

LEFEDETTSÉG MODELLEZÉS TÁVKÖZLÉSI TORNYOK KIHELYEZÉSÉNEK, TÁJBAN TÖRTÉNŐ ELHELYEZÉSÉNEK TERVEZÉSÉHEZ, LÉGI FELMÉRÉSBŐL SZÁRMAZÓ TÉRADATOK SEGÍTSÉGÉVEL

BAKÓ GÁBOR

Interspect Kft.

2314 Halásztelek, II. Rákóczi Ferenc út 42. e-mail: bakogabor@interspect.hu

Kulcsszavak: bázisállomás, mobil szolgáltatás, távközlés, modellezés, távérzékelés, tájvédelem

Összefoglalás: A tájban történő tervezés, a környezetvédelmi szemlélet és a gazdaságos beruházás tervezés megköveteli a távközlési bázisállomások optimális létesítési helyének kiválasztását és ennek érdekében a legmodernebb adatgyűjtési és modellezési módszerek alkalmazását. Költséghatékony repülőgépes fotogrammetriai felméréssel olyan téradatok állíthatók elő, amelyek elősegítik a tervterképek elkészítését, a szimulációk elvégzését. Az adatbázisok komplex vizsgálatával elvégezhető a rálátás - ügyfélszám analízis. A módszer azonban nem csak új telepítés esetén hasznos. Amennyiben például valamilyen oknál fogva kiesik egy bázisállomás, a minőség nem csak az adott helyen, de a környezetében működő cellák területén is romlik, mert ezeknek olyan területen is át kell venniük a részleges szolgáltatást, ahova tervezetten már nem alkalmasak minőséget produkálni. Éppen ezért az eljárás nagyon fontos lehet a kiváltó állomás helyének megtervezésében is.

Bevezetés

A távközlési toronyok telepítése költség és esztétikai szempontokat figyelembe véve is optimalizálást, előzetes szimulációkat igényel. Egy olyan összetett tervezési feladattal veszi kezdetét, amely számol a természetvédelmi, látképi, környezetvédelmi és megtérülési szempontokkal. A berendezések kihelyezési költsége méltányos szinten tartható, amennyiben a környezeti adottságokat megismerve modellezzük a legmegfelelőbb telepítési helyeket, a lefedett területen ellátható fogyasztók száma, a tájképi értékek megóvása, valamint a lehetséges (engedélyezett és elfogadható költséggel elérhető) tulajdonosi hozzájárulások alapján.

A domborzati és beépítési, valamint növényzeti viszonyokat figyelembe véve alkotott modell segítségével kijelölt legkevesebb számú, ideálisnak tekinthető telepítési helyek alkalmasságát, így az adott területet optimálisan lefedő toronyok számát tehát a jogi lehetőségek is befolyásolják. Éppen ezért olyan modellezési lehetőségre van szükség, amely dinamikus, és az új körülmény okozta változásokat alkalmazva valós időben variálható a legmegfelelőbb döntések elősegítése érdekében.

Anyag és módszer

Az elektromágneses és akusztikai hullámok egyenes vonalra vonatkoztatott terjedésének modellezése viszonylag egyszerű, a domborzatot és a beépítettséget, növényzeti borítást is leíró felületmodell pontosságától és részletességétől függő minőségben készíthető el (Chen et al. 2004). Csak környezet-specifikus modellezés fogadható el nagyléptékű tervezésnél (Andersen et al. 2005). Az 1960-as évek elején J.B. Keller kidolgozta elméletét az optikai hullámterjedés és diffrakciós modellek kiterjesztésére (Christiansen 2013), amelyet azóta is számos modell vesz alapul a rádióhullámok terjedésének számításánál. Ez azonban nem ekvivalens az egyszerű view shed típusú rálátás modellek alkalmazásával. A Line-of-sight (rálátás) modellezés nem elegendő a mikrohullámú lefedettség modellezéséhez. A diffrakció (elhajlás), refrakció (megtörés), reflexió (visszaverődés), abszorpció (elnyelés), a légkör

összetétele, a fizikai akadályok másként érvényesülnek a különböző hullámhosszúságú elektromágneses jelek esetében (Keller 1962). A diffrakciós elméletre épített modell a gyakorlati kísérletek során nagyon jól jellemezte a tapasztalt hullám terjedést (Erricolo et al. 2008). Az alacsonyfrekvenciájú rádiójelek esetében például jelentős diffrakciós hatás érvényesül (a refrakció – törés hatásának eredményeként), követik a Föld görbületét, és a tereptárgyak is jelentősen befolyásolják a nem gátolt hányad további útját (a diffrakció – elhajlás hatásának eredményeként) (Tabakcioglu et al. 2010). A rádiójelek esetében (különösen az 1 - 30 MHz tartományban) számolni kell az ionoszféra F1 és F2 rétegeinek reflektáló hatásával is. Ebben a tartományban gyengülő görbéket jár be a kibocsátott elektromágneses sugárzás a reflexiós zónák között. Az alacsonyabb frekvenciák esetében az alacsonyabb légrétegeknél ezek a hatások nem számottevők. Így a magas frekvenciák (mikrohullám) esetében a rádióhullámok terjedése jobban korrelál a rálátással, amennyiben az emberi szem felbontóképességét nem vesszük figyelembe, úgy is mondhatnánk, nagyjából meghatározható egy kibocsátási bázispontra lefedettsége terepbejárással. A terjedés külső határát a szakzsargon rádió horizont-nak nevezi, amely hullámhosszonként más és más lehet. A gyakorlatban tehát a terjedési karakterisztika szempontjából meghatározó a jelerősség és a frekvencia (Edwards és Durkin 1969). Míg az FM rádió adást (~100 MHz) kevésbé befolyásolják, a mikrohullámú lefedettséget alapvetően befolyásolja az épületek és a növényzet térbeli elhelyezkedése.

A rádió horizont egyszerűsített kiszámítása a következő képlettel valósítható meg:

$$d^2 = (R + h)^2 - R^2 = 2Rh + h^2$$

ahol R a Föld sugara, h a távközlési torony magassága, d pedig a terjedési távolság.

$$d = \sqrt{2Rh}$$

$$Hr = 3,57 \cdot \sqrt{h}$$

ahol Hr a rádióhorizont, h pedig a bázistorony magasságának a jele

Az egyszerűsített képlet nem ad lehetőséget arra, hogy a lefedett zónában értékeljük a vételi minőséget, nem számol a domborzattal, a tereptárgyakkal és a légkör térben változó összetételével, csupán a legjobb kondíciók mellett értékeli a jel vételének legszélső határát.

A terjedési vonalak kissé ívelték a légkör reflektív hatásai miatt, a rádiófrekvenciás jelek nem egyenes vonalúak. Így a rádiófrekvenciás rálátás nem egyenlő a geometriai rálátással.

A körkörös Föld profilra, azaz a kiemelkedésekre és a geoid terjedést befolyásoló domborzatára a távközlésben az Earth bulge kifejezést használják. A légköri nyomás általában a magassággal csökken (k-faktor), és ez elhajlást okoz, ami a körkörös Föld profillal együttesen, valamint a felszíni akadályokkal és légköri anomáliákkal együttesen befolyásolja a terjedés hatósugarát és a jelvételi minőséget, amelyek természetesen nem lesznek azonosak a különböző irányokban. A k-faktor természetesen erősen függ az időjárástól (Wibling 1998).

$$d = \sqrt{2kRh}$$

Amennyiben a k faktor kisebb 1-nél, a vételi lehetőség jobb, mint az egyenes vonalú geometriai rálátás, amennyiben viszont nagyobb, úgy a jelterjedés korlátozottabb a felületekből adódó rálátási lehetőségeknél.

Nem csak az erős havazás, vagy esőzés csökkenti a mikrohullámú terjedést, a faágak, a lombzat mind olyan tényező, amivel számolni kell (Durkin 1977). A tárgyak azonban nem csak a közvetlen kitakarással korlátozhatják a rádióhullámok terjedését, mert elhajlást is okoznak, ami további holt tereket eredményez, vagy a vizuálisan kitakart terület egy részét lefedetté teszi. Nagyon lényeges, hogy az első Fresnel zóna felülete minél kevésbé legyen érdes, mivel a rálátást nem zavaró tárgyak is befolyásolják a hullámterjedést, elhajlást okoznak, a visszavert hányad pedig befolyásolja az elsődleges kisugárzott jel szabad terjedését (Tabakcioglu és Kara 2009).

A mobiltelefonok által használt rádiójeleknek nem kell elérni a rálátási határt, a rádió horizontot. Számos hatás terheli a jel terjedését ebben az esetben is:

- házfalakról, sziklákról történő sokszoros jelvisszaverődés (Multipath hatás)
- elhajlás a tárgyakon
- r^{-4} magassági és légköri zaj
- akadályok gyengítő és kitakaró hatása, elhajlás, visszaverődés

Mindezen hatások miatt a mobiltelefon jelterjedési környezet rendkívül összetett, a többutas hatások Rayleigh típusú statisztikai modellel leírható gyengülési effektushoz vezetnek. A Rayleigh-jelgyengülési modell elfogadható mind városi környezetben, mind a troposzféra és ionoszféra hatásainak függvényében (Kara et al. 2003). A Fresnel zóna koncepció széles körben elfogadott a rádióhullámok terjedésének modellezésénél (Yavuz 2014). Segít a terjedési veszteség, a diffrakció és reflexió kiszámításában az adó és vevő között.

$$F_n = \frac{\sqrt{n \lambda d_k (d - d_k)}}{d}$$

ahol F_n a Fresnel zóna rádiusza, λ a hullámhossz, n a Fresnel zóna száma (a bázistól számítva), d az adó és a vevő egyenes vonalú távolsága, d_k a zóna távolsága.

A Fresnel zóna szempontjából megadhatjuk a frekvencián kívül az első Fresnel zónára jellemző légkörtisztasági tényezőt. Szabadtéri csillapítással számol a modell, amennyiben az első Fresnel zóna szabad, a terjedést nem akadályozzák a tereptárgyak. Így az útvonal bármely pontján az első Fresnel zóna sugara a következő egyenlettel számítható ki:

$$R = 31,6 \sqrt{\lambda d_1 d_2 / d - 4ac}$$

ahol R a Fresnel zóna sugara, d_1 a rövidebb útvonalhossz, d_2 a hosszabbik útvonalhossz, a a hullámhossz.

A sík földfelszín feletti csillapítás a

$$PL(d_0) = 20 \log_{10} \frac{4\pi d_0}{\lambda}$$

ahol λ a hullámhossz, d a távolság (Rappaport et al. 1997).

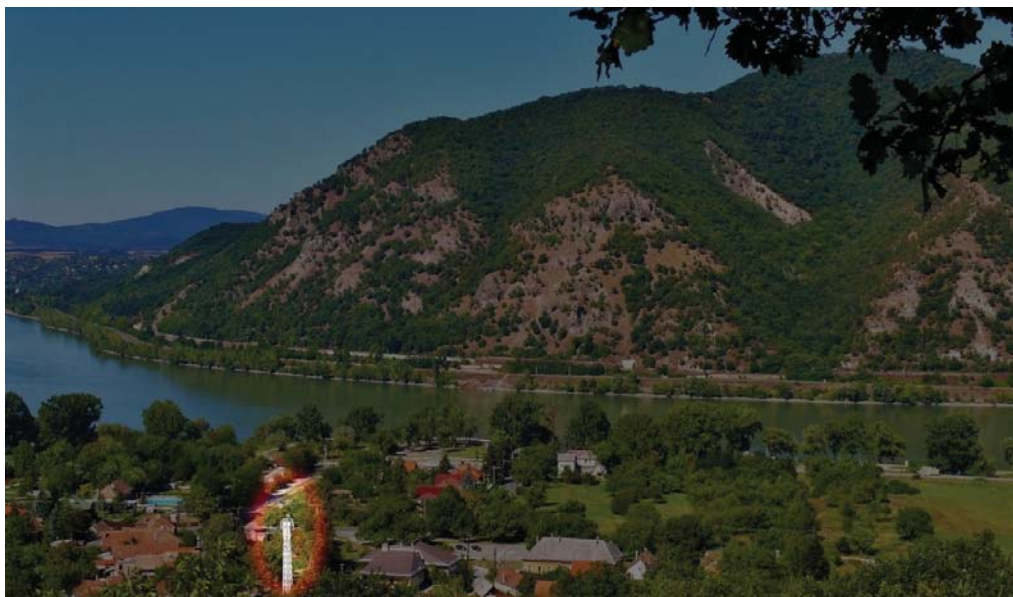
Esetünkben a háromdimenziós domborzati adatok felbontása határozza meg a modell celláinak méretét. A nagyfelbontású (2 m terepi felbontásnál részletesebb) modellezés erős számítástechnikai kapacitást igényel, és a számítógépes műveletek hosszú ideig eltarthatnak. Első lépésben kétdimenziós (raszteres) adatformába rendezzük az alapvetően háromdimenziós pontfelhőként képződő felületmodell adatokat. Ez a gyakorlatban például olyan geoTIF

fájlként képzelhető el, amelynek színintenzitás értékei a tengerszinttől eltérő magasságot jellemzik. Így a számítás során egy olyan mátrix áll elő, amelynek minden cellája egy vevő lokációt szimulál. Az algoritmus tehát minden egyes cellára kiszámítja az egyenes vonalú terjedés lehetőségét, a diffrakció mértékét, a jelvisszaverődés várható hatását az adott hullámhosszon, és minden egyes számításnál figyelembe veszi a bázis torony magasságát. Így a lefedettség és a várható minőség is értékelhető.

Az algoritmus meghatározza az adó és a vevő közötti kimagasló objektumokat, valamint azok rádióhullámra gyakorolt hatását. Az algoritmus felállítja a háromdimenziós modell alapján a Fresnel zónákat, majd a szórás központot a reflexió és szórás pontok átlagából számítja.

Nagyon lényeges, hogy a lefedettség modell pontosságát nagyon erősen befolyásolja a háromdimenziós térmodell részletessége és pontossága, a növényzet háromdimenziós leképzésének részletessége (Bertoni 2000). Ezért egy olyan felmérési módszert dolgoztunk ki, amellyel egy repülésből, költséghatékonyan és gyorsan beszerezhetőek a megfelelő minőségű térmodellek.

A módszerre egy példát is bemutatunk. Egy lehetséges bázisállomás telepítési pontra elkészítettük a mikrohullámú terjedést gátló objektumokkal számoló modellt Dömös környezetére. Az optimális kihelyezési terület megválasztásában esztétikai, környezetvédelmi szempontok is szerepet játszottak (1. ábra), illetve az is hogy az állomás működési feltételei biztosítottak legyenek.



1. ábra Fontos, hogy a torony illeszkedjen a táj textúrájába

Figure 1. It is an important aspect that the tower shall become an organic part of the landscape

A mobiltelefon bázisállomások építési engedélyezési eljárását az egyes építményekkel, építési munkákkal és építési tevékenységekkel kapcsolatos építésügyi hatósági engedélyezési eljárásokról szóló 46/1997. (XII. 29.) KTM rendelet, a bázis állomások frekvenciahasználat engedélyezését a Nemzeti Média- és Hírközlési Hatóság folytatja le az államigazgatási eljárás általános szabályairól szóló 1957. évi IV. törvény, az elektronikus hírközlésről szóló 2003. évi C. törvény, a polgári frekvenciagazdálkodás egyes hatósági eljárásairól 6/2004. (IV. 13.) IHM

rendelet alapján. A sugáregészségügyi követelményeket a 0 Hz-300 GHz frekvenciájú elektromos, mágneses és elektromágneses terek lakosságra vonatkozó egészségügyi határértékeiről szóló 62/2004. (VII. 26.) ESzCsM rendelet határozza meg.

Már a tervezés során elérhető, hogy a tornyok sugárvédelmi és környezetvédelmi szempontoknak is megfeleljenek. A helyszín-keresés tehát nem csupán matematikai lefedettségi és fogyasztószám alapú méréseken alapul, de messzemenően szem előtt kell tartani a város épített értékeinek örökségvédelmi és a városkép látványának védelmi elvárásait.

A Belvárosban olyan helyszínek felkutatását kíséreltük meg, melyeken a kihelyezés nem okoz jelentős tájképi problémát, elhelyezkedése magaslati jellegű, és egy kétoldalú egyeztetés és bejárás során várhatólag nem érkezne tiltakozás az Önkormányzat, illetve a szomszédok köréből. A helyszínek elsősorban önkormányzati tulajdonú vagy zártkertes területek voltak.

Torony természeti értéket képviselő földrészletein nem helyezhető el. Városépítészeti és esztétikai szempontból a legmegfelelőbb megoldást az jelentené, amennyiben a területen jelenlévő épületek valamelyikének tetőszerkezetére épülne fel a torony, ám ehhez nagy magasságú és teherbírású épületre volna szükség. Így jelen esetben maradt az önálló torony létesítés lehetősége. A torony magántelken, vagy közintézmény kertjében általában árbo, vagy monopól torony jelleggel épül meg. A torony természetesen lehet egy műalkotás, például egy kilátótorony része is, amennyiben közparkban kerül megvalósításra, és így a lakosság ellenállás is kisebb.

A több forrásból keletkező RF sugárzások pillanatnyi értékei összeadódnak az elektromágneses térelmélet törvényszerűségei szerint. Így minden új forrás megjelenésével, amely a környezetbe sugároz, növeljük környezetünk elektromágneses terhelését (Thuróczy et al. 2004). A mobiltelefonok és egyéb távközlési eszközök a 300 kHz–300 GHz frekvenciasávot használják. Magyarországon jelenleg nincs olyan általános, az ország egész területére érvényes szabály, amely a lakosság egészségének védelmében védelmi övezeteket jelölne ki, kizárná például, hogy lakóterületeken, egészségügyi és gyermekintézményektől számított meghatározott távolságon belül ne lehessen antennákat telepíteni, ennek ellenére a bázis védelmi övezetét figyelembe kell venni sugárterjedési szempontból. Az elhelyezés engedélyezési kérelméhez a tájba illeszthetőség igazolására tájrendezési szakági alátámasztó nyilatkozatot kell mellékelni (szakhatóság például az illetékes nemzeti park igazgatóság). Az antenna sugárzása irányított, így megfelelő beállítás és műszaki megoldás esetén közvetlenül az antenna alatti területen a sugárzás intenzitása csekély, ezért a bázisállomások sugárzása az antenna közelében (60–200 m) nem veszélyes, legfeljebb egy szűk környezetet kell elérhetetlenné tenni a járókelők számára (például elkerítéssel), amennyiben épületek kitarakása ezt nem oldja meg. Figyelembe kell venni a környező lakó és közösségi terek, épületek, ablakok expozícióját is. Természetesen számolnunk kell a már említett jelenséggel, hogy több berendezés kibocsátott elektromos sugárzása összeadóddhat, így a lehetséges legnagyobb expozíciót ennek figyelembevételével kell meghatározni. Az antenna sugárzási irányának módosításával, vagy megfelelően kialakított árnyékolással a térerősség csökkenthető.

A természetvédelmi, környezetvédelmi szempontokat, tájképi jelleget és a várható lakossági ellenállást figyelembe véve meghatározott potenciális telepítési helyekkel biztosítható lefedettség modellezése a következő feladat.

A modell alapján a 2015. novemberében végzett repülőgépes felmérésünk szolgált, amelynek segítségével mérőkamerás légi fotogrammetriai módszerrel előállítottuk a terület ortofotó-térképét és háromdimenziós felületmodelljét. A felmérés fázisait az 1. és 2. táblázat szemlélteti.

1. táblázat A légi felmérés fázisai
Table 1. Stages of the aerial survey

<i>Felmérési fázis</i>	<i>Időráfordítás</i>
Repüléstervezés	2 óra
Engedélyeztetés	5-12 nap
Mérőkamerás sztereo fotogrammetriai célú repülés	1 óra

2. táblázat További munkarészek
Table 2. Further stages of the work

<i>Felmérési fázis</i>	<i>Időráfordítás</i>
Terepi geodéziai felmérés	1 nap
Fotogrammetriai labormunkálatok	2 hét
Hullámterjedés modellezés	3 nap

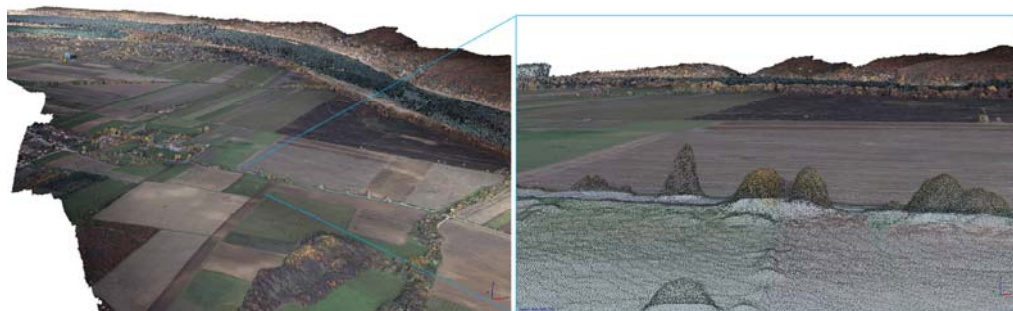
2015 novemberében a módszer bemutatásának céljából Piper Pa 32 repülőgéppünkkel (2. ábra) elvégeztük a Dunakanyar szűk térségének légi felmérését, amelyet egy napos terepi geodéziai felmérés, majd két hetes labormunka követett. A mérőképek egy blokkban kezelt sugárnyaláb kiegyenlítéses fotogrammetriai feldolgozását követően felületmodellt, terepmodellt, illetve ortofotó-mozaikot hoztunk létre. Az így létrejött állományokat használtuk fel a lefedettség modellezéséhez.



2. ábra A fotogrammetriai célokra kialakított Piper Pa 32 300 repülőgép
Figure 2. The modified Piper Pa 32 300 aircraft

A fotogrammetriai termékek előállítására egy blokkban kezelt sugárnyaláb kiegyenlítéses téréfotogrammetriai módszerrel történt a soron belül ~78%-ban, sorok között ~35 %-ban

átfedő 50 megapixeles mérőkamerás felvételekből. A felmérés 15 cm terepi felbontású ortofotó-mozaikot eredményezett, valamint egy nagy sűrűségű pontfelhőt (3. ábra). A pontfelhőt raszteres formátummá konvertáltuk, geoTIF elevation fájlj hoztunk létre belőle.



3. ábra Az Interspect légi felméréséből származó pontfelhő részlete
Figure 3. Part of the point cloud of Interspect aerial survey

A terjedési modellt egy 30 méteres EOV 640053.888 268875.025 (47°45'48.85 18°54'53.16) kihelyezési magasságú bázisállomásra számítottuk ki (4. ábra), a jelenlegi, valós körülmények alapján, 5 km maximális távolságra. A modell számol a hullám elhajlással és a path loss-hoz hasonló veszteségekkel is. A nem színezett területekre a lefedettség nem biztosítható a zéruspontból. Az adott távközlési berendezés adatainak (hullámhossz, stb.) ismeretében az eredményeket a jelenleginél is pontosabban ki tudjuk számítani.



4. ábra A bázisállomás szimulált helye
Figure 4. The simulated location of the base station

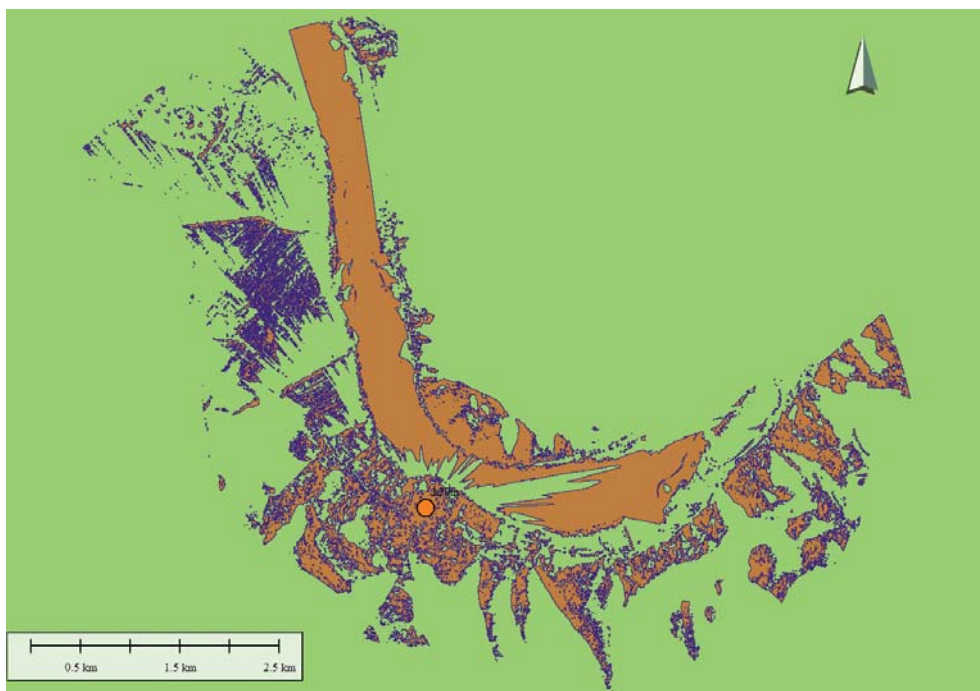
A nagyrészletességű háromdimenziós modell megadása után megadjuk a jeladó telepítési helyét, annak magasságát, és az is megadható, hogy a legtöbb vevőkészülék milyen terepfeletti magasságban helyezkedik el. A jeladó felosztható diszkrét térszögekben sugárzó bázisokkal, így kezelhető az is, amennyiben egy területre több meghatározott

szögtartományban sugárzó jeladót telepítenek. A számítási idő csökkentése érdekében megadhatjuk azt a bázistól számított távolságot, mint rádiuszt, amelyre vonatkozóan a modell el kell, hogy készüljön. A bemutatásra kerülő feladat esetében 5 km távolságot adtunk meg. A bázisállomás védőzónája is figyelembe vehető, így a modelltől kihagyható a torony közelében lévő védőzóna, amely a sugárzás szempontjából árnyékolt. Jelen esetben ezt nem adtuk meg, mert a torony közeli egyenetlenségek is értékes információt tartalmazhatnak számunkra. A számítás természetesen térszögenként és egy lépésben is lefuttatható. A légköri korrekcióhoz meg kell adnunk az atmoszféra indexet, amely a mikrohullámú modellezésnél 1.333 körüli érték, a mikrohullámú rádiójel légköri reflektancia számítása érdekében. A cellaméretet nem korlátozzuk, a felületmodell terepi felbontásának megfelelő cellákat alkalmazunk.

A szimuláció nem csak a valós állapotot reprezentáló háromdimenziós modellel végezhető el. A légi felmérésből származó modellre megnyithatjuk tervezett épületek és egyéb objektumok háromdimenziós vektorgrafikus fájljait, így egy jövőbeli beruházás lefedettséget befolyásoló hatása is modellezhető.

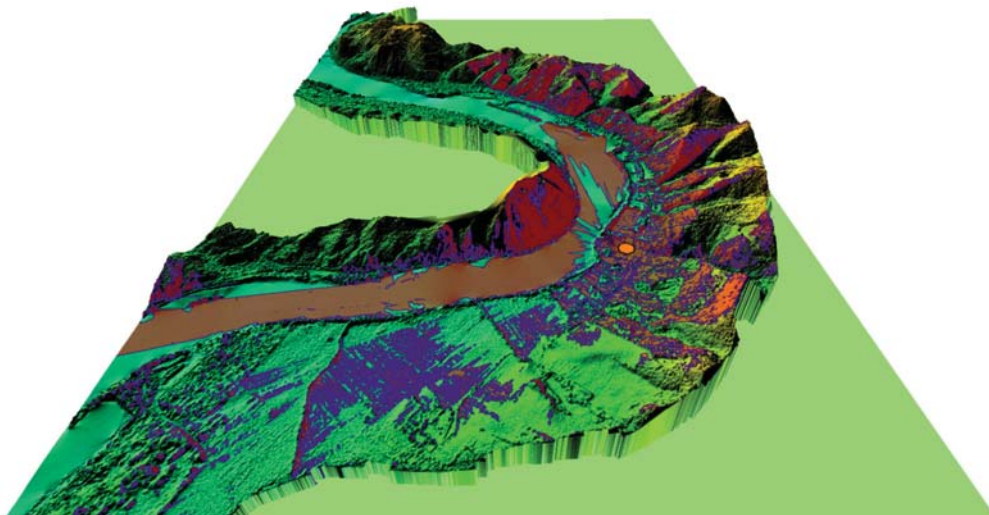
Eredmények és megvitatásuk

A módszer figyelembe veszi a növényzet zavaró hatását, számol a berendezések kihelyezési magasságával, a domborzati viszonyokkal, a vegetációval és épített objektumokkal, a Föld görbületével, Fresnel zónákkal, a jelerősség veszteséggel és az adott hullámhosszoknak megfelelő terjedési sajátosságokkal. A növényzet és az épített objektumok figyelembevételével feltérképezhetőek azok a térszínek, amelyekre a mikrohullámú sugárzás akadálymentesen juthat el (5. ábra).

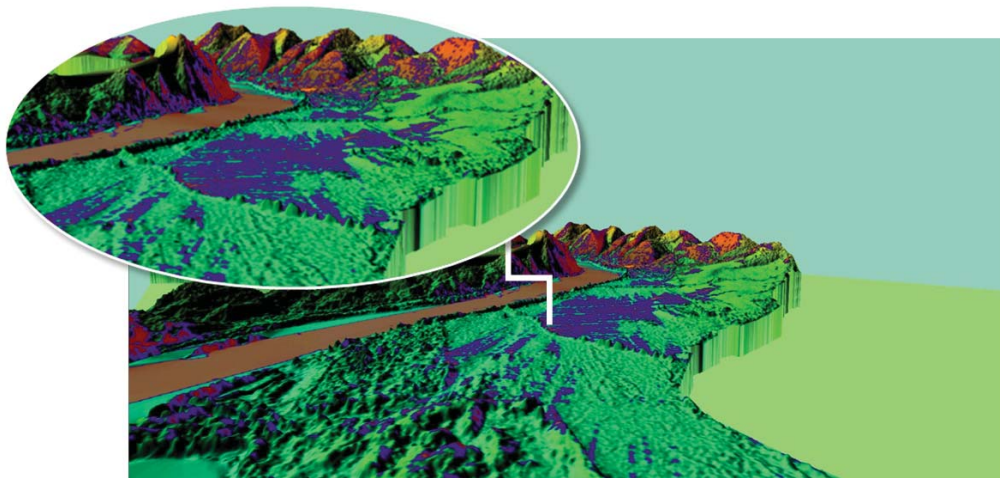


5. ábra Az egy bázis állomás biztosította lefedettség
Figure 5. The coverage provided by the simulated base station

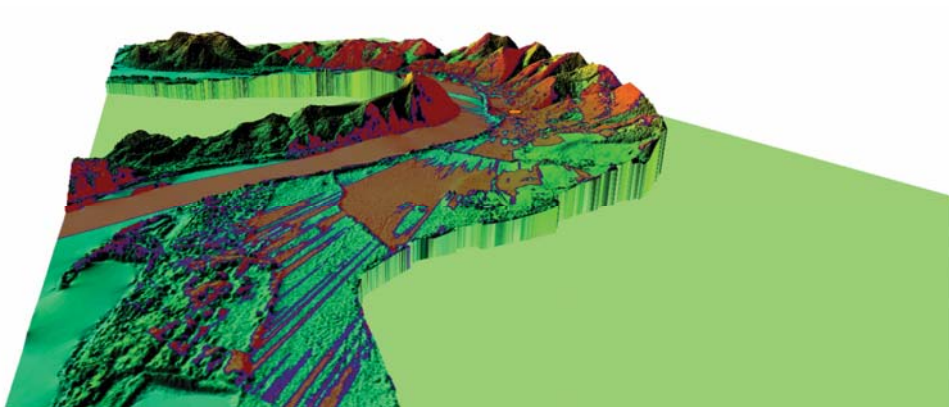
Az akadálymentes terjedési modell nem számol a növényzet és a peremfelületek átteresztő, illetve az árnyékolt területeket érintő visszaverő hatásaival (6. és 7. ábra). Bár az akadálymentes modell jól reprezentálja a jó minőségű vételi lehetőséggel bíró területeket, ehhez képest azonban az egy toronyból eredő lefedettség jelentősen nagyobb (8. és 9. ábra). A maximális lefedettséget a 10. ábra mutatja be. Ez a modell pusztán a domborzatmodellt veszi figyelembe és ideális légköri jellemzőkkel számol. A két modellt a 11. ábra hasonlítja össze.



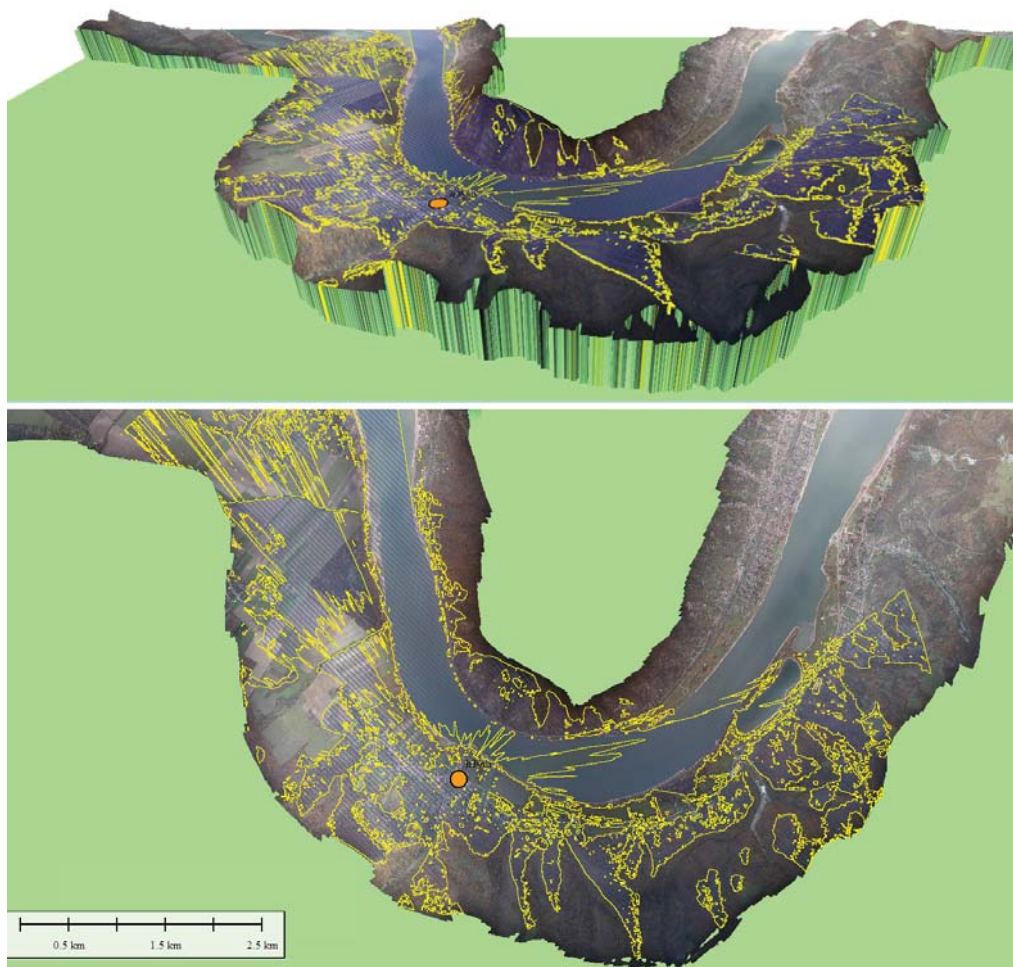
6. ábra Az akadálymentesen felszínre érkező hullámok modellje
 Figure 6. Barrier-free beam propagation model
 (model of the waves which seamlessly reach the surface)



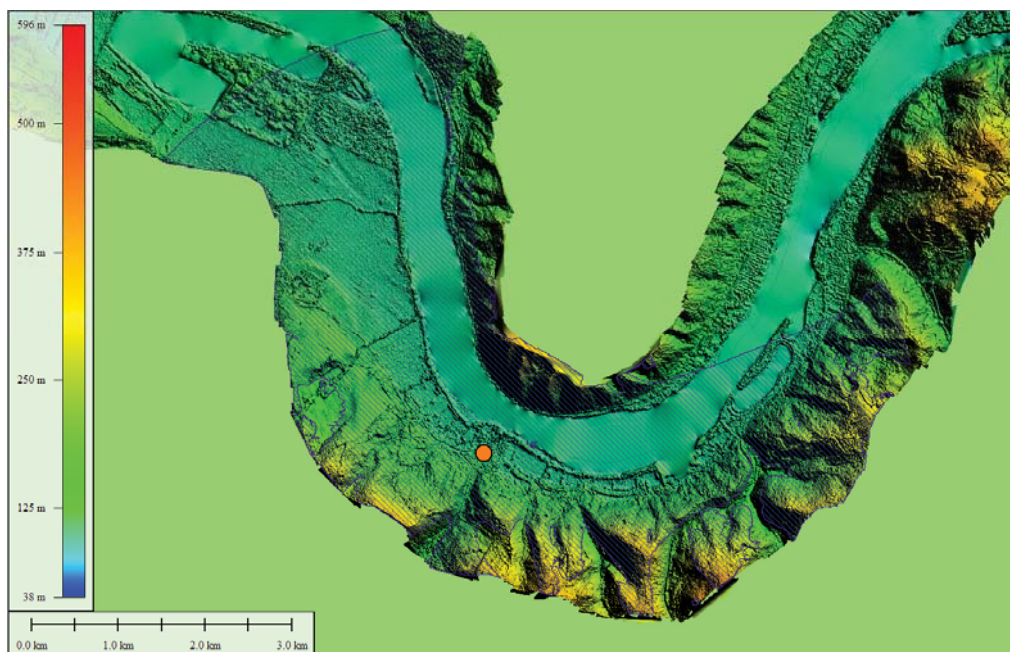
7. ábra Ez a modell kizárólag azokat a térszíneket térképezi föl, ahová a sugarak akadálymentesen jutnak el
 Figure 7. This model is only maps the surface areas where the beams reach unobstructed



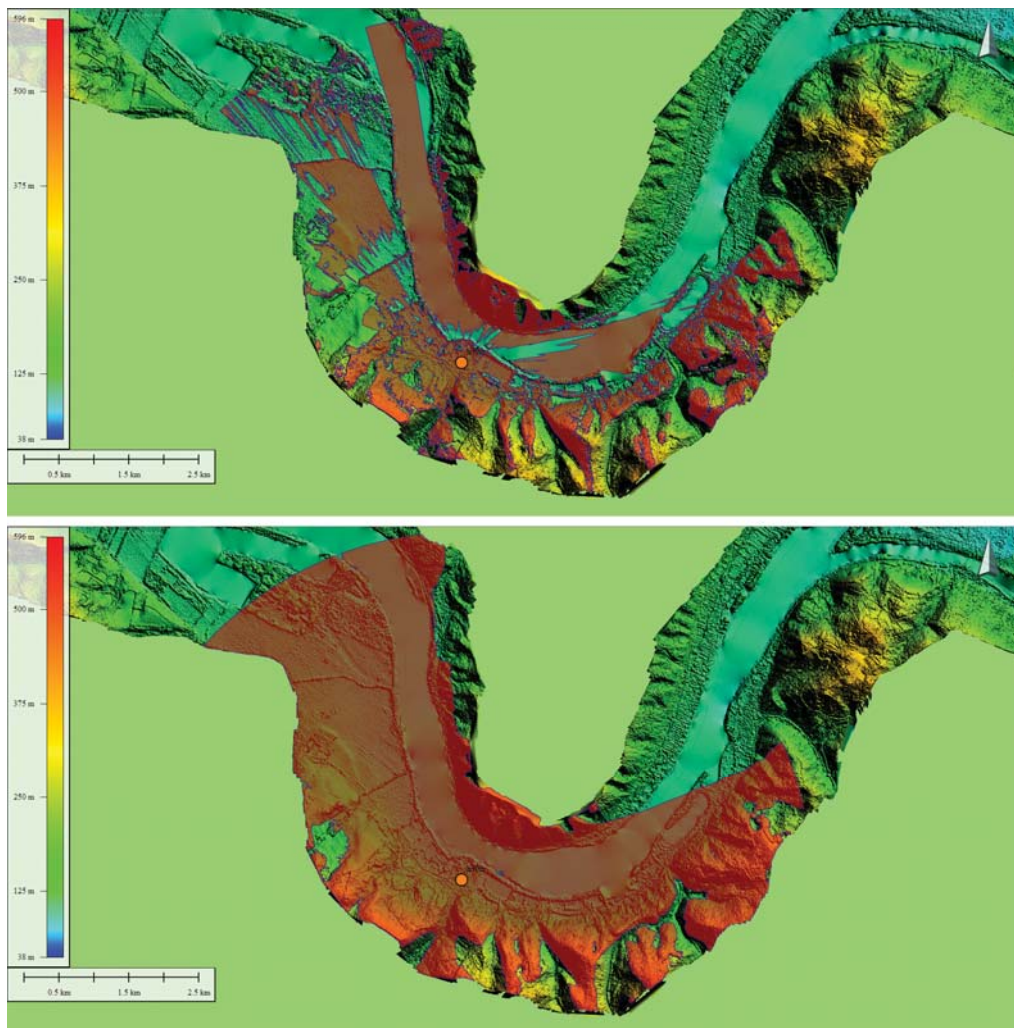
8. ábra A lefedettség térkép 3D megjelenítése
Figure 8. 3D representation of the coverage map



9. ábra A lefedettség térkép
Figure 9. Coverage map

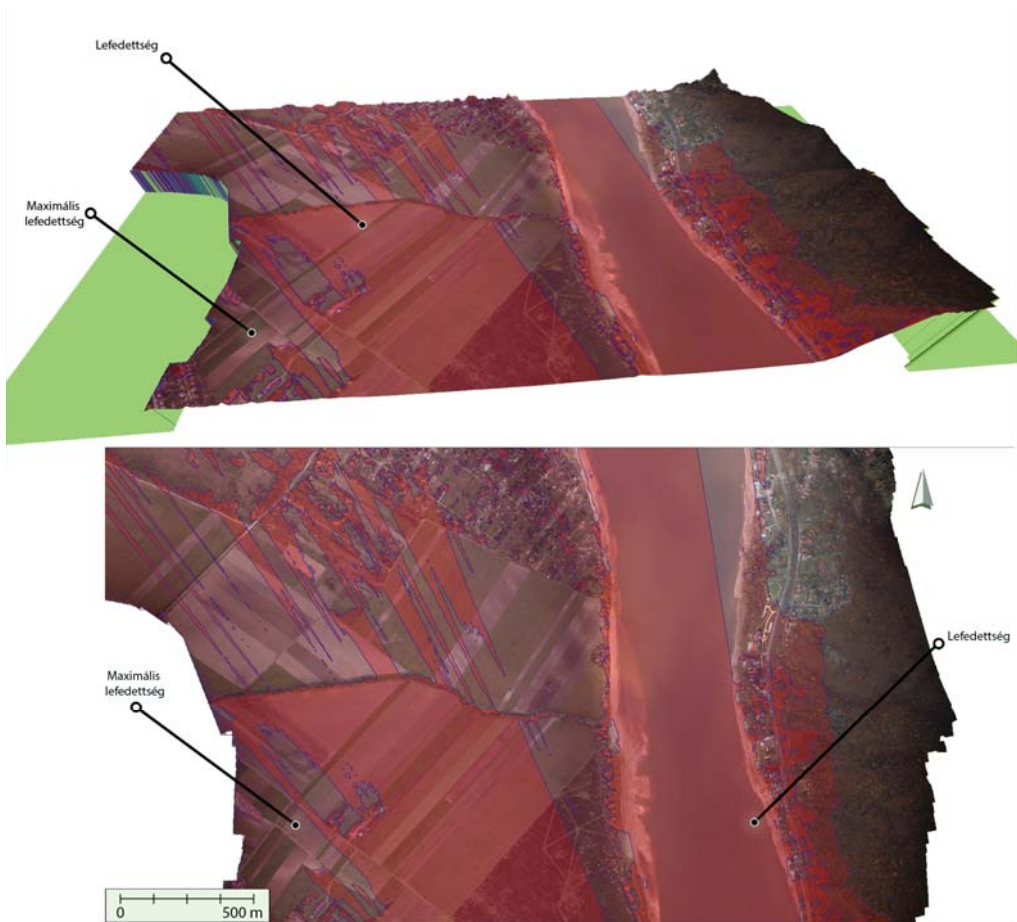


10. ábra A maximális lefedettséget reprezentáló modell
Figure 10. Model representing the maximum coverage



11. ábra A modell (fent) és a maximális lefedettség modell (lent) összehasonlítása
Figure 11. Comparison of the model (above), and the maximum coverage model (below)

Az utóbbi térképrészleten vörössel nem színezett területeken semmilyen körülmények között nem várható vételi lehetőség. A 12. ábrán a vizsgált terület Zebegeynél található részletén mutatjuk be a jó minőségű vételi lehetőséggel rendelkező helyek és a maximális jelterjedés különbségét.



12. ábra A jó minőségű lefedtség és a maximális hullámterjedés különbségének szemléltetése a zebegényi szakaszon

Figure 12. The difference of the quality and the maximum propagation coverage near Zebegény

A modellt a PathLoss 5 szoftvercsomag segítségével ellenőriztük. A szoftver pont - pont funkcióját használtuk. Dott földfelszíni pontok, mint potenciális vételi helyek megjelölésével ellenőriztük a modell megfelelőségét különböző határterületeken, kifelé haladva. A ponttól pontig frekvencia, polarizáció és teljesítményelemzés alapján elmondható, hogy a hullámhossz és a bázisállomás ismeretében, kellően részletes fotogrammetriai úton készített felületmodell segítségével a megfelelő lefedettségű modellek előállíthatóak.

A módszer alkalmas a mobil kommunikációs lefedettség előzetes modellezésére, az érintett előfizetők számával összevethető döntéstámogató adatbázis készítésére. Nem csak a jelenlegi szituációra végezhető modell készítés. Egy terület jövőbeli beépítése esetére is modellezni tudjuk a várható lefedettség változást. Így a technológiai szempontból legmegfelelőbb telepítési helyek kijelölése megoldott. Ugyanakkor táj- illetve városökológiai okokból még számos szempontot figyelembe kell vennünk. Ahogyan már korábban érintettük, a bázis telepítés kritikus kérdése az esztétika (13. ábra). Ahogyan a felvételtől szembetűnik, a

létesítmény, bár a magaslaton található, illeszkedik a tájba, kiegészítő objektumaival a lehető legkevesebb teret foglal a természetközeli felszínből. Ugyanakkor felvonulási és védőterületek minden esetben szükségesek, még, ha a torony körüli zárt terület minimalizálva is van és a kerítésen kívül degradált felszín nem található. A lakott területek és forgalmas útvonalak felől a kultúrtörténeti emlék mögött csak kevésbé látszik a műszaki létesítmény. A régi torony felhasználásával elhelyezett berendezések a természetjáró számára sem szokatlanok, mert egy megszokott, lassan műszaki emlékeknek tekinthető felépítmény létjogosultságát növelték meg.



13. ábra Távközlési eszközök az esztergomi Strázsas-hegyen (a szerző légifelvétele)
 Figure 13. Telecommunications equipment at Strázsas-hegy hill near Esztergom (photography by the author)

A megjelenésükkor ellenérzéseket kiváltó rácsszerkezetes telekommunikációs tornyok is lassan megszokottá válnak (14. ábra). Olyannyira, hogy helyenként jobb a megítélésük a modern, iparművészetinek mondható formatervezésű tornyoknál (15. ábra). Ez persze a kivitelezésen múlik. Számos hazai példát láthatunk álcázott tartószerkezetekre, amikor egy a környezetébe illő objektumnak álcázzák a tornyot. Ilyen például a műfenyő tartószerkezet. Utóbbiból negatív példával is találkozhatunk, mert egy a 10-20 m magas fenyőcsoportból kiemelkedő 80 m magas műfenyő meglehetősen különös látványt nyújt. Ilyen esetekben érdemes inkább a képzőművész fantáziáját igénybe venni, vagy a klasszikus rácsszerkezetet alkalmazni. Ugyanakkor az alacsonyabb, és frappánsan álcázott tornyok terjedése nagyon előnyös esztétikai szempontból a klasszikus megoldásokhoz képest.

A tájképi jelleg megőrzésében a stratégiai technológiák képviselőinek óriási felelősségük van. Ameddig egy területen nem engedélyezzük oda nem illő ingatlanok, közlekedési és információs objektumok telepítését, addig az életmentést, biztonságot elősegítő távközlési infrastruktúra kiépítése sokszor elkerülhetetlen. Sajnos amennyiben egy a tájképi jelleget romboló objektum felépül, nehezebben indokolható a többi tilalma. Amikor az alföldön

megjelentek a villanypóznák, vasúti töltések és egyéb objektumok, a különböző építési, halastó létesítési és egyéb engedélyek kiadása már nem bántotta annyira a lelkiismeretet. Ez a táj degradáció lassú, de biztos forgatókönyve. Ezért kiemelt fontosságú az elszórtan telepítendő, egyedi létesítmények tájba helyezésének gondos, semmiképpen sem pazarló, azonban a kiemelt tájképi jelentőségű területeket kímélő térképi tervezése és esztétikus megvalósítása.



14. ábra Rácsszerkezetű távközlési torony és a falu templomának tornya
Figure 14. Lattice telecommunications tower and church tower



15. ábra Modern telekommunikációs torony
Figure 15. Modern telecommunications tower

Léteznek a tájképvédelemnél gazdasági értelemben kézzelfoghatóbb szempontok is. A telepítés pontos helyének megválasztásakor figyelembe kell venni, hogy a talajban elhelyezésre kerülő, a torony stabilitását megteremtő objektumok hogyan befolyásolják a talajvíz áramlását. Komárom-Esztergom megye területén vannak olyan létesítmények, amelyek megépítésekor és a hozzájuk vezető felvonulási út elkészítésével annyira megváltozott a terület vízgazdálkodása, hogy az egyik esetben 60 hektáros terület vált használhatatlanná a belvíztől.

Az építési, logisztikai és mezőgazdasági területeken túl nagyon fontos, hogy a természeti területek védelme hasonló mértékben megvalósuljon, mert míg előző esetben anyagi károk jelentkeznek, a természetvédelmi kártok hosszú távú károkat fognak okozni a mikroklíma megváltozásán és egyéb problémákon keresztül, akár a távolabbi sűrűn lakott területeken is. Ezek a károk idejekorán nehezen becsülhetőek fel. Éppen ezért törekedni kell arra, hogy egy természeti területen történő beavatkozás, telepítés során a közvetlen pár méteres zárt műszaki területet körülvevő övezetben ne okozunk változásokat. A talaj vízjárásán kívül a talajállapotokat, a fényszennyezést, a domborzati viszonyok jelentős megváltozását és a bolygatott felszín rekultivációját érdemes első helyen említenünk. Az építkezés során a természetes vagy annak megfelelő felszín károsodik. Az építési és felvonulási területeken a feltalajt és vele együtt a növénytakarót elszállítják, máshol földkupacokkal borítják. A tájsebek kezelése a beavatkozás rendkívül fontos eleme, ugyanis a kopárokon általában a tájidegen, invazív növényfajok megtelepedése várható. Ezek a sebek kaput nyitnak olyan növényfajok elterjedésének, amelyek kiszorítják az őshonos növényeket, sok esetben a mikroklímát is károsan befolyásolva. Az invazív növények visszaszorítása csak olyan beavatkozás-sorozattal valósítható meg sikeresen, amely hosszú távú megoldást jelent. Gazdálkodási célú erdőültetvény esetében nagyjából 2 000 000 Ft költségvonzattal bír 10 hektáronként (Csór 2015). Védett gyepek esetében a fás szárú inváziós fajok hosszabb távú eltávolításához majdnem fél millió forint / ha költségráfordításra van szükség (Szidonya és Vidéki 2015). A beavatkozás költségvonzatát emeli, amikor a felszín egyes elemeit szeretnénk megőrizni, és nem lehet a munkaterület teljes bolygatásával járó eljárásokat alkalmazni, vagy a restauráció, a kiszorított őshonos növényfajok visszatelepítésének idő és költségvonzata magas. A *száraz gyepek megőrzése Közép-Magyarországon* LIFE+ Nature pályázat keretében 650 hektár területen végeznek 2018-ig bezárólag restaurációs tevékenységet, nagyjából 600 millió forintos ráfordítással. Az összeg jelentős részét az invazív fajok visszaszorítására, a természetes növénytakaró helyreállítására fordítják, de költenek belőle a megelőzésre is, mint például felszámolják az illegális hulladéklerakókat és az illegális járműforgalmat, amely a tájidegen növények megtelepedését segítené. Az *Özönművelés elleni egységes védelem homoki és ártéri élőhelyeken* Magyarország és Szlovákia határán átnyúló együttműködési program során 2013-ig 869 680 EUR összeget használtak fel a leginkább költséghatékony fajspecifikus kezelésre a következő területeken: Nagykőrösi pusztai tölgyesek Natura 2000 terület; Csévharaszti Borókás Természetvédelmi terület; Szigeti Homokok Natura 2000 terület (Szigetmonostor); Duna és ártere Natura2000 terület (Nyáros-sziget, Körtevényes-sziget); Ipolyvölgy Natura 2000 terület (Dejtár); PLA Dunajské luhy; Csenkei-erdő Natura2000 terület (Čenkov); Duna menti ártéri élőhelyek (Chľaba-Veľké Kosihy). A keretösszegeből összesen 645 ha terület kezelése valósulhatott meg, és ez is alátámasztja a többi szakirodalomban jegyzett gazdasági terheket: a járulékos költségekkel együtt 300 000–500 000 Ft közé tehető egy hektárnyi természeti terület helyreállítása.

Éppen ezért nagy felelősség van a telepítés megtervezésében, amelyhez minden rendelkezésre álló térinformatikai és terepi adatot célszerű felhasználni és a legnagyobb körültekintéssel kell a kivitelezést elvégezni. A tájrestaurációt a beavatkozások végeztével haladéktalanul le kell folytatni a későbbi károk megelőzése érdekében.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetet mondok Molnár Zsoltnak és Arday Andrásnak, akik műszaki vezetőként és pilótaként vettek részt a repülőgép fedélzeti feladatok megvalósításában, Molnár Zsoltnak ezen felül a fotogrammetriai munkálatokért és terepi mérésekért is köszönetet mondok. Továbbá megköszönöm az Antenna Hungária Zrt. segítségét.

Irodalom

- Andersen J.B., Rappaport T.S., Yoshida S. 2005: Propagation measurements and models for wireless communication channels *IEEE Communications Magazine* 33(1): 42–49
- Bertoni H.L. 2000: Radio propagation for modern wireless Systems. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey. p. 258.
- Chen Z., Delis A., Bertoni H.L. 2004: Radio-wave propagation prediction using ray-tracing techniques on a network of workstations (NOW), *Journal of Parallel and Distributed Computing* 64(10): 1127–1156
- Christiansen, P.L. 2013: 50 years with J.B. Keller's Geometrical Theory of Diffraction in Denmark – Revisiting the Theory: Impedance Half-Plane Diffraction Coefficients, *Antennas and Propagation Magazine, IEEE* 55(4): 32–40.
- Csór A. 2015: A fehér akác visszaszorítása a Valkói Erdészeti területén. In: Csiszár Á., Korda M. (szerk.) *Rosalia Kézikönyvek, Duna–Ipoly Nemzeti Park Igazgatóság, Budapest.* p. 67.
- Durkin J. 1977: Computer prediction of service Areas for VHF and UHF land mobile radio Services, *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 26(4): 323–327.
- Edwards R., Durkin J. 1969: Computer prediction of service area for V.H.F. mobile radio networks. *Proceedings of the IEE* 116(9): 1493–1500.
- Erricolo D., Canta S.M., Hayvacı H.T., Albani M. 2008: Experimental and theoretical validation for the incremental theory of diffraction *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 56(8): 2563–2571.
- Kara A., Bertoni H.L., Yazgan E. 2003: Limit and application range of slope diffraction for wireless communication *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 51(9): 2512–2514.
- Keller J.B. 1962: Geometrical theory of diffraction *Journal of the Optical Society of America* 52(2): 116–130
- Rappaport T. S., Blankenship K., Xu H. 1997: Propagation and Radio System Design Issues in Mobile Radio Systems for the GloMo Project, DARPA/ETO GloMo.
- Szidonya I., Vidéki R. 2015: Egyes inváziós növényfajok állományainak felmérése során alkalmazott módszerek és tapasztalatok. In: Csiszár Á., Korda M. (szerk.) *Rosalia Kézikönyvek, Duna–Ipoly Nemzeti Park Igazgatóság, Budapest.* p. 28.
- Tabakcioglu M.B., Kara A. 2009: Comparison of improved slope UTD method with UTD based method and physical optic solution for multiple building diffractions. *Electromagnetics* 29(3): 303–320.
- Tabakcioglu M.B., Kara A. 2010: Improvements on slope diffraction for multiple wedges. *Electromagnetics* 30(3): 286–296.
- Thuróczy Gy., Szabó J., Bakos J. 2004: Hálózati frekvenciájú elektromágneses terek környezetünkben. *Széchenyi Füzetek: 5. számú útmutató az egészség megőrzéséhez.* Possum Lap- és Könyvkiadó, Nyomdaipari Kft. Budapest.
- Wibling O. 1998: Terrain analysis with radio link calculations for a map presentation program. Uppsala Master's Thesis in Computing Science 139. Uppsala University, Sweden. p. 65.

NETWORK COVERAGE MODELING FOR THE PLACEMENT OF TELECOMMUNICATION TOWERS USING REMOTE SENSING DATA FROM AERIAL SURVEYS

G. BAKÓ

Interspect Ltd.

2314–Halásztelek, II. Rákóczi Ferenc út 42. e-mail: bakogabor@interspect.hu

Keywords: base stations, mobile services, telecommunications, modeling, remote sensing, landscape protection

The design of the landscape, environmental and economical approach to investment planning requires the most modern methods of data collection and modeling. Cost-efficient photogrammetric survey provides data for the optimal installation of telecommunication base stations. Cost efficient areal photogrammetric surveys can yield spatial data that can running simulations and providing maps with planned tower locations. With the help of these databases the complex analysis of network coverage can be carried out. The method, however, is useful not only for new installations. For example, if due to any reason a base station becomes inoperative, the field strength will not only worsen at the very spot but also in the area of the surrounding cells, as these have to take over the partial provision in such a large area they cannot perform the original quality in their own territory. Therefore, the modelling process can also be very important in selecting the substitution tower locations.