmusok által adott eredmények	25
3.2.1 A felszínborítottság és úthálózat alapján tervezett útvonalmodellezés eredményei	25
3.2.2 A domborzat és úthálózat alapján tervezett irányfüggő útvonalmodellezés eredményei	27

3.2.3. A felszínborítottság, úthálózat és domborzat alapján tervezett útvonalmodellezés eredményei	29
3.3 Eredmények összehasonlítása.....	30
4. Eredmények értékelése	33
5. Összefoglalás	35
6. Hivatkozások.....	37
7. Ábrajegyzék	39
Köszönetnyilvánítás	41

1. Bevezetés

A hétköznapi nyelvben használt "terepi körülmények" kifejezés az úthálózat hiányát vagy gyér jellegét jelentik. Ilyen körülmények között is szükség lehet a helyváltoztatásra, és annak gyorsasága, és idejének pontos becslése létfontosságú bizonyos helyzetekben. A terepi navigáció során hozott döntések komplexitása miatt eddig még nem sikerült megfelelően modellezni az emberi tájékozódást.

A térbeli helyváltoztatás elemzési módszerei általában feltételezik, hogy minden ember azonos sebességgel halad és a járművek rendelkezésre állnak az utazás megkezdésekor azonnal, valamint az utazási körülmények - mint az időjárás vagy a napszak - állandóságát. Emiatt csak átlagos esetek modellezhetők. Az elemzéseket befolyásolja a használt metódus is: utazási modellek során általában úthálózatot elemeznek, amely komplex szabályrendszert képes kezelni, de nem veszi figyelembe az útról letérve való közlekedés lehetőségét, holott vidéki régiókban a fejlődő világban sokszor szükséges utakról letérve haladni a közlekedési infrastruktúra eléréséhez (Delamater et al., 2012). Ezzel szemben a raszter alapú elemzés során minden egyes cellához társítható utazási sebesség. Ez lehetővé teszi az útvonaltervezést utakon és azokról letérve egyaránt, így gyér úthálózatú területeken ez tekinthető preferált módszernek.

A raszter alapú útvonaltervezés számításigénye nagy, ami a módszer elterjedését korlátozza. Alkalmasak sok változó kezelésére, azaz számos mennyiségi vagy minőségi térbeli jellemző egyidejű figyelembevételére, amelyek a felszín fizikai tulajdonságait írják le. Azonban nagy felbontású térképeken vagy nagy távolságokban tervezve jelenleg nehéz modellt alkotni. A kutatás során célom megvizsgálni, hogy milyen modellekkel lehet jó közelítéssel optimális útvonalat tervezni az úthálózat megléte és minősége mellett más változót is figyelembe véve.

1.1 Az útvonaltervezés matematikai háttere

Két pont közötti legrövidebb vagy leggyorsabb útvonal kiválasztására eltérő algoritmusok léteznek, amelyekben azonban közös, hogy az ideális útvonalat úthálózat alapján számítják, figyelembe véve az útszakaszokhoz tartozó különböző tulajdonságokat. Ezen algoritmusok eredményeképp számos navigációs programot használunk mindennapjaink során, ilyen például a Google Maps vagy a Bing Maps. Ezek az alkalmazások az egyes útszakaszokhoz rendelnek idő- és távolságköltséget, majd ez alapján keresik a leggyorsabb útvonalat (Luxen & Vetter, 2011). Így a térképen az úthálózat egy gráfként fogható fel, az útvonalválasztásokhoz csak az utakat veszik figyelembe, azaz a gráf élei mentén terveznek (Delling et al., 2009).

1.1.1 Dijkstra-algoritmus

Az útvonaltervezés matematikai problémájának megoldására több algoritmus is létezik, a később bemutatott módszerek a Dijkstra-algoritmust használják az útvonal megalkotásához (Dijkstra, 1959). Ennek az alapja egy gráf, ahol a pontokat összekötő éleknek a hosszát is figyelembe kell venni, a legrövidebb útvonalat keresi a módszer két tetszőleges pont között. Az algoritmus egy szélességi keresésre épül, amely először megvizsgálja azokat a pontokat, amelyek a kezdő ponttal közvetlen kapcsolatban vannak, hozzájuk rendeli a távolságukat a kezdőponttól és kiválasztja a legkisebb távolságút – ettől indul a keresés, és halad végig az összes szomszédos ponton. Ha a csomópont, amit vizsgál épp, kapcsolódik egy már megjegyzett távolságú ponthoz, és az új táv rövidebb a korábban megjegyzettnél, akkor a régi értéket felülírja. Ezt a folyamatsort iterálja addig, amíg a kiválasztott célpontot el nem éri.

Mivel az algoritmus bármilyen élekből és csomópontokból álló hálózaton működik, a vektoros úthálózatokon és raszteres adatmodellben is alkalmazható, ahol a raszter cellái csomópontok és szomszédsági kapcsolataik az élek.

1.1.2 Távolságszámítás raszteren

Az útvonaltervezés terepi körülmények között összetettebb és emiatt a gyakorlatban kevésbé elterjedt. A terepi útvonaltervezés során a terület mindegy egyes pontján vezethet az útvonal. Így nem elég utakat figyelembe venni a leggyorsabb útvonal számításához, hanem meg kell adni a térkép minden pontjának a költségét, azaz az adott ponton való áthaladás idejét a többi ponthoz viszonyítva. Ezeket a költségeket egy raszteres rétegeken – egy költségraszteren – tárolva kiszámolható két tetszőleges pont közötti leggyorsabb útvonal.

A legegyszerűbb eset, amikor a költségraszter celláinak értéke homogén; ekkor a kezdő és végpont közt egy egyenes út tervezését várnánk. mivel azonban a raszter cellái szögletesek, az „egyenes” a cellák középpontjait követve cikk-cakkban halad a kezdő és célpont között, és az út „költsége” a cellák közti távolság lesz.

A raszter képpontjai közötti távolság meghatározására több matematikai módszer is létezik. A legegyszerűbb módszer a hagyományos euklideszi távolság számítása, ahol a pixelek középpontjai közötti távolságot számítjuk. Az azonos euklideszi távolságra levő pontok halmaza egy kört rajzol ki a síkon. Az egyes távolságszámítási módszerek eredményeinek az értékelésére azoknak a körtől való eltérését felhasználhatjuk, valamint egymáshoz is hasonlíthatjuk őket. Lehetséges a 4 közvetlen szomszédot vagy a 8 derékszögű és átlós szomszédot 1 távolságra lévőnek venni. Ezekben az esetekben a merőleges irányban levő cellák

a pontos euklideszi távolságukkal megegyező értéket kapnak. Átlós irányban elhelyezkedő cellák távolsága azonban jóval az euklideszi távolság értéke alatt lesz. A chamfer, vagy letörési távolság számolásakor a közvetlen szomszédok értéke 3, míg az átlós szomszédoké 4. Így a cellák értékének aránya közelebb áll az euklideszi távolsághoz, ami szerint a szomszédosak 1 az átlósak pedig $\sqrt{2}$ távolságra vannak (Borgefors, 1984).

1.1.3. Költségraszter és kumulált költségraszter

Egy raszteres réteget, ahol az egyes cellák értéke a rajtuk való áthaladás költsége, költségraszternek nevezzük. Megalkothatunk ebből egy kiválasztott célpontra számított kumulált költségrasztert: ezen a felszínen a célponttól vett távolság súlyozva van a költségfelszín celláinak értékével. A legkisebb költségű útvonal egy lejtővonal lesz, ami a kumulált költségfelszín számításához kiválasztott célpontba vezet. (Douglas, 1994). A kumulált költségfelszín számítása előtt akár több típusú költséget tartalmazó rasztert is összeadhatunk (például domborzati és fedettségi adatokra vonatkozókat), és kijelölhetünk áthatolhatatlan zónákat is, amelyeken a cellaértékek kiugróan magasak a környezetükhöz képest.

A raszteres rétegeken alapuló útvonaltervezés összetett feladat és nagy a számításigénye, mivel a számítás pontosságát és így a megbízhatóságát a raszter felbontása határozza meg. A cellaméret csökkentésével pontosabb útvonalak tervezhetőek, azonban ekkor az adatmennyiség is nő, amivel dolgoznunk kell (de Smith & al., 2007). A költségraszter készítésére még nincsenek általánosan bevált elvek, számos tudományterület azonban alkalmazza már ezt az útvonaltervezési folyamatot. Régészet területén például legkisebb költségű útvonalak segítségével keresik meg a potenciális lelőhelyeket és modellezik az ősi útvonalakat (Rogers & al., 2013). Közművek, például utak vagy távvezetékek nyomvonalának tervezésére is alkalmazhatóak legkisebb költségű útvonalak (Bagli & al., 2011). Nincsen az emberi terepi mozgás problematikája azonban még jól tanulmányozva: a dolgozat célja ennek a folyamatnak a pontosabb megismerése és annak modellezésére különböző lehetőségek keresése.

1.2 Terepi útvonaltervezési algoritmusok

Létezik néhány olyan útvonaltervezési algoritmus, mely az emberek terepi mozgásának modellezését célozza és bizonyos terepi tényezőket figyelembe vesz, ezeket a következő fejezetekben fogom áttekinteni.

1.2.1 Útvonaltervezés egészségügyi ellátásban

Fischer és Lassa kutatásukban nyílt forráskódú programokat és szabad felhasználású adatokat használva, az egészségügyi ellátásra szoruló lakosok terepen való mozgására optimalizálták az

útvonaltervezést, elsősorban a vidéki Indonézia körülményeire fókuszálva (Fisher & Lassa, 2017).

Az elérhető egészségügyi szolgáltatásoktól távol élő csoportok azonosítására több geoinformatikai rendszer is rendelkezésre áll, ezek az ellátás helyszínétől való időbeli távolság alapján osztályozzák a lakóhelyeket. Ezek az eszközök a közlekedési és ellátási infrastruktúra fejlesztésének tervezésében segítenek (Higgs, 2004). Ezen döntéstámogató rendszereket azonban az input adatok pontossága korlátozza, valamint kvalitatív adatok és egyéni tapasztalatok kezelését nem teszik lehetővé. Ez limitálja az eszközök használhatóságát, sőt, az egyszerűsítések hatására még téves információt is szolgáltatnak néhány esetben. Ezen korlátok miatt szükséges az egyedi földrajzi körülmények között élő csoportok helyzetét megvizsgálni. Fisher és Lassa kutatásának fontos motivációja volt, hogy a rendelkezésre álló korábbi döntéstámogató és tervező eszközök magas szaktudást igénylő felhasználói felülettel rendelkeztek, így a fejlődő országokban nehezen voltak használhatóak, és a fizetős szoftverigényük miatt is kevesebben fértek hozzá (Neutens, 2015).

Egy egyszerű, nyílt forráskódú rendszerre volt szükség, amely interaktív modulok segítségével támogatja a helyi tudás felhasználását és a felhasználói beavatkozást a tervezés folyamatába. Ehhez egy új módszert alkottak meg, melyet a vidéki Indonézia egy területére fejlesztettek a kismamák halálozási arányának csökkentésére. Céljuk volt figyelembe venni a tervezés során az utazási időnek több változótól való függését, így a rendelkezésre álló (privát) járművek számát és az egészségügyi állapot hatását a mobilitásra, valamint a közlekedési és egészségügyi szolgáltatások elérhetőségének időbeli változását. Az utazást befolyásoló tényezőkre több kategóriát határoztak meg, amelyek a következők voltak:

- a páciens állapota szerint: gyaloglás, segített gyaloglás, vagy hordágyon szállítandó;
- napszak szerint: nappal vagy éjjel;
- időjárási körülmények szerint: száraz, esős vagy erősen esős;
- egészségügyi szolgáltatások elérhetősége szerint: az orvos elérhető vagy foglalt.

Összesen 36 lehetséges szituációba sorolták így az eseteket (Fisher & Lassa, 2017).

A nyílt forráskódú szoftverek és az ingyenesen elérhető adatok (műholdképek, magassági adatok) elterjedése lehetővé tette a kvantitatív elemzés kombinálását a kvalitatív helyi tudással.

A SAGA szabadfelhasználású GIS szoftver lehetővé teszi a műholdképek osztályozását, a vízrajzi elemzést, a távolságok költségének elemzését és programozási funkcióival segíti ezen folyamatoknak az összekapcsolását (Conrad & mtsai, 1991-2007).

Fisher és Lassa a SAGA GIS szoftveren belül fejlesztett egy eszközt, amely az elemzéshez szükséges folyamatokat egyszerűbbé teszi, de az utazási sebességre vonatkozó paramétereket a felhasználó adhatja meg, valamint diszkrét tényezőket – például akadályokat, új utakat – is hozzá lehet adni az elemzéshez. A modellezési paraméterek beállítását követően egyszerű lefuttatni az elemzést, amely gyorsan több változó szerinti eredményt ad a lehetséges helyzetekről.

Két fő részre bontható az elemzés: a felszínfedettségi raszter megalkotására és az utazási idő számítására. A két folyamat elkülönítésével a különböző helyzetek modellezéséhez nem szükséges a fedettséget újra számítani, ezzel lecsökken az elemzés ideje (Fisher & Lassa, 2017).

A felszínfedettségi raszter növényzetre, utakra és domborzati viszonyokra vonatkozó adatokat használ, melyek mind nyílt forrásokból származtak. A fedettségi adatok a Landsat-8 felvételekből származtak 50 m-es felbontásban, az utak pedig az Open Street Mapből exportált vektoros adatok voltak. A domborzati adatokból 90 m felbontású NASA SRTM-moddellen alapultak, ebből levezetve a vízhálózatot határozták meg a kutatáshoz, amely az utazást nehezítő tényezőként szerepelt. Egy raszter rácsot hoztak létre, melyben a műholdképek osztályozásával tizenkettő felszíntípust különítettek el, melyekhez meghatározott utazási sebesség tartozik (1. táblázat).

1. táblázat: Az egyes felszínborítottsági kategóriákhoz tartozó utazási sebesség és idő (Fisher & Lassa, 2017 nyomán)

azonosító	felszín típus	utazási sebesség (km/h)	utazási idő (s)
1	erdő	1	180
2	mező	2	90
3	csupasz, köves	3	60
4	bozótos	0,75	240
101	vízfolyás 1. kategória	2	90
102	vízfolyás 2. kategória	2	90
103	vízfolyás 3. kategória	2	90
104	vízfolyás 4. kategória	2	90
105	vízfolyás 5. kategória	0	99,999
201	országos főút/autópálya	50	3
202	másodrendű főút	25	7
203	mellékút/földút	10	18

A következő lépésben a felszínborítottsági rácsból számították ki a vektoros adatként megadott célpontoktól való távolságot. Ehhez szükség volt az egyes felszín típusokhoz társított utazási sebességeket tartalmazó táblázatra (1. táblázat), majd az idő költségek osztályozására. Így létrejöttek a célpontba utazáshoz szükséges idő szerinti zónák (Fisher & Lassa, 2017).

A kumulált költség felszínének számításakor a célpontok költsége 0, majd ettől távolodva a chamfer algoritmus szerint egy 5 x 5-ös kernel segítségével számították az egyes cellák lokális távolságát. Az eredmény az eredeti költség felszín 4 teljes bejárása esetén lett elfogadható pontosságú, az előző iterációk elhanyagolható mértékben növelték csak a pontosságot, viszont lényegesen lassabbá vált a művelet. Ezzel az algoritmussal nagyobb pontosságot tudtak elérni, mint a lokális euklideszi távolság számításával, 3x3-as kernellel. Az utazási időt a központi cellából a szomszédos cellákba a táblázatban megadott idők alapján számították. Ezt az utazási időt a központi cellához tartozó idő költséghez hozzáadva megkapták az új cella idő költségét (de Smith & al., 2007).

Az előbbieken leírt módszer során lehetséges a felszínborítottság szerkesztése, az egyes felszín típusokhoz tartozó sebesség megváltoztatása és a célpont megadása, így könnyen személyre szabható az elemzés. A helyi ismeretek felhasználása tovább növelheti a modell pontosságát.

Fischer és Lassa (2017) az elemzésüket a SAGA GIS szoftverre fejlesztették ki, ami a 2.5 verziótól kezdve annak beépített eleme lett, és a feldolgozás menüből elérhető (SAGA GIS,

2022). A módszer erőssége az egyszerűsége a folyamatok integrálása által és a személyre szabhatósága, valamint, hogy nyílt forráskódú szoftvert és akár ingyenesen elérhető adatokat is tud használni. A modell egy továbbfejlesztése lehetséges lenne a domborzati viszonyok figyelembevételével, ami különösen olyan területeken lenne fontos, ahol jelentős szintkülönbségek vannak, melyek az utazási sebességet befolyásolják. Egy másik korlát az adatok feldolgozásának a sebessége: a felbontás és a vizsgált terület csupán 1000x1000 celláig növelhető, e felett a szoftver már nem képes feldolgozni az adatokat. Ennek kiküszöbölésére a kódsor optimalizálására és más költségfelszínek használatára lenne szükség a szerzők szerint.

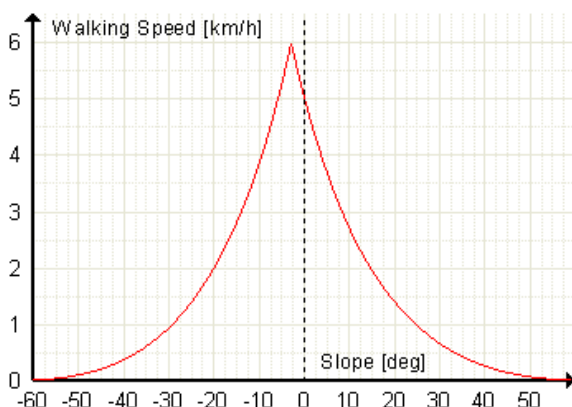
1.2.2 Tobler függvényei

Az egészségügyi ellátásra kidolgozott algoritmus hiányosságaként említett domborzati viszonyok figyelembevételére több módszer is létezik, amelyek közül az egyik első volt Tobler (1993) gyaloglási sebességet számító függvénye:

$$v = 6 \exp(-3,5 * \text{abs}(s + 0,05))$$

ahol v a keresett gyaloglási sebesség km/h-ban megadva, s pedig a lejtőmeredekség értéke radiánban.

Ezen függvény szerint elsősorban a terep meredeksége határozza meg a maximálisan elérhető gyaloglósebességet. Azonban a maximumát ez a függvény enyhén lejtő ($\sim 3^\circ$) terepen és nem síkon éri el (1. ábra), így a lejtőmeredekségre anizotróp felületként lehet tekinteni, ahol az azonos meredekséghez tartozó sebesség lefele haladva magasabb, mint felfele gyalogolva. Ennek következtében az időköltse is eltérő az adott szakasznak az ellentétes irányba haladva (Tobler, 1993).



1. ábra: Tobler függvénye: gyaloglási sebesség (km/h) a lejtőmeredekség ($^\circ$) függvényében (Tobler, 1993)

A fenti függvény értékei úton történő gyaloglásra vonatkoznak, utakról letérve a sebesség 0,6-szorosára, míg lóháton haladva 1,25-szeresére változik az eredeti értéknek Tobler szerint.

Többek között Tobler függvénye alapján is számolhatunk Alberti (2019) 'movecost' nevű QGIS bővítményével, ahol az úton történő gyaloglás vagy utakról letérő gyaloglás is

választható. Ez a módszer egy digitális terepmodell (DTM) alapján számolja ki a megadott rajt- és célhely közötti legkisebb költségű útvonalat a lejtőmeredekség alapján. Ez a bővítmény Tobler valamelyik függvényét választva a számítás során figyelembe veszi a lejtőmeredekség anizotróp mivoltát, így a két pont közötti legkisebb időköltségű útvonal eltérő oda- és visszaútra.

1.2.3 Térinformatikai alapú útvonaltervezés tájfutótérképeken

A tájfutásban való útvonaltervezés során a domborzati tényezők, a növényzeti fedettség, az úthálózat és az áthatolhatatlan terepi elemek kombinálására van szükség, mivel a versenyzők az útról letérve, terepen futva jutnak el a megadott ellenőrző pontokhoz (Albert & Sárközy, 2021). Az erre alkalmas költséggraszter vektoros digitális térképből és domborzatmodellből hozható létre, és az elsőként bemutatott egészségügyi ellátáshoz használt útvonaltervezéshez hasonlóan minden cellának van egy költségértéke, amely a rajta való áthaladás időköltségét tükrözi. Ezen a raszteren ki lehet számítani két megadott pont között a legkisebb költségű útvonalat, de ahhoz, hogy pontos modellt kapjunk, nagy térbeli felbontású (~1x1 m-es) költséggraszterre van szükség.

A jelen dolgozat előzményeként végzett vizsgálatban a költségfelszín megalkotásához egy választott mintaterület tájfutótérképe szolgált alapul (Albert & Sárközy, 2021). A térkép elemcsoportjaiból létrejött egy-egy domborzati elemeket tartalmazó, és egy fedettségi és úthálózati elemeket tartalmazó költségfelszín. Ezen felszínekhez a vektorosan tárolt térképi elemek raszterre lettek alakítva, és minden cella a rajta való áthaladás sebessége alapján kapott költségértéket.

A haladási sebességet befolyásoló fedettségi elemek költségét a 2. táblázat mutatja be. Ennek alapjául a tájfutó térképek nemzetközi szabványa szolgált (IOF, 2019), amely számos jelkulcsi elemhez konkrét haladási sebességet rendel. A terepen való haladás gyorsasága alapján az egyes elemek 0,1 és 1 közötti értéket kaptak, míg az áthatolhatatlan objektumok értéke 10 lett. A raszteressé alakított adatmodellben az utak is fedettségi elemek közé kerültek.

2. táblázat: Vonalas és felületi objektumok súlya a költségfelszín számolásában, az ISOM 2017-2 (IOF, 2019) jelkulcs alapján (Albert & Sárközy, 2021 alapján)

Típus	Térképi elem neve (ISOM 2017-2)	Súly
Vonalas	Sziklafal	0.7
	Áthatolható vízfolyás, keskeny mocsár	0.3
	Sövény	0.4
	Széles út, kociút, gyalogút	0.1
	Ösvény	0.15
	Felhagyott ösvény	0.2
	Keskeny nyiladék vagy egyenes nyomvonal	0.2
	Vasútvonal	0.15
Felületi	Nyílt terület, nyílt terület elszórt fákkal	0.2
	Durva nyílt terület, durva nyílt terület elszórt fákkal (bokrokkal; bozóttal)	0.25 (0.45, 0.6)
	Jól futható erdő	0.3
	Lassan futható erdő	0.35
	Nehezen futható erdő	0.4 (0.45)
	Leküzdhető növényzet	0.75
	Burkolt terület	0.1
Áthatolhatatlan	Áthatolhatatlan kerítés	10
	Áthatolhatatlan sziklafal	10
	Zárt terület	10
	Épület	10

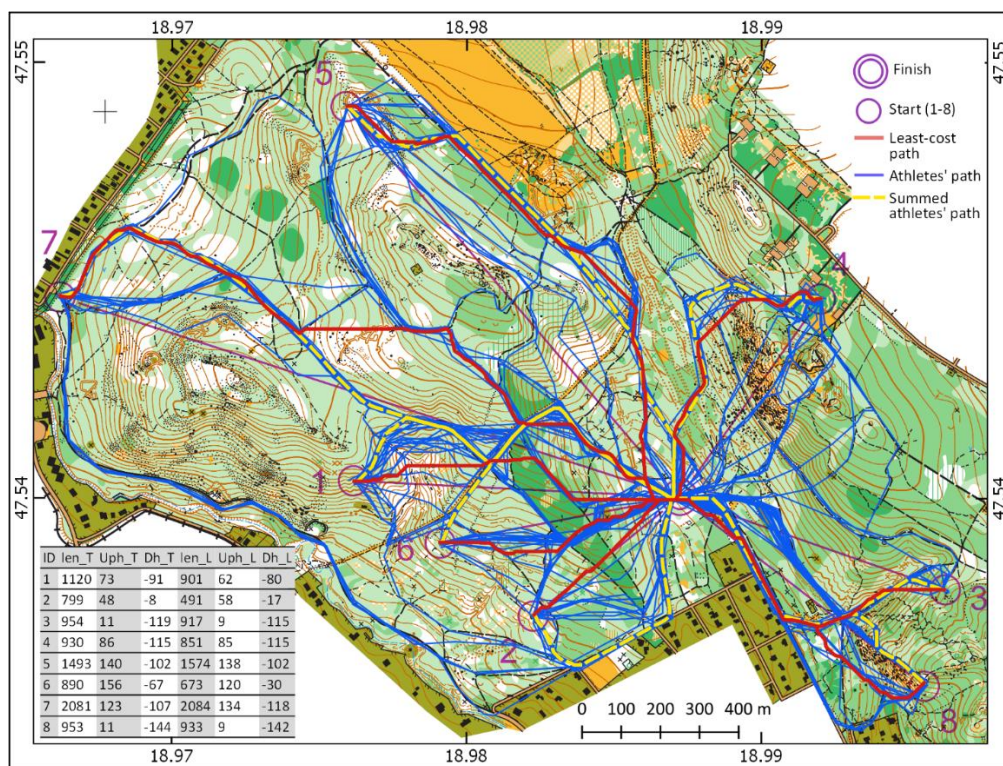
A terület domborzata is befolyásolja a haladási sebességet. Az ebből számított költségfelszín a tájfutótérkép szintvonalalaiból készült domborzatmodellre épült. A következő morфомetriai tényezők lettek meghatározva, mint a terepen való haladás sebességére jelentős hatást gyakorló elemek: az érdelességi index, a csapásirányú görbület és a lejtőmeredekség. A domborzati költségfelszín a fedettség és az utak kombinált költségével összhangban 0,1 és 1 közé lett normalizálva.

A domborzati és a fedettségi elemeket tartalmazó rétegeken a költségfelszín értékeinek azonos eloszlása érdekében a domborzati költségfelszín egy konstans szorzóval lett beszorozva. Az így létrejövő költségfelszínnek megfelelő súlyú kombinálása adta azt a költséggraszt, mely a legkisebb költségű útvonal tervezéséhez szolgált alapul.

Az egyes költséggraszterek megfelelő súlyozásának megtalálása érdekében felhasználói tesztek is készültek: elit és amatőr tájfutók rajzolták be az általuk ideálisnak tartott útvonalakat a mintaterület tájfutótérképére. Az útvonalakat kiválasztott rajt- és célpontok között adták meg a résztvevők, ezt a szakaszt a tájfutásban átmenetnek nevezik, így dolgozatomban is ezt a terminológiát használom. Ezek az átmenetek megegyeztek a digitális útvonaltervezésben

vizsgált átmenetekkel. Több teszt is készült; egy térkép csak a domborzatot, egy pedig a fedettséget és az úthálózatot ábrázolta, ezekre elit tájfutók rajzolták be az általuk ideálisnak vélt útvonalat. A modellezés során kapott adatok össze lettek hasonlítva a tájfutók útvonalaival, és a digitális útvonaltervezés paraméterei finomításra kerültek mindaddig, amíg az így kapott útvonal meg nem közelítette az elit tájfutók által megadott útvonalakat. Ez biztosította a modell paraméterezésének minőségét, mivel a felhasználói teszt során használt különböző térképeknek köszönhetően a részfolyamatok során kapott költségfelszínek helyességét egyesével is ellenőrizni lehetett. Legpontosabb eredményt akkor adott a modell, ha az összesített költségfelszínben a domborzati elemek 60%-os, a felületi elemek pedig 40%-os súlyt kaptak.

Készült továbbá egy felhasználói teszt is teljes tartalmú térképpel, ami vegyes tudású tájfutók útvonaltervezését rögzítette. A felhasználói teszt útvonalaiból készült egy hőtérkép, majd azon a legnépszerűbb útvonalak ki lettek számolva. A kutatás eredményeit a 2. ábra szemlélteti (Albert & Sárközy, 2021).



2. ábra: Felhasználói teszt során rajzolt útvonalak (kék), a felhasználók körében legnépszerűbb útvonal (sárga) és a modell által alkotott legkisebb költségű útvonal (piros). A táblázatban az egyes útvonalak hossza és az útvonal menti szintkülönbség található (Albert & Sárközy, 2021)

Az egyes útvonalak időkölségének becsléséhez a legkisebb kölségű útvonal mentén számolt kölség minden egysége 1,1-1,8 másodperc közötti értéknek felelt meg.

Az előbbiekben bemutatott módszer pontosságát növelné, ha a vizsgált területről lidar felvétel adatai rendelkezésre állnának. Ezen kívül a használt súlyok csak a mintaterületre lettek tesztelve, általános alkalmazhatóságukhoz további területeken lenne szükséges kipróbálni a modellt, és ezt a módszerbe épített eloszlás-harmonizáció elvileg lehetővé is teszi. Azonban azonos elven működő modell használható lenne bármilyen terepi haladást igénylő szakterületen. Ezekkel a felvetésekkel az említett tanulmányban is találkozhatunk.

Megemlítendő, hogy ez a számítási módszer nem veszi figyelembe a haladás irányát, így a domborzat anizotróp tulajdonságát az út során; azonos súlyt számol adott cellán való áthaladásra lefele és felfele egyaránt.

1.3 A terepi útvonaltervezés felhasználása

Az erdészek, vadászok, természetvédelmi örök munkájuk során letérnek az utakról, illetve bármilyen terepi mentés során is fontos a leggyorsabb útvonal kiszámítása, ahol sokszor szükséges lehet letérni az utakról. Fontos szerepe van a katonai csapatmozgások során is az ideális útvonal megtalálásának. Szabadidős tevékenységek körében is egyre több olyan program van, amelyek terepen való haladást kívánnak meg: ilyen sportág a tájfutás, de említhető számos teljesítménytúra és a különböző geocaching kihívások is.

A tájfutásban a két pont közötti leggyorsabb útvonal többnyire terepen halad, így a versenyző számára kihívást jelent a különböző terepi viszonyok haladási sebességre való befolyásának a felmérése és a legjobb útvonal kiválasztása. Míg azonban a tájfutó ezeket az útvonalakat a tanult képességei alapján választja ki, az útvonaltervező program számszerűsített változókkal dolgozik. Ugyanez a döntési folyamat játszódik le más terepi munkát igénylő feladatok esetén is. Mivel ezek némelyike (pl. katasztrófavédelem) nagy felelősséget és gyors döntéshozást kíván, véleményem szerint nagy igény van a terepi viszonyok számszerűsítésére és az útvonaltervezés automatizálására.

A korábbi fejezetek alapján látható, hogy a felsorolt kutatásoknak gyakorlati hasznosíthatósága is számottevő, de mivel mindegyik egy-egy speciális körülményre fókuszál, és más típusú adatokat használ, nehéz összehasonlítani őket. Fisher & Lassa (2017) módszere a fedettség, a vízrajz és az úthálózat alapján keresi a legkisebb kölségű útvonalat, kis térbeli felbontású adatokkal dolgoznak nagy területen. Tobler gyaloglási függvénye (1993) a lejtőmeredekség figyelembevételével eltérő sebességet ad meg felfele és lefele haladás esetére, így a legkisebb

költségű útvonal függ a haladás iránytól is. A tájfutótérképeken való útvonaltervezés figyelembe veszi a fedettséget, úthálózatot és a domborzati tényezőket is, azonban nincs tekintettel a haladás irányára (Albert & Sárközy, 2021). Dolgozatomban a bemutatott modellek segítségével a két pont közötti legkevesebb időbe kerülő útvonal megtervezésének a problémakörét vizsgálom, az emberi haladás sebességét figyelembe véve, terepi körülményekre fókuszálva. A kutatás az emberi tájékozódás folyamatának a jobb megértésére irányul a lehetséges modellek vizsgálatával és azok összevetésével terepi és elméleti tesztekkel.

2. Alapadatok és módszerek

A kutatás célja az emberi tájékozódási terepi körülmények között történő folyamatának vizsgálata a térképen ábrázolható terepi elemek függvényében. Ezek közé tartozik a domborzat, a vízrajz, a növényzeti és épített fedettség, valamint az úthálózat.

A kutatás részeként emberi alanyok önkéntes részvételével történt adatgyűjtés, ami az útvonalra és annak időkölségére egyaránt kiterjedt. A már létező útvonaltervező elvek és módszerek összehasonlító vizsgálatával megállapítható, hogy melyik és milyen paraméterek felhasználásával közelíti meg legjobban a terepen mért és a tesztalanyok által produkált eredményeket. Az így kapott adatok segítségével a cél a létező algoritmusok összehasonlítása és azok erősségeinek és hiányosságainak értékelése volt.

A vizsgált mintaterület Kápolnapusztá volt, a Vértes hegység egyik kedvelt területe Gánt község határában, amely a kirándulók és tájfutók körében egyaránt népszerű. A területről rendelkezésre állt közel naprakész tájfutótérkép (Sötér & al, 2021) valamint Lidar felvétel is. A területen zajlott 2021. 11. 5-6-án az Őszi Spartacus Kupa tájfutóverseny, melynek keretében az adatgyűjtés egy része zajlott. A tesztelésre kiválasztott kezdő- és végpontok szintén a verseny pályáiról származtak.

2.1 Domborzatmodell készítése

A terület domborzatmodellje egy Lidar felvétel alapján készült, melyet a Tabáni Spartacus SKE bocsájtott rendelkezésemre a kutatáshoz. A felvétel 2021. telén készült, 8,081 pont/m² átlagos pontsűrűséggel. A pontfelhőből a felszíni pontokat kiválasztva az OCAD2020 program segítségével készítettem 1x1 m felbontású domborzatmodellt, a felszíni (ground) pontokat felhasználva a digitális terepmodellhez.

2.2 Modellek által alkotott útvonalak

A kiválasztott kezdő- és célpontpárookra a korábban bemutatott útvonaltervezési algoritmusokat futtattam le, és azok eredményeit hasonlítottam össze a később bemutatásra kerülő felhasználói tesztekkel.

2.2.1 Útvonaltervezés fedettség és úthálózat alapján

A korábban ismertetett Fisher és Lassa (2017) által publikált modell eredetileg szabad felhasználású adatokra támaszkodik, amelyek a vizsgált gánti mintaterületről is elérhetőek. Azonban azok felbontása (10-90 m) elmarad a felhasználói tesztek során használt nagyméretarányú térképek felbontásától, így az nem alkalmas az összehasonlításra. Emiatt a rendelkezésre álló lidar-felvételekből szerkesztett domborzatmodell és vektoros tájfutótérkép segítségével hoztam létre az elemzéshez szükséges bemeneti adatokat.

Az elemzést SAGA GIS 7.9 szoftverkörnyezetben végeztem, ahol először a Fisher és Lassa cikkében (2017) publikált kategóriákkal és az ahhoz tartozó utazási időkkal futtattam le a modellt. Ezek a kategóriák és értékek a trópusi Indonéziára lettek megalkotva, így nem azonosak a Közép-Európában található objektumkategóriákkal, azoknak az utazási időkölsége is részben eltérő. Az eredeti paraméterek között öt kategória szerepel a vízfolyások csoportosítására. Ezek a domborzatmodell alapján kerülnek kiszámításra, és jelentőségük alapján sorolhatók kategóriákba. Ez a Strahler-sorrend alapján kerül meghatározásra, ahol a forrásnál minden vízfolyás értéke egy, majd minden összefolyásnál a találkozó vízfolyások értéke összeadódik (Strahler, 1957). A domborzatmodell alapján a mintaterületen is kiszámíthatóak a vízfolyások, azonban ezen a területen nem jelentenek jelentős akadályt, így az emberi haladásra sincsenek befolyással.

Azonban a módszer során lehetséges az egyes kategóriákba tartozó adatokat megadni és azokhoz tetszőleges költségértékeket rendelni egy táblázat segítségével, így az algoritmust a mintaterületre optimalizált paraméterekkel is lefuttattam. Ennek során a tájfutótérképeken való útvonaltervezéshez publikált (Albert&Sárközy, 2021) kategóriák egy részét és a hozzájuk tartozó időkölségeket használtam. Mivel az elemzésben a kategóriák száma és típusa (vektoros, vonalas input adatok és egy raszter felszín) nem változtatható, a kategóriákat szükséges volt részben összevonni, törekedve arra, hogy a fedettségi típusokhoz meghatározott költségértékek minél kevésbé változzanak (3. táblázat).

3. táblázat: Kategóriák és hozzá tartozó időkölségek Fisher & Lassa (2017) és Albert & Sárközy (2021) nyomán történő elemzéshez

Fisher&Lassa (2017) nyomán				Albert&Sárközy (2021) nyomán		
azonosító	felszín típus	utazási sebesség (km/h)	utazási idő (s)	ISOM2017-2 elem	ISOM2017-2 azonosító	időkölség tájfutás alapján (s)
1	erdő	1	180	Jól futható erdő	405	30
				Durva nyílt terület, durva nyílt terület elszórt fákkal	403, 404	
2	mező	2	90	Nyílt terület, nyílt terület elszórt fákkal	401, 401.001, 401.002, 402	20
3	csupasz, köves	3	60	Lassan futható erdő	406, 407, 407.001	40
				Nehezen futható erdő	408, 409, 409.001	
4	bozótos	0,75	240	Leküzdhető növényzet	410	75
101	vízfolyás 1. kategória	2	90	a területen nem meghatározó objektum		
102	vízfolyás 2. kategória	2	90			
103	vízfolyás 3. kategória	2	90			
104	vízfolyás 4. kategória	2	90			
105	vízfolyás 5. kategória	0	99999			
201	országos főút/autópálya	50	3	Széles út, kociút, gyalogút	502.001, 502.002, 503, 504, 505	10
202	másodrendű főút	25	7	Ösvény	506	15
203	mellékút/földút	10	18	Felhagyott ösvény, keskeny nyiladék vagy egyenes nyomvonal	507, 508	20
az elemzésben nem megjelenő objektumok				Áthatolhatatlan kerítés, Áthatolhatatlan sziklafal	518, 201.002	1000
				Kerítés	516	40
				Romos kerítés	517	30
				Sziklafal	202.001	70

2.2.2 Útvonaltervezés lejtőmeredekség és úthálózat alapján

A terület domborzatmodellje alapján a kiválasztott kezdő- és célpontok között kiszámítottam a legkisebb költségű útvonalat Tobler gyaloglási sebességet számító algoritmusai alapján.

Fontos elkülöníteni az úton és arról letérve haladást megadó függvényeket. Mivel a vizsgált terület domborzatmodellje és úthálózata egyaránt rendelkezésemre állt, így a két függvényt kombinálva tudtam alkalmazni. Úthoz tartozó sebességgel számoltam minden, a 3. táblázatban útként definiált jel esetében (széles út, kocsíút, gyalogút, ösvény, felhagyott ösvény, keskeny nyiladék vagy egyenes nyomvonal). Ezek vonalas jelek, így szélességük a vektoros állományban nincsen. Annak érdekében, hogy a későbbi legkisebb költségű útvonal tudjon az utakon haladni, az utak 1 méteres övezete került rasterizálásra, a későbbiekben ez a raster lett úthálózatként felhasználva.

A mintaterületre kiszámítottam a költségfelszín, aminek a költségei az utakról letérve történő haladást adja meg, majd ugyanerről a rétegről létrehoztam egy másolatot, melyet megszoroztam a Tobler által javasolt 0,6-os szorzóval, ez adta az utakon való haladás sebességét. A terepi haladás rétegén kimaszkoltam az úthálózat rasteres rétegét, az utak rétegén pedig mindent, ami nem út. Ezután a két költségfelszín összeadtam, így minden cella megfelelő értéket kapott aszerint, hogy út van-e ott vagy nem. Végül az így kapott kombinált költségfelszínen számítottam ki a kiválasztott célpontokra a kumulált költségfelszíneket és ezen a rétegen a legkisebb költségű útvonalakat és azoknak az időkölségét.

A kumulált költségfelszín és a legkisebb költségű útvonal számításához a SAGA szoftver Accumulated Cost és Least Cost Paths eszközeit használtam. Előbbinél az opcionálisan megadható irányfüggőséggel is számoltam, maximum költség irányának pedig a lejtőmeredekséget adtam meg. Így a domborzat anizotrópiájának figyelembevétele miatt a modell eltérő eredményt adott a két kijelölt pont közötti ellentétes irányokban számolva.

Mivel az irányfüggő kumulált költségfelszín létrehozása nagyon számításigényes volt, ezért ezen modell megalkotásához 2 méteres térbeli felbontású adatokkal dolgoztam.

2.2.3 Útvonaltervezés fedettség, úthálózat és domborzat alapján

A módszer alapja a tájfutótérképeken történő útvonaltervezés, így a gyalogos (futó) terepi haladásra van optimalizálva, alapja egy nagyméretarányú tájfutótérkép (Sötér & al, 2021). A fedettségi és vonalas elemek a korábban megállapított súlyokat kapták (lásd 2. táblázat), ezek alapján jött létre a költséggraszterük.

A morfometriai elemzések alapja a terület domborzatmodellje volt. Ez alapján kerültek kiszámításra a haladást befolyásoló domborzati tényezők: az érdességi index (TRI), a csapásirányú görbület (PC) és a lejtőszög (SLO). Ezen paraméterek normalizálása után került kiszámolásra a domborzati költségfelszín a korábban publikált képlet szerint:

$$\text{domborzat költség} = TRI \times \sqrt{\text{abs}(PC) \times SLO}$$

A két költséggrashteren előforduló értékek összehangolása érdekében a rétegek eloszlásmaximumát azonosra kellett hozni. A területen a domborzati raszter maximuma 0,12-re adódott míg a fedettségi raszteré 0,3. Egy konstanssal, a két maximum hányadosával meg lett szorozva a domborzati réteg, melynek értéke a területen 2,5 volt.

A fedettségi raszter 40%-os, és a domborzati raszter 60%-os súlyú összeadásával létrejött a kumulált költséggraszter, mely így már a domborzat mellett fedettséget és az úthálózatot is figyelembe veszi. Ezen a raszteren kerültek kiszámításra a legkisebb költségű útvonalak a kiválasztott átmenetekre, majd az útvonalak időköltsége.

2.3 Felhasználói útvonalak gyűjtése és elemzése

2.3.1 Útvonalak gyűjtése

A modellezéssel párhuzamosan terepi körülmények között útvonalak gyűjtése zajlott. Az alanyok egy tájfutó pályán, kijelölt ellenőrzőpontok között tetszőleges útvonalon haladtak végig a terepen, eközben rögzítettek a mozgásukról egy GPS track-et. Ez a terepi adatgyűjtés 2021. novemberében zajlott tájfutók részvételével, a GPS útvonalak gyűjtésére a Magyar Tájékozódási Futó Szövetség RouteGadget felülete szolgált (<http://rg.mtfsz.hu/rg2>). A pályák tartalmazták ugyanazon kezdő- és célpontokat, amelyek a modellezés során ki lettek jelölve. Ezen pontok között kellett az alanyoknak az általuk választott útvonalon végighaladni, ahol változatos terepviszonyok voltak mind domborzati, mind fedettségi szempontból, így várható volt, hogy a felhasználói útvonalak térbeli szórása nagy lesz. Összesen 9 GPS útvonal volt felhasználható a későbbi elemzés során, ezek mindegyike az adott pályát futó, 40 év feletti férfiktól származtak.

Emellett egy nemzetközi, online adatgyűjtés is zajlott: a kutatásban résztvevőknek a terepi teszteléssel megegyező pályára kellett az általuk ideálisnak tartott útvonalat berajzolniuk. A kutatásban való részvételre felhívta a figyelmüket a különböző elektronikus tájfutófórumokon közzétett hirdetés. A résztvevők a kitöltés során megadtak demográfiai változókat (pl. nem, életkor) és a terepi navigációs tapasztalatukat. Az útvonalak gyűjtése a Worldof RunningWild (<http://3drerun.worldof.com/2d/runningwild.php>) felületén zajlott, ahol egy felhasználónév

megadásával bárki berajzolhatta az általa preferált útvonalat. A felhívás részeként a résztvevőkhöz az volt a kérés, hogy felhasználónévként az elemezni kívánt demográfiai és tapasztalatra vonatkozó adatokat adják meg: a kategóriájukat (amiből a nemük és nagyjából az életkoruk kiderül) és a tájfutó tapasztalatukat (hogyan hány éve tájfutnak). Például az „F50_35” felhasználónév egy 50 és 55 év közötti férfit jelöl, aki 35 éve tájfut.

Összesen 138 olyan kitöltés érkezett, ahol a kért adatok is rendelkezésre is álltak, ezek voltak az elemzésbe bevonhatóak. Demográfiai adatok és tapasztalat szempontjából elmondható, hogy többségében felnőtt és szenior kategóriájú, tapasztalt versenyzők töltötték ki a tesztet, lényegesen több férfi, mint nő (4. táblázat). Egészen fiatal tájfutóknak túl nehéz feladat egy ilyen jellegű útvonalválasztási probléma, de kezdőktől is érkezett kitöltés.

4. táblázat: Felhasználói teszt kitöltőinek száma nem, életkor és tájfutó tapasztalat szerint

Életkor (év)	Tájfutó tapasztalat (év)	Női kitöltők száma	Férfi kitöltők száma
-16	-7	3	4
17-20	-7	4	7
	8-14	2	14
21-34	-7	1	4
	8-14	5	11
	15+	2	13
35-44	-7	2	2
	8-14	1	0
	15-30	3	12
45-54	8-14	0	2
	15-30	2	2
	31+	3	19
55-64	-14	0	1
	15-30	0	2
	31+	3	6
65+	31+	1	7
összesen		32	106

2.3.2 Útvonalak elemzése

A felhasználói tesztek során rajzolt útvonalak elemzésére is a RunningWild online felületen került sor. Minden berajzolt útvonal egyesével hozzáadható és eltávolítható, így az elemzés a megadott demográfiai adatok és tájfutó tapasztalat alapján szűrhető. A kilógó, hibás adatok eltávolíthatóak, így azok az útvonalak, melyek nagyon kevés töréspontot vagy nagyon hosszú egyenes szakaszt tartalmaznak - ahol feltételezhető, hogy a kitöltő véletlen rossz helyre kattintott – eltávolításra kerültek. Az útvonalakat a két kiválasztott átmenetre külön-külön

elemeztem: megkerestem a főbb útvonal variációkat a terepi és online teszt alapján, az egyes útvonalak közelségi viszonyainak vizsgálatával. Azonos variációnak számított két útvonal, ha az átmenet legalább 70%-a során egymáshoz 30 méternél közelebb haladnak. Ezután megkerestem a legnépszerűbb útvonal(ak)at, azaz az(oka)t az útvonal(ak)at, amelyeket a kitöltők legalább 30%-a választott az adott átmeneten.

GPS útvonalból kevés állt csak rendelkezésemre az elemzéshez, emiatt azokat csak a felhasználói tesztekkel való összehasonlításra és a menetidő becslésére használtam fel. A futók eltérő fizikai és technikai tudása miatt a haladási sebességük összehasonlítása hamis eredményekre vezethetne. Megvizsgáltam, hogy voltak-e olyan alanyok, akik a felhasználói teszt kitöltése során a GPS útvonallal közel teljesen megegyező útvonalat adtak meg, ezen útvonalak menetidejét a GPS trackek segítségével mért menetidővel becsültem.

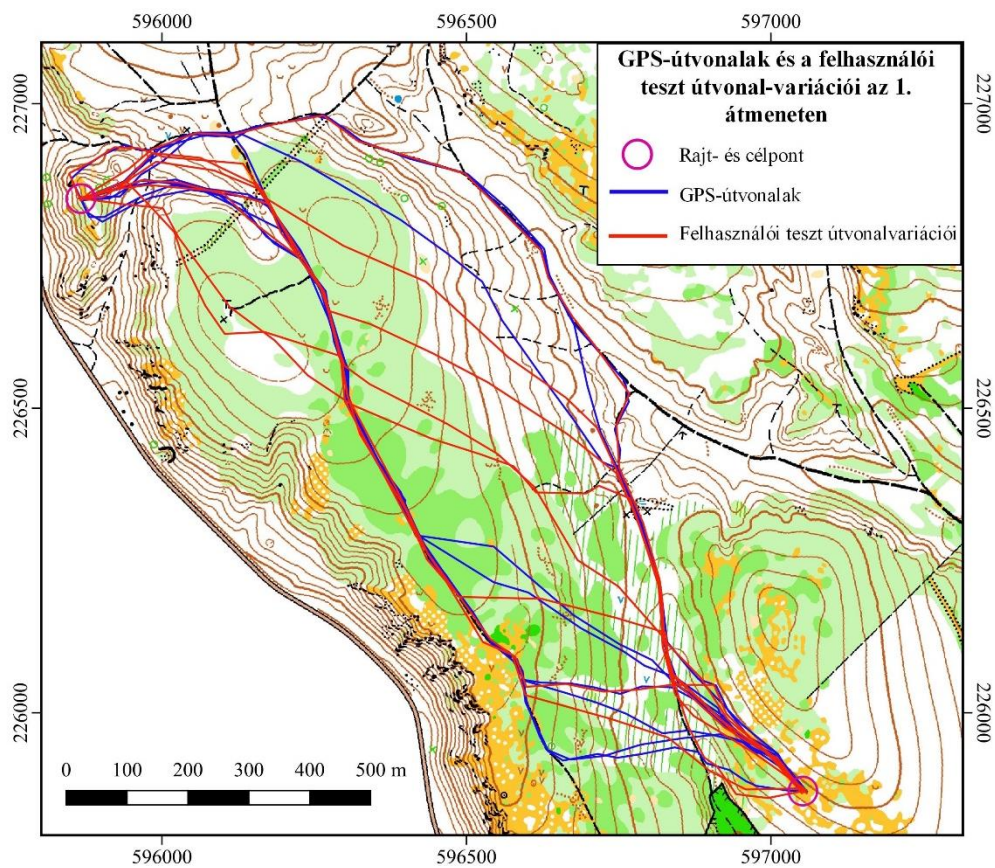
3. Eredmények

A kutatási eredmények értékelése során a korábbi szakirodalomból megismert útvonaltervezési módszereket hasonlítottam össze a terepi és digitális tesztelés során kapott eredményekkel. Célom volt megvizsgálni, hogy melyik útvonal milyen mértékben egyezik meg a tesztelt útvonalakkal. Összehasonlítottam az egyes útvonalak hosszát, szintkülönbségét és becsült időkölségét, megkerestem, hogy a modellek által alkotott útvonalak hányad része egyezik meg megközelítőleg a tesztelés útvonalaival. Megközelítőleg egyezőnek tekintettem azokat az útvonalakat, ahol a közöttük lévő távolság legfeljebb 30 méter, kiszámoltam, hogy a teljes útvonal hosszának hány százaléka esik a 30 méteren belüli tartományba.

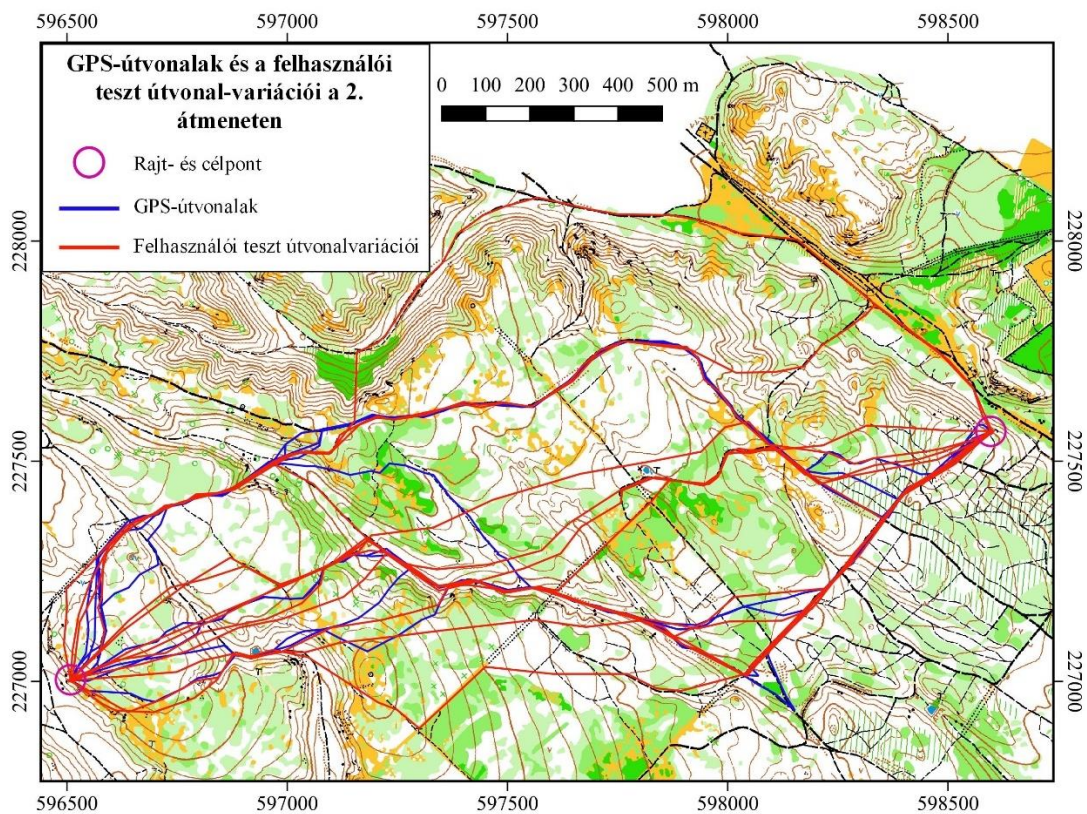
Az útvonalak 1:10 000 méretarányú tájfutótérképen, illetve 1m x 1m felbontású domborzatmodellen és fedettségi rétegen kerülnek bemutatásra, az összes ábra EOVI vetületben van. Szintvonalak, amennyiben vannak, 5 méteres alapszintközzel jelennek meg.

3.1 Felhasználói tesztek eredménye

A felhasználói tesztek elemzésére a 3DRerun-WorldofO (<http://3drerun.worldofO.com/>) online felület szolgált. Átmenetenként a fő variánsok elemzése segítségével megkerestem, hogy milyen útvonalakat adtak meg a kitöltők a digitális környezetben és milyen útvonalak fordultak elő a terepi tesztelés során (3. és 4. ábra). A GPS-útvonalak elemzésével megállapítható, hogy a versenyzők valós, terepi mozgás esetén is hasonló útvonalakat választottak, mint amiket mások virtuális környezetben.

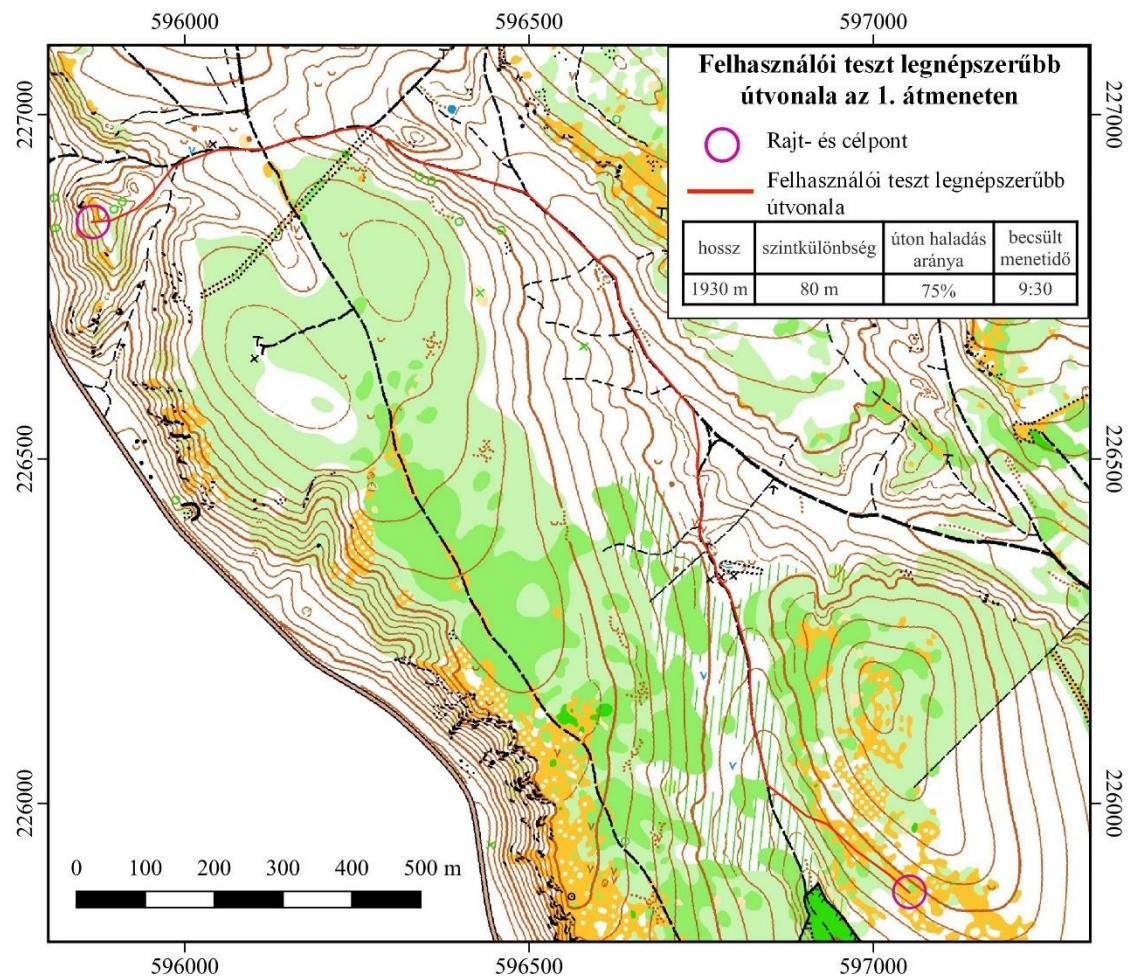


3. ábra: GPS-útvonalak (kék) és felhasználói teszt útvonal-variációi (piros) az 1. átmeneten

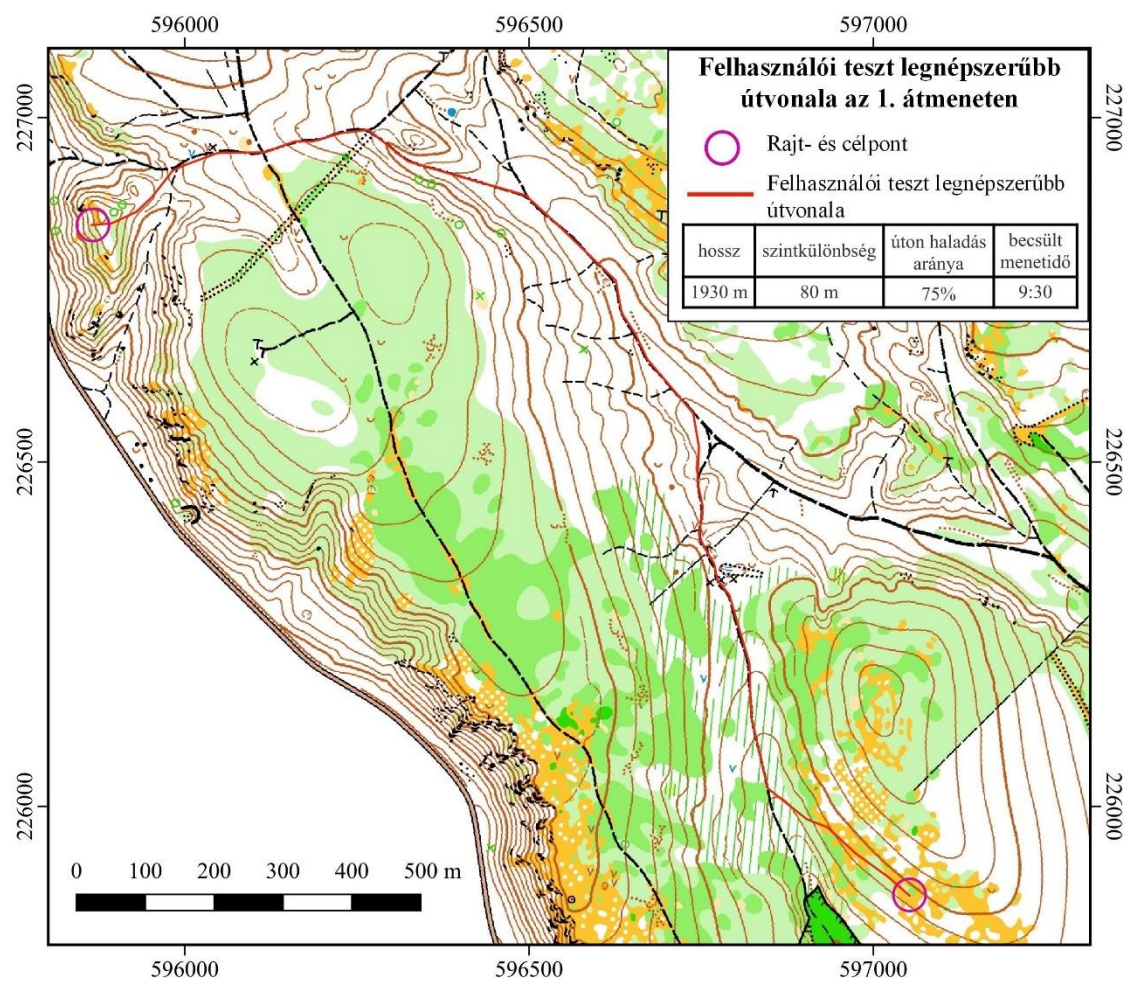


4. ábra: GPS-útvonalak (kék) és felhasználói teszt útvonal-variációi (piros) a 2. átmeneten

Ezután az egyes átmenetekre az útvonalak sűrűsége alapján megkerestem a legnépszerűbb (a kitöltők legalább 30%-a által megadott) útvonal(ak)at (5. és 6. ábra). Ez az első átmenet esetében egy útvonal volt, míg a második átmenetnél két ilyen útvonal különült el. Ezeknek az útvonalaknak lemértem a távolságát és a szintkülönbségét, valamint a terepi tesztelés során közel azonos útvonalon haladók GPS útvonala alapján becsültem az útvonalak menetidejét.



5. ábra: Legnépszerűbb útvonal az 1. átmeneten, az útvonal hossza, szintkülönbsége és becsült menetideje

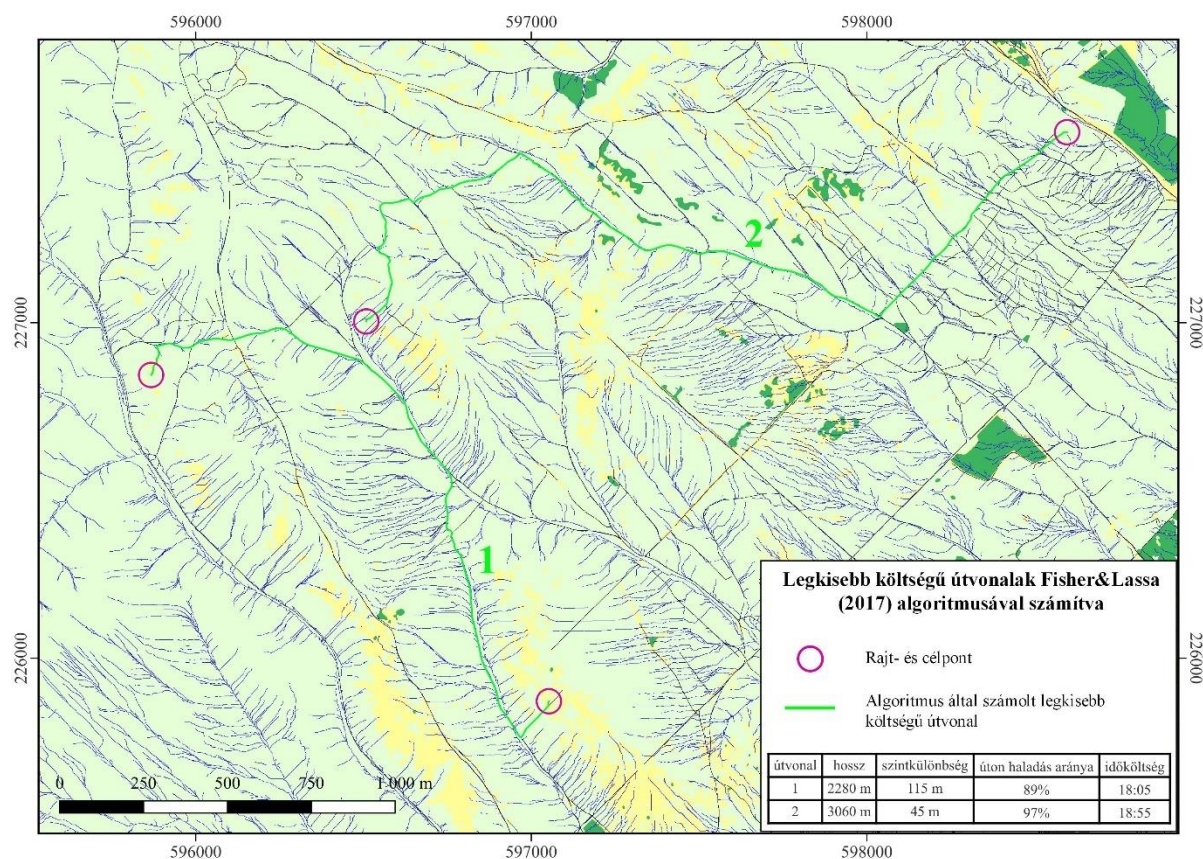


6. ábra: Legnépszerűbb útvonalak a 2. átmeneten, az útvonalak hossza, szintkülönbsége és becsült menetideje

3.2 Útvonaltervezési algoritmusok által adott eredmények

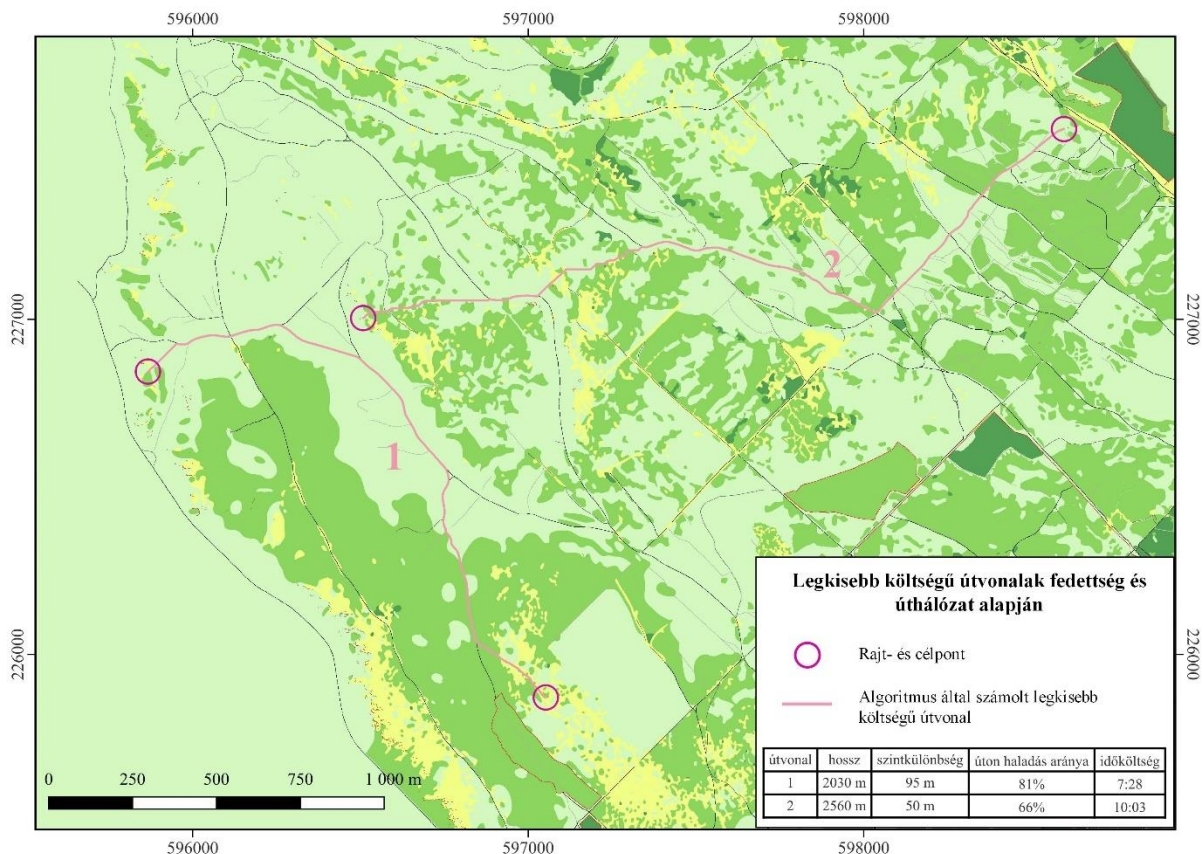
3.2.1 A felszínborítottság és úthálózat alapján tervezett útvonalmodellezés eredményei

Az egészségügyi ellátásra kidolgozott modell az eredeti módszerrel és utazási idővel dolgozva az alább bemutatott legkisebb költségű útvonalakat adta. Az útvonalak az algoritmus első lépésében számolt felszínborítottsági raszteren vannak ábrázolva (7. ábra). Az ábra bemutatja a két átmenetre számolt legkisebb költségű útvonalak hosszát és szintkülönbségét is, emellett az útvonalak időköltségét és az úton való haladás arányát.



7. ábra: Legkisebb időköltségű útvonalak Fisher&Lassa (2017) algoritmusával az eredeti költségértékek alapján; az útvonalak hossza és szintkülönbsége, becsült időköltsége és az úton való haladás aránya

A gánti mintaterületen való terepi haladásra módosított paraméterek felhasználásával más útvonalak adódtak legkisebb költségű útvonalnak, melyeket a 8. ábra mutat be, a két átmenetre számolt legkisebb költségű útvonalak hosszával, szintkülönbségével, az úton haladás arányával és időköltségével együtt.



8. ábra: Legkisebb időkölségű útvonalak fedettség és úthálózat alapján számolva; az útvonalak hossza és szintkülönbsége, becsült időkölsége és az úton való haladás aránya

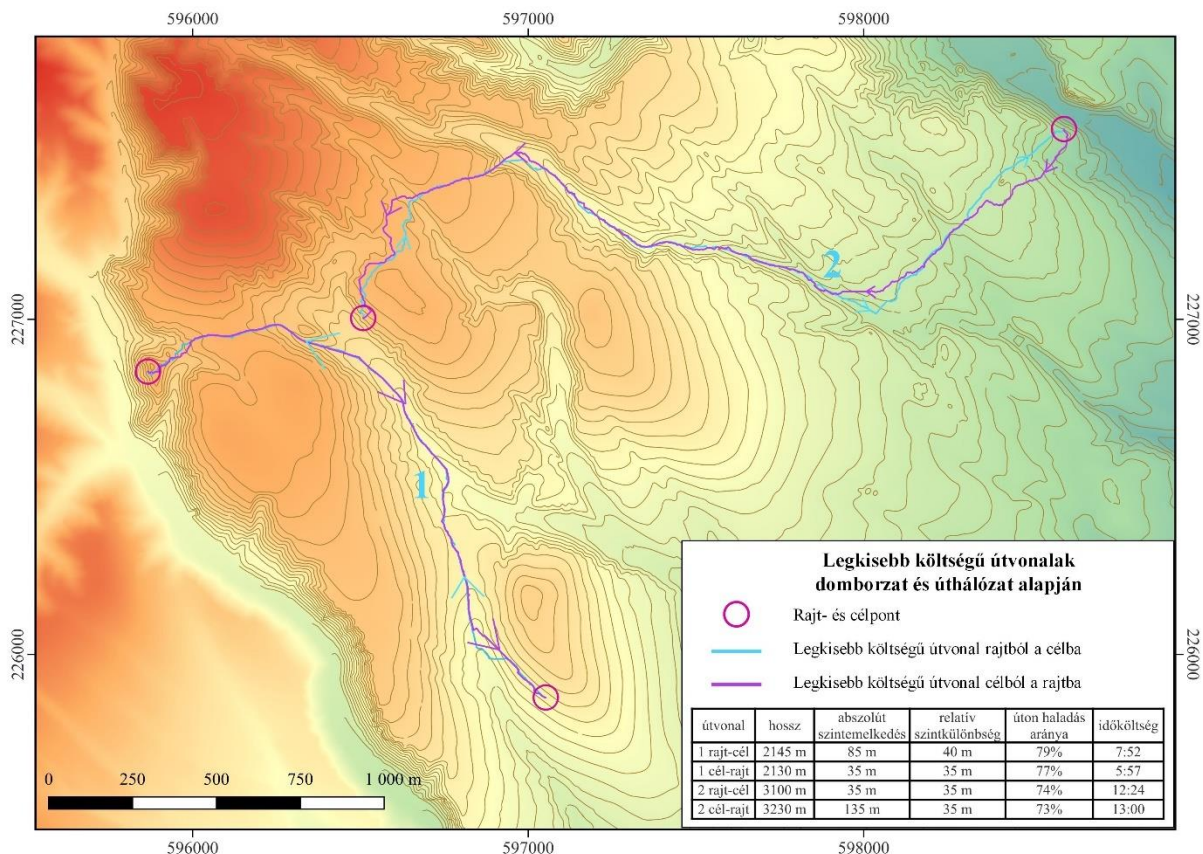
Az eredeti és módosított súlyokkal számolt útvonalak összehasonlításával megállapítható, hogy az eredeti útvonal az 1. átmenet esetében 12%-kal, míg a 2. átmenet esetében 20%-kal hosszabb, a szintkülönbség az 1. átmenetben az eredeti paraméterekkel számolva 21%-kal több, a 2. átmenetben 10%-kal kevesebb. Jelentős különbség adódik a 2. átmenetben az utakon való haladást tekintetében, az eredeti költségértékekkel számolva az útvonal 97%-a úton vezet, míg a módosított költségértékekkel csak 71%.

A modellek alkotta útvonallal a felhasználói tesztek legnépszerűbb útvonala az 1. átmenet esetében nagy mértékben megegyezik, a módosított súlyokkal számolva teljes mértékben a 30 méteres korláton belülre esik, míg az eredeti súlyokkal számolva az átmenet 78%-ban vezet ezen határon belül. A 2. átmenet esetében nagyobb mértékben különbözik mindkét verziójú legkisebb költségű útvonal mindkét legnépszerűbb útvonaltól. Az eredeti súlyokkal számolva, az útvonal 11%-a vezet az „A” útvonal 30 méteres közelében, majd az útvonal 61%-a a „B” útvonalhoz vezet közel. A módosított súlyokkal számolt legkisebb költségű útvonal 79%-a halad a „B” útvonal közelében.

Megállapítható, hogy az eredeti súlyokkal számolt legkisebb költségű útvonalak hossza jelentősen nagyobb a legnépszerűbb útvonalaknál is és nagyobb arányban halad utakon, míg a módosított súlyok esetén a hosszkülönbség csupán 5% az 1. átmenet esetében, illetve 2% és 4% a 2. átmenet két legnépszerűbb útvonalához hasonlítva. Jelentősebb az eltérés a szintkülönbségek tekintetében, első sorban az 1. átmenetben, az eredeti modell által adott útvonal itt 44%-kal több emelkedést tartalmaz. A 2. átmenet esetében mindkét útvonal jelentősen több emelkedést tartalmaz a legnépszerűbb útvonalakhoz képest. Az eredeti súlyokkal számolva az algoritmus által számolt időköltések jelentősen nagyobbak, míg a módosított súlyokkal számolva jelentősen alacsonyabbak a terepi tesztelés során kapott időköltéseknél.

3.2.2 A domborzat és úthálózat alapján tervezett irányfüggő útvonalmodellezés eredményei

Tobler terepi és úton történő gyaloglásra számított függvényei segítségével az átmenetekre számított legkisebb költségű útvonalak irányfüggőek. Emiatt fontos volt megkülönböztetni, hogy az átmenet két végpontja közül melyik a rajt- és melyik a célpont. Kiszámítottam a legkisebb költségű útvonalakat mindkét átmenetre, mindkét irányba (9. ábra). Az útvonalak jellemzőit az ábra táblázata mutatja be. Fontos megjegyezni, hogy a rajt- és célpontok tengerszint feletti magassága nem azonos, így a pontok között iránytól függően lejtés vagy emelkedés található. Ez az abszolút magasságkülönbség a rajt- és célpontok között az 1. átmenet esetében 45 m, a 2. átmenet esetében -100 m. Az egyes útvonalak relatív magasságkülönbsége mutatja meg, hogy az abszolút magasságkülönbségen felül az adott útvonal mennyi szintkülönbséget tartalmaz.

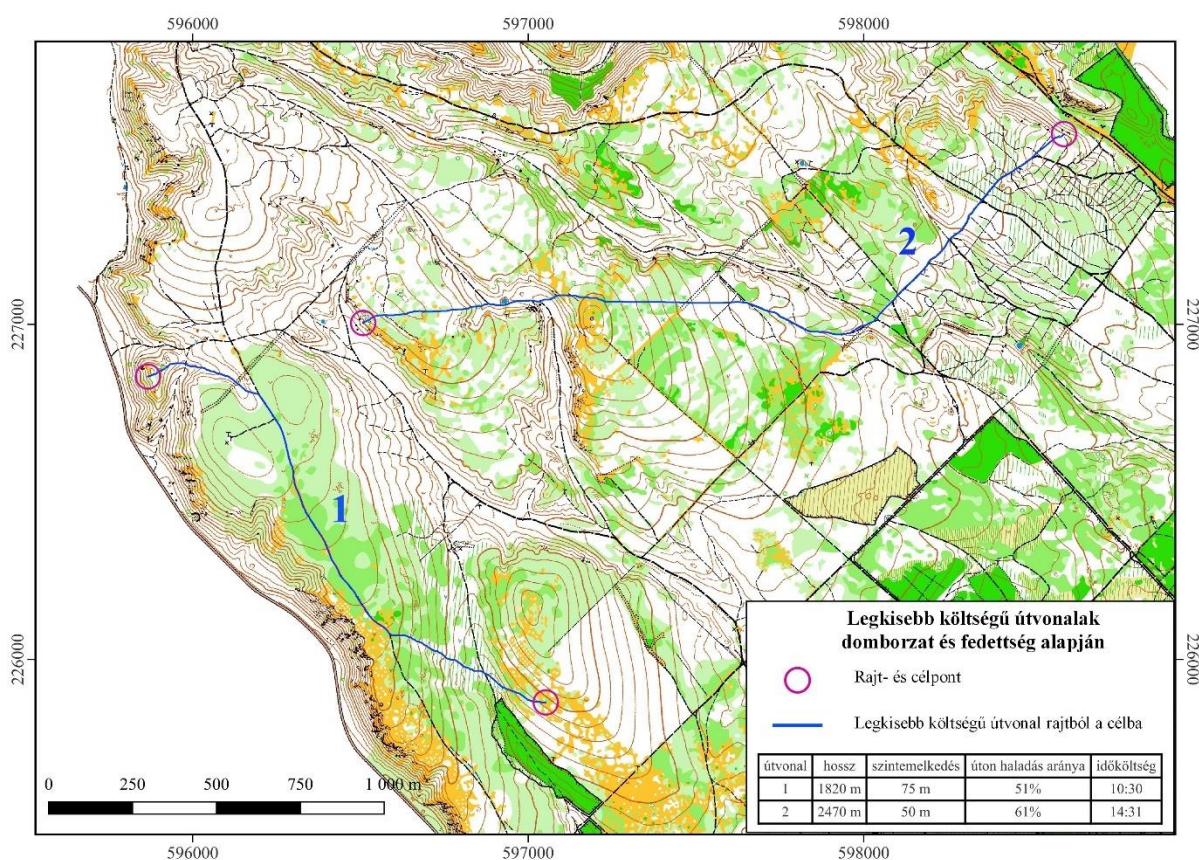


9. ábra: Domborzat és úthálózat alapján tervezett irányfüggő modellezés által adott útvonalak a kiválasztott átmenetekre, azok hossza és szintkülönbség-adatai, becsült időkölsége és az úton való haladás aránya

A domborzat és úthálózat alapján tervezett irányfüggő útvonalak az 1. átmenet esetében mindkét irányban közel azonosak a felhasználói tesztek legnépszerűbb útvonalával, annak 30 méteres körzetén belül haladnak teljes mértékben. A 2. átmenet esetében a modell alkotta útvonalak a tesztek „B” útvonalához hasonlítanak jobban. A nyugatról keletre, lefele haladó, kékkel ábrázolt útvonal 82%-a közelíti meg azt legalább 30 méterrel, míg a felfele haladó, lila útvonal 59%-a. A számított útvonalak hossza és relatív szintkülönbsége közel azonos a két irányba mindkét átmenet esetében, valamint az útvonalak mindkét esetben többet vezetnek úton, mint a legnépszerűbb útvonalak, az út aránya 6-8%-kal van a legnépszerűbb útvonal aránya felett (73 és 74% a teszt 66 és 67%-val szemben). A becsült időkölségek mindkét átmenet esetében, mindkét irányra alacsonyok a felhasználói tesztekhez képest. Megfigyelhető, hogy az átmenet teljesítése abban az irányban jár kevesebb idővel, amerre az abszolút magasságkülönbség negatív, vagyis ahol többségében lefele kell haladni a végpont eléréséhez.

3.2.3. A felszínborítottság, úthálózat és domborzat alapján tervezett útvonalmodellezés eredményei

A tájfutótérképeken történő térinformatikai alapú útvonaltervezés során a paraméterek súlyozását terepi tesztelési eredmények segítségével finomítottam, amíg a modell és a tesztek eredményei hasonló eredményt nem adtak. Az eredeti dolgozatban kidolgozott súlyértékek az abban vizsgált mintaterületre lettek kidolgozva, így szükséges volt tesztelni a jelenlegi területre eltérő súlyozással is ellenőrzésképpen. A végén a lehetséges opciók közül kiválasztottam a legideálisabbat, ami legjobban közelítette a terepi tesztelés során gyűjtött eredményeket, ezt a fedettség 40%-os és a domborzat 60%-os súlyozásával kaptam meg, ami megegyezik a korábban publikált arányokkal (10. ábra).



10. ábra: Legkisebb költségű útvonalak fedettség, úthálózat és domborzat alapján

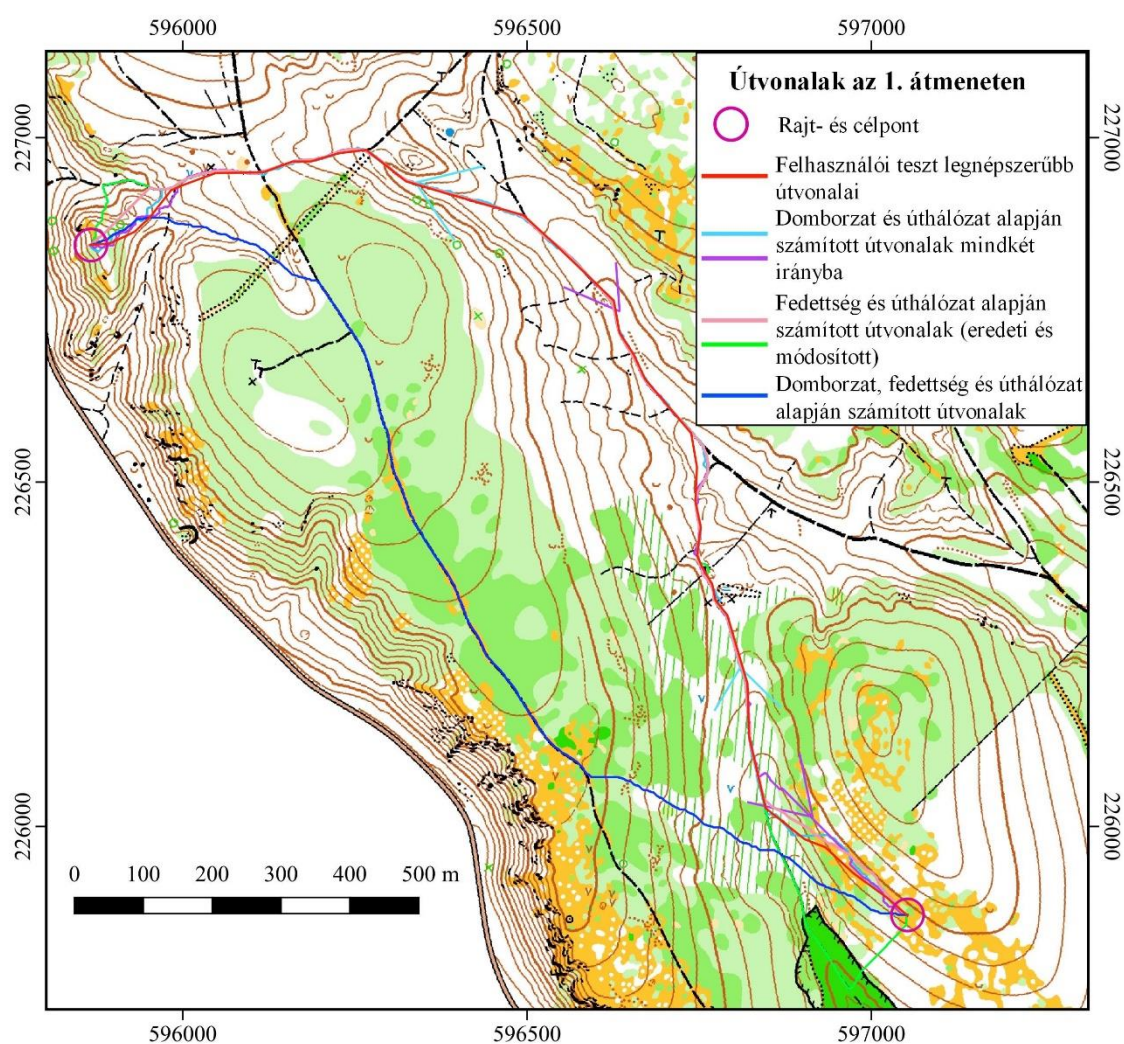
számítva, az útvonalak hossza, szintemelkedése, becsült időkölsége és az úton való haladás aránya

A modell által számított legkisebb költségű útvonal jelentősen eltért a legnépszerűbb útvonalaktól, rövidebb azoknál, és megközelít a felhasználói tesztek során lehetséges variációként megadott útvonalakat mindkét átmenet esetében. Az 1. átmenet esetében a modell által alkotott útvonal a legnépszerűbb útvonal hosszának csupán 95%-a, a szintkülönbség is

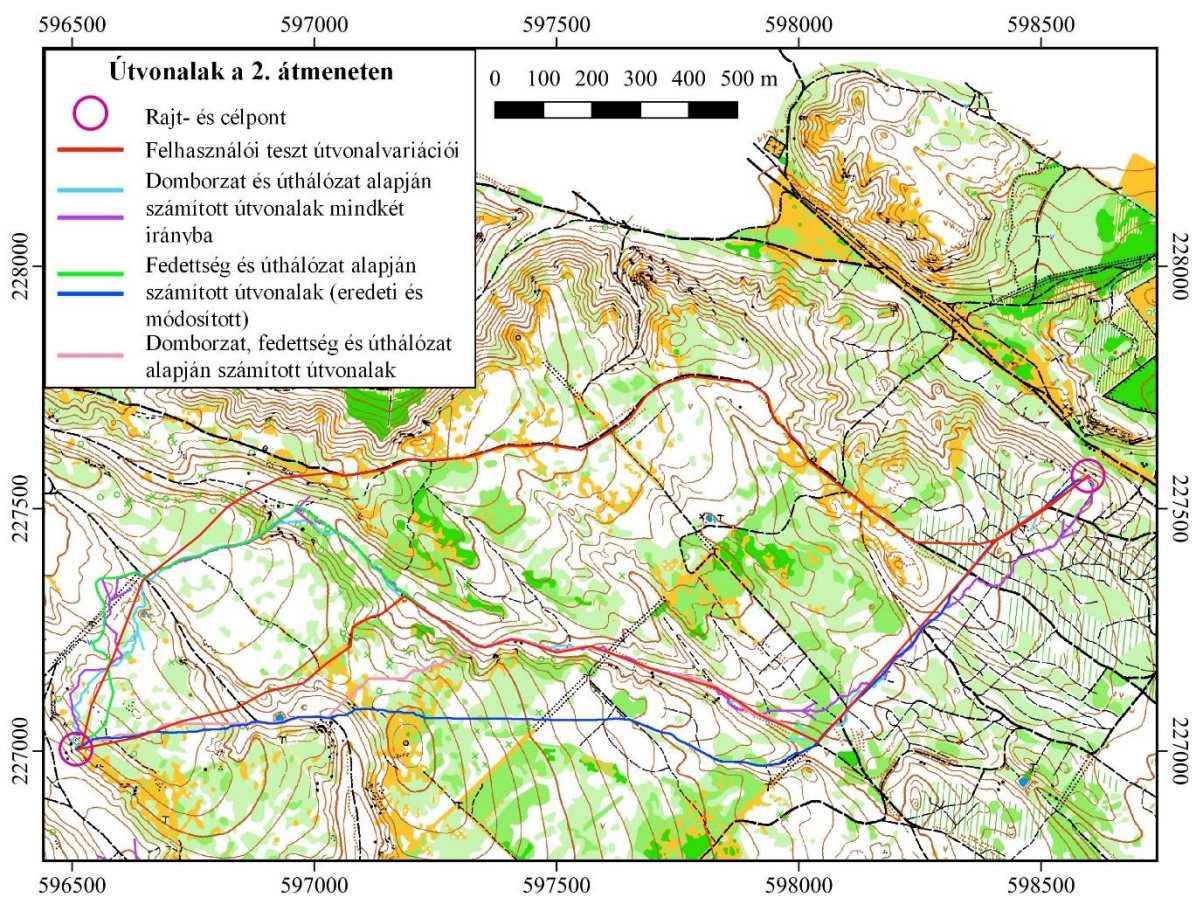
6%-kal kevesebb. A 2. átmenet esetében a hossz az „A” útvonalhoz viszonyítva 93%, míg a „B”-hez viszonyítva 98%, a szintkülönbség ezen az átmeneten azonban több a számolt legkisebb költségű útvonalon. Az útvonal kevesebbet halad utakon, mint a legnépszerűbb útvonal, a különbség az 1. átmeneten jelentős, 23%; a 2. átmeneten az „A” útvonalhoz képest 7%, a „B”-hez képest 5%. A becsült időkölségek jól közelítik a terepi tesztelés eredményeit.

3.3 Eredmények összehasonlítása

A három modell által adott legkisebb költségű útvonalakat, valamint a tesztelés során a legnépszerűbb útvonal(ak)at a 11. és 12. ábra mutatja be a kiválasztott két átmenetre. Az egyes útvonalak hosszát és szintkülönbségét az 5. táblázat foglalja össze.



11. ábra: Útvonalak az 1. átmeneten, tájfutótérképen megjelenítve



12. ábra: Útvonalak a 2. átmeneten, tájfutótérképen megjelenítve

13. táblázat: A két átmenet legkisebb költségű és legnépszerűbb útvonalainak adatai

	útvonal- hossz (m)	szintemelkedés (m)	út hossza (m)	út aránya a teljes útvonal- hosszhoz képest	útvonal hossza a légvonalhoz képest	legnépszerűbb útvonal 30 m körzetében való haladás aránya	időköltség (perc:másod- perc)
1. átmenet	1535 (légvonal)	40 (abszolút szintkülönbség)					
legnépszerűbb	1925	80	1435	0,75	1,25	1	9:30
Fisher&Lassa	2280	115	2030	0,89	1,49	0,78	18:05
Út+fedettség	2030	95	1640	0,81	1,32	1	7:28
Domborzat+út rajt>cél	2145	85	1685	0,79	1,40	1	7:52
Domborzat+út cél>rajt	2130	35	1650	0,77	1,39	0,97	5:57
Domborzat+út+ fedettség	1820	75	935	0,51	1,19	0,13	10:30
2. átmenet	2160 (légvonal)	-100 (abszolút szintkülönbség)					
legnépszerűbb A	2650	35	1785	0,67	1,23	1	13:05
legnépszerűbb B	2505	35	1651	0,66	1,16	1	14:56
Fisher&Lassa	3060	45	2975	0,97	1,42	0,11 (A); 0,61 (B)	18:55
Út+fedettség	2550	50	1800	0,71	1,18	0,79 (B)	10:03
Domborzat+út rajt>cél	3100	35	2295	0,74	1,44	0,82 (B)	12:24
Domborzat+út cél>rajt	3230	135	2365	0,73	1,50	0,59 (B)	13:00
Domborzat+út+ fedettség	2470	50	1495	0,61	1,14	0,47 (B)	14:31

Összességében megállapítható, hogy legrövidebb útvonalat, és a legkevesebb úton haladást mindkét esetben a domborzat, fedettség és úthálózat kombinálásával számított útvonal adta. A leghosszabb útvonalat az 1. átmeneten Fisher&Lassa (2017) algoritmusával számított útvonal adta, míg a 2. átmeneten a domborzat és úthálózat alapján számított útvonalak. Ez utóbbi algoritmus közelítette mindkét esetben a legjobban a felhasználói teszt népszerű útvonalainak szintkülönbségeit. A legtöbbet úton Fisher&Lassa algoritmus vezet az útvonalakat. A terepi

tesztelés időkölségeit egyedül a domborzat, úthálózat és fedettség együttes elemzésével kapott útvonal közelíti jól, a többi algoritmus esetén jelentős eltérés van.

4. Eredmények értékelése

Az elsőként bemutatott modell, mely a fedettséget és az úthálózatot veszi figyelembe, kis felbontású adatokra, nagy területre van optimalizálva, trópusi területre. Így a szerzők által javasolt osztályokkal és költségértékekkel számolva nem ideális a mintaterületre az útvonaltervezéshez. A modell számos vízfolyást hoz létre a domborzatmodell alapján, melyek azonban a területre nem jellemzőek. A terepen való haladásra magas időkölségeket határoznak meg, így az algoritmus által számolt útvonal a lehető legrövidebb módon elvezetett a legközelebbi útig, majd azon haladt akár nagy kerülő árán is. Mivel a vizsgált terület úthálózata igen gazdag, ezek az útvonalak nem jelentősen hosszabbak a más módon számolt útvonalaknál, azonban a mintázat jól megfigyelhető.

A kategóriák és időkölségek terepi útvonaltervezésre optimalizált újraosztályozása után az algoritmus eltérő eredményt ad. A növényzet és az úthálózat jobban osztályozott, a rajtuk való áthaladás időkölségei közelebb állnak egymáshoz, így a legkisebb költségű útvonal több helyen letér az utakról. Megjelennek a felszínborítottsági raszteren az áthatolhatatlan akadályok és haladást nehezítő vonalas objektumok (sziklafalak és kerítések), melyeket az útvonal sok esetben kikerül. A terepi haladás sebességére jelentős hatással bíró domborzati viszonyok azonban ezen elemzés során sem jelennek meg, így a számított útvonal mentén jelentős szintkülönbségek vannak, melyek a valóságban hatással vannak az útvonal időkölségére.

Fisher&Lassa algoritmusának erőssége az újra osztályozás és az időkölségek megadásának lehetősége, így a költségrasztert a felhasználó jelentős részben a saját igényeire szabhatja. További előnye a módszernek, hogy a térinformatikai környezetben egy bővítményen belül több lépés is lezajlik, így az elemzés más módszerekhez képest könnyen és gyorsan végrehajtható.

A domborzati tényezők alapján számolt útvonalak megkülönböztetik az úton és útról letérő haladást, valamint eltérő sebességgel számolnak azonos lejtőszögnél történő felfele és lefele haladásra. Így eltérő eredményt kapunk két pont között ellentétes irányban tervezve. Azonban a felszínborítottsági paramétereket a számítás során nem veszi figyelembe az algoritmus, emiatt nem ad minden körülmény között megbízható választ a legkisebb költségű útvonal problémájára valós terepi körülmények között. Érdeemes megjegyezni, hogy nyílt vagy más közel homogén fedettségű területen előfordulhat, hogy a domborzat az egyetlen tényező, mely

a haladást jelentősen befolyásolja, ekkor a Tobler függvényei felhasználásával tervezett útvonalak jó megoldást kínálhatnak. A módszer által számolt útvonalak többet vezetnek úton, mint a legnépszerűbb útvonalak, így az utakon és azokról letérve való haladás arányát is szükséges lehet pontosítani.

A tájfutótérképeken való útvonaltervezésre kidolgozott algoritmus erőssége, hogy nagy térbeli felbontású adatokra és terepi körülményekre van optimalizálva, egyesíti a két korábbi módszer során alkalmazott fedettségi és úthálózati tényezőket, valamint a domborzat befolyásoló hatását. A függvény jelentősen alacsonyabb költséggel számol a terepen való haladásra, ami szembetűnő különbség a többi algoritmushoz képest. Tájfutó szempontból ez természetes és a modellezett útvonalak egyaránt kicsi táv és reliefköltsége alapján ez tekinthető a legjobb modellnek, viszont egy átlagos terepen közlekedő (nem tájfutó) ember szempontjai nincsenek beépítve jelenleg a modellbe; a pontosítás a terepi haladás további kutatásával lehetséges. A modell erőssége, hogy a valós haladásra épülő tesztek időkölségét jól közelítik a modell által számolt utazási idők. További előrelépést igényel azonban, hogy modellezés során a domborzati paraméterekbe szükséges lenne Tobler függvényeihez hasonlóan az irányfüggőséget belevinni.

Fontos továbblépési irány a kutatási témában az útvonaltervezés automatizációja, azaz hogy nyers adatokból minél kevesebb felhasználói beavatkozással megtervezhető legyen a legkisebb időkölségű útvonal. Ezen az úton legelőrébb az egészségügyi ellátásra tervezett algoritmus tart, ennek mintájára lehetséges a terepi útvonaltervezés lépéseit is egy bővítményen belül kezelni, majd akár azt egy applikációba, vagy GIS bővítménybe ültetni.

Egy másik fejlesztési irány a felhasználói igényekhez való alkalmazkodás, azaz azoknak a paramétereknek a megtalálása, melyeknek a megfelelő súlyozásával különböző terepi feladatokhoz található meg az ideális útvonal. Ennek tervezési módszere eltérő a rendelkezésre álló alapanyagoktól függően, és eltérőek lehetnek a különböző terepi mozgást megkövetelő szakmáknak – így az erdészetnek, természetvédelemnek, vadászatnak, terepi mentésnek, katonai mozgásoknak – a terepi változók súlyából fakadó útvonaltervezési szempontjai.

5. Összefoglalás

A dolgozat célja az emberi terepi mozgások modellezésére különböző lehetőségek keresése, és a terepen történő navigációban az útvonalak választása során hozott döntések jobb megismerése. A dolgozatomban megvizsgáltam három terepi útvonaltervezési módszert egy magyarországi középhegységi erdős területen és összehasonlítottam adatgyűjtés során kapott útvonalakkal.

A vizsgált mintaterület a Vértes egy területe, a Gánt község határában fekvő Kápolnapuszta volt. A területről rendelkezésemre álltak nagyfelbontású Lidar adatok, valamint egy naprakésznek mondható tájfutótérkép. A területen zajlott 2021 őszén az Őszi Spartaus Kupa tájfutóverseny, a vizsgált átmenetek erről a versenyről kerültek kiválasztásra. A gyűjtött terepi adatok (GPS-útvonalak) is erről a versenyről származtak. Ezen felül történt digitális adatgyűjtés is, amely során az alanyoknak egy online felületen kellett berajzolniuk az általuk legjobbnak vélt útvonalat a kiválasztott átmenetekre. A résztvevők megadták a nemüket, életkorukat és a tájékozódási tapasztalatukat. A kutatásban résztvevő alanyok választott útvonalairól és néhány demográfiai adatáról létrejött egy nyílt, bárki számára hozzáférhető adatbázis.

A három terepi útvonaltervezési módszerrel kiszámoltam a legkisebb költségű útvonalat a két kiválasztott átmenetre. Az első módszer a vidéki Indonézia egészségügyi ellátására lett kidolgozva, a fedettséget, az úthálózatot és a domborzat alapján a vízhálózatot veszi figyelembe. Az algoritmust optimalizáltam ezután a vértesi mintaterület körülményeire, itt a vízhálózat már nem lett felhasználva. A következő módszer a domborzat és úthálózat alapján, eltérő sebességgel számol azonos lejtőszög esetén felfele és lefele, így figyelembe vette a haladási irányt is. Végül kiszámítottam a legkisebb költségű útvonalakat a tájfutótérképeken alkalmazott útvonaltervezés alapján. Ezen módszer során a domborzat, az úthálózat és a fedettség egyaránt figyelembe lett véve. A számításokkal kapott útvonalak mindegyike tartalmaz úton és az azokról letérve való haladást, amelyek arányait elemeztem. A három módszer alkalmazásával és a felhasználói tesztek összesítésével kapott eredmények összehasonlításával megkerestem a számítási módszerek erősségeit és gyengeségeit. Összességében tájfutó szempontból az egyaránt kicsi táv és reliefköltsége alapján a tájfutótérképeken alkalmazott útvonaltervezési módszer tekinthető a legjobb modellnek, viszont egy átlagos terepen közlekedő (nem tájfutó) ember szempontjai nincsenek beépítve jelenleg ebbe a modellbe.

Az alkalmazott térinformatikai módszerek és algoritmusok alapját képezhetik később egy útvonaltervező bővítmény vagy alkalmazás fejlesztésének, mely a jelenlegi soklépcsős útvonaltervezési folyamatot részben automatizálja. A felhasználói igényekhez való alkalmazkodással az algoritmusok nagyban segíthetnék a terepi mozgást igénylő szakmák munkáját.

6. Hivatkozások

- Albert, G. and Sárközy, Z.: Route planning on orienteering maps with least-cost path analysis. *Proceedings of the International Cartographic Association*, 4, 2021.
<https://doi.org/10.5194/ica-proc-4-4-2021>
- Alberti, G.: movecost: An R package for calculating accumulated slope-dependent anisotropic cost-surfaces and least-cost paths. *SoftwareX*, 10, 100331, 2019.
- Bagli, S., Geneletti, D., Orsi, F.: Routeing of power lines through least-cost path analysis and multicriteria evaluation to minimise environmental impacts. *Environmental Impact Assessment Review* 31-3, 234-239, 2011.
- Borgefors, G.: Distance Transformations in Arbitrary Dimensions. *Computer vision, graphics and image processing* 27, 321-345, 1984.
- Conrad O, Bechtel B, Bock M, Dietrich H, Fischer E, Gerlitz L, Wehberg J, Wichmann V, Böhner J. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geosci Model Dev*. 2015;8:1991–2007.
- De Smith M, Goodchild M, Longley P. *Geospatial analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools*. Leicester: Troubador Publishing Ltd; 2007.
- Delamater, P.L., Messina, J.P., Shortridge, A.M., Grady, S.C.: Measuring geographic access to health care: raster and network-based methods. *International Journal of Health Geographics* 11(1):15, 2012. <https://doi.org/10.1186/1476-072X-11-15>
- Delling, D., Sanders, P., Schultes, D., & Wagner, D.: Engineering route planning algorithms. In *Algorithmics of large and complex networks* (pp. 117-139). Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.
- Dijkstra, E. W.: A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 1(1), 269-271, 1959.
- Douglas, D. H.: Least-cost path in GIS using an accumulated cost surface and slope lines; *Cartographica* 31:37–51, 1994.
- Fisher, R., Lassa, J.: Interactive, open source, travel time scenario modelling: tools to facilitate participation in health service access analysis. *International Journal of Health Geographics* 16:13, 2017. <https://doi.org/10.1186/s12942-017-0086-8>
- Higgs G. A literature review of the use of GIS-based measures of access to health care services. *Health Services & Outcomes Research Methodology*;5(2):119–39, 2004.
<https://doi.org/10.1007/s10742-005-4304-7>
- International Specification for Orienteering Maps (ISOM2017-2)
<https://orienteering.sport/iof/mapping/> (felkeresve 2022. 09. 24.)
- Luxen, D., & Vetter, C.: Real-time routing with OpenStreetMap data. In: *Proceedings of the 19th ACM SIGSPATIAL international conference on advances in geographic information systems* (pp. 513-516), 2011.

MTFSZ RouteGadget: <https://rg.mtfsz.hu> (felkeresve 2022. 10. 28.)

Neutens Tijs. Accessibility, equity and health care: review and research directions for transport geographers. *Journal of Transport Geography*;43:14–27, 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2014.12.006>

Rogers, S. R., Collet, C., Lugon, R.: Least Cost Path Analysis for predicting archeological site potential in Central Europe. Across Space and Time. Papers from the 41st Conference on Computer Applications and Quantitative Methods in Archaeology, 2013.

SAGA GIS download | SourceForge.net <https://sourceforge.net/projects/saga-gis/> (felkeresve 2022. 09. 24.)

Sőtér, J., Dénes, Z., Bakó, Á., Suba, P.: Kápolnapuszta, Fenyves-völgy. Tabáni Spartacus SKE, 2021.

Strahler, A. N.: Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913-920, 1957.

<https://doi.org/10.1029/TR038i006p00913>

Tobler, W.: Three presentations on geographical analysis and modeling. National Center for Geographic Information and Analysis, Technical report 93-1, 1993.

Worldofo 3DRerun <http://3drerun.worldofo.com/> (felkeresve 2022.11.29.)

Worldofo RunningWild <http://3drerun.worldofo.com/2d/runningwild.php> (felkeresve 2022. 10. 28.)

7. Ábrajegyzék

1. táblázat: Az egyes felszínborítottsági kategóriákhoz tartozó utazási sebesség és idő (Fisher & Lassa, 2017 nyomán)
 2. táblázat: táblázat: Vonalas és felületi objektumok súlya a költségfelszín számolásában, az ISOM 2017-2 (IOF, 2019) jelkulcs alapján (Albert & Sárközy, 2021 alapján)
 3. táblázat: Kategóriák és hozzá tartozó időkötségek (Fisher & Lassa, 2017) és (Albert & Sárközy, 2021) nyomán történő elemzéshez
 4. táblázat: Felhasználói teszt kitöltőinek száma nem, életkor és tájfutó tapasztalat szerint
 5. táblázat: A két átmenet legkisebb költségű és legnépszerűbb útvonalainak adatai
-
1. ábra: Tobler függvénye: gyaloglási sebesség (km/h) a lejtőmeredekség ($^{\circ}$) függvényében (Tobler, 1993)
 2. ábra: Felhasználói teszt során rajzolt útvonalak (kék), felhasználók körében legnépszerűbb útvonal (sárga) és a modell által alkotott legkisebb költségű útvonal. A táblázatban az egyes útvonalak hossza és az útvonal menti szintkülönbség található (Albert & Sárközy, 2021)
 3. ábra: GPS-útvonalak (kék) és felhasználói teszt útvonal-variációi (piros) az 1. átmeneten
 4. ábra: GPS-útvonalak (kék) és felhasználói teszt útvonal-variációi (piros) a 2. átmeneten
 5. ábra: Legnépszerűbb útvonal az 1. átmeneten, az útvonal hossza, szintkülönbsége és becsült menetideje
 6. ábra: Legnépszerűbb útvonalak a 2. átmeneten, az útvonalak hossza, szintkülönbsége és becsült menetideje
 7. ábra: Legkisebb időkötségű útvonalak Fisher&Lassa (2017) algoritmus az eredeti költségértékek alapján, az útvonalak hossza és szintkülönbsége, becsült időkötsége és az úton való haladás aránya
 8. ábra: Legkisebb időkötségű útvonalak fedettség és úthálózat alapján számolva, az útvonalak hossza és szintkülönbsége, becsült időkötsége és az úton való haladás aránya
 9. ábra: Domborzat és úthálózat alapján tervezett irányfüggő modellezés által adott útvonalak a kiválasztott átmenetekre, azok hossza és szintkülönbség-adatai, becsült időkötsége és az úton való haladás aránya

10. ábra: Legkisebb költségű útvonalak fedettség, úthálózat és domborzat alapján
számítva, az útvonalak hossza és szintemelkedése, becsült időkölsége és az úton való
haladás aránya
11. Útvonalak az 1. átmeneten, tájfutótérképen megjelenítve
12. Útvonalak a 2. átmeneten, tájfutótérképen megjelenítve

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, Dr. Albert Gáspárnak a dolgozat elkészültében nyújtott segítségéért.

Szeretnék köszönetet mondani a Tabáni Spartacus SKE-nek a mintaterület tájfutótérképének és Lidar-adatainak rendelkezésre bocsátásáért, és Jan Kocbachnak az általa fejlesztett WorldofO online felület használatában nyújtott segítségéért.

Továbbá köszönöm a hazai és nemzetközi tájfutó közösségnek, hogy a felhasználói teszt kitöltésével hozzájárultak a munkámhoz.