



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar
Közlekedéstechnológiai és Közlekedésgazdasági Tanszék

DIPLOMATERV

**Python alapú hálózat érzékenységi és
döntéstámogató alkalmazás fejlesztése forgalmi
modellekhez**

Készítette:

Gosztola Anett

2022

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni Dr. Sipos Tibornak, hogy elvállalta a belső konzulensi szerepet, továbbá köszönöm a félév folyamán nyújtott segítséget.

Köszönöm szépen Verebélyi Bencének, aki a külső konzulensi feladatokat látta el a diplomaterv kapcsán, segítőkész szakmai tanácsokkal és megjegyzésekkel járult hozzá a féléves munkámhoz.

Köszönöm Uti Gábornak, aki szintén szakmai tanácsokkal látott el.

Köszönettel tartozom a RelativeGAP összes munkatársának, akik kedves szavakkal támogattak a dolgozatom megírása folyamán.

Tartalom

1.	Bevezetés.....	2
2.	Szakirodalom feldolgozás	3
2.1	Paraméterek meghatározása.....	3
3.	Előzetes szűrés leírása.....	6
3.1	Manuális kiválasztás	6
3.2	Forgalomnagyság.....	7
3.3	Kapacitás kihasználtság	7
3.4	Szakaszt határoló csomópontok fokszáma	8
3.5	Szakaszokon keresztülmenő útvonalak száma	8
3.6	Szakaszokon keresztülmenő útvonalak száma, kapacitás kihasználtság ..	10
4.	Előzetes szűrés eredménye.....	12
4.1	Verziók futtatása	12
4.2	Forgalomnagyság alapján történő kiválasztás módosítása	17
4.3	Előzetes szűrés eredményei	19
5.	Értékelési kritériumok.....	23
5.1	Szempontrendszer	23
5.1.1	Futásteljesítmény, időveszteség.....	23
5.1.2	Kritikus objektum megközelítése	23
5.1.3	Eljutási idő romlása	24
5.2	Közgazdasági elemzés	24
5.2.1	Légszennyezés	24
5.2.2	Üvegházhatású gázok	26
5.2.3	Zajterhelés.....	27
6.	Python Script bemutatása.....	30
6.1	Python és COM környezet kapcsolat.....	30
6.2	Folyamatábra	31
6.3	Bemeneti Adatok	34
6.4	Elemzés.....	36
6.5	Verziók Futtatása	38
6.6	Eredmények megjelenítése	39
6.7	Kezelői felület, mappaszerkezet	43
6.8	Program integrálásra Visumba.....	43
6.9	Futtatás módjának kiválasztása.....	45
7.	EFM bemutatása.....	47

7.1	EFM Leírása	47
7.2	Szakaszok ellenállása.....	48
7.3	Kritikus Zónák	49
8.	Eredmények bemutatása.....	51
8.1	Döntéstámogató rendszer virtuális megjelenítése.....	51
8.2	Verzió - 1	52
8.3	Verzió -2	54
8.4	Verzió 3.....	57
8.5	Kapott eredmények összevetése az 5 verzióra.....	60
8.6	Manuális kiválasztással történő elemzés	61
9.	További fejlesztési lehetőségek.....	63
10.	Összegzés	64
	Felhasznált irodalom	65
	Ábrajegyzék	66
	Táblajegyzék	68

1. Bevezetés

Dolgozatom célja egy olyan döntéstámogató alkalmazás fejlesztése, amely segíti a hálózatok kritikus és érzékeny elemeinek megtalálását, amelyek lezárásával vagy kapacitásának csökkentésével romlanak a hálózaton belüli eljutási idők. Ez segíthet a hálózati fejlesztések tervezésében, forgalmi szituációk kezelésében.

Munkám során ismertetem a forgalmi modellek általános felépítését, ráterhelési eljárásait, továbbá ismertetem és bemutatom az általam választott város közlekedési hálózatát és modelljét.

A szakaszok kiválasztása kétféle módon történik, az egyik esetben az algoritmus véletlenszerűen szűr és választ ki szakaszokat, szemlélítve ezzel a véletlenszerűen bekövetkező baleseteket, eseményeket. A másik esetben pedig különböző hálózati paraméterek alapján történik a választás, kapacitás kihasználás, szakaszon keresztülmenő relációk közötti útvonalak száma. Továbbá, egy előzetes vizsgálatot követően kiválasztom azokat a paramétereket, amelyeket figyelembe véve a legkritikusabb és érzékeny elemeket szűrhetjük ki a hálózatban.

A további vizsgálatokban ezeket a paramétereket figyelembe véve a kiválasztott szakaszokat lezárom, csökkentem a kapacitásukat, majd megnézem, hogy ez milyen mértékű veszteségeket okoz a hálózaton. Az elemzés során megnézem hogyan változtak kritikus objektumok megközelíthetőségei (pl.: kórház), a hálózati szintű eljutási idők. Megvizsgálom milyen környezeti és társadalmi negatív hatásokkal járnának az egyes változtatások.

Az általam készített Python alapú programkód a fent említett algoritmus alapján elvégzi a kiválasztást, majd a ráterhelés újboli lefuttatása után automatizált módon kigyűjti a hálózati adatokat. Ezekből diagamok, táblázatok és kimutatások formájában megjeleníti a hálózati szintű eljutási időket, kritikus objektumok megközelíthetőségéhez tartozó időket, környezeti és társadalmi negatív hatásokat és az ezekből számolt veszteségeket a különböző esetekben.

2. Szakirodalom feldolgozás

A következő fejezet tartalmazza az általam feldolgozott szakirodalom tartalmát. A cikkek között azokat a paramétereket kerestem, amelyeket figyelembe vettek a kritikus hálózati elemek meghatározásakor. A dolgozatom célja nem ezeknek a pontos meghatározása, azonban fontosnak tartottam, hogy az általam írt programkód tesztelésekor reális eredményeket kapjak, így egy előzetes szűrés keretei között ki tudom választani a megfelelő módszert ehhez.

2.1 Paraméterek meghatározása

A nemzetközi irodalomban is találni példát, ahol a hálózaton történő változásokat, például hídlezárást, vizsgálják abból a szempontból, hogy az milyen veszteségeket okoz a hálózaton. [1] Ennek feltérképezésére PTV Vissim szoftverben valósították meg a forgalom dinamikus ráterhelését a kanadai Halifax-ban [2]. Ebben az esetben a szerzők nem határozták meg a választás okát, úgy vélték, hogy a híd lezárással nagy veszteségek adódhatnak. A különböző verziók futtatásakor az alábbi adatokat vizsgálták meg:

- Átlagos sebesség [km/h]
- Összes késés a hálózaton [h]
- Átlagos késés [min]
- Célbaért járművek száma

A híd lezárásának következtében jelentősen lecsökkent a célba érkező járművek száma, továbbá átlagosan 6 perccel nőtt a késés az alap esethez képest. Ennek oka, hogy több zóna között is csökken az eljutási lehetőségek száma, mivel több útvonal is eddig a hídon ment keresztül.

Ebből következtethetünk arra, hogy a kritikus szakasz megválasztásánál figyelembe kell venni a szakaszon keresztül menő relációk közötti útvonalak számát.

A paramétereket, amelyek alapján kideríthetjük, hogy mik is a közlekedési hálózat kritikus és érzékeny szakaszai már mások is elkezdtek felmérni. A kutatást logisztikai elosztási lánc szempontjából vizsgálták meg, azonban a közlekedés modellezése és az áruszállítás modellezése nem térnek el egymástól nagy mértékben. [3] [4]

A tanulmány három különböző kategóriát nevez meg, amibe a paramétereket sorolja, ez a három a következő:

1. Geometriai paraméterek
2. Áthaladó útvonalak számával kapcsolatos paraméterek

3. Spektrális paraméterek.

Mindhárom csoportba több elemet is meg lehet nevezni, a leírás példákat is tartalmaz egy táblázatban összefoglalva. [5]

Geometriai paraméterek:

- Szakaszok rangsorolása távolság alapján
- Csomópontok megszámlálása alapján rangsorolás

Útvonal alapú paraméterek:

- Szakaszokon átmenő útvonalak száma

Spektrális paraméterek:

- Az elem fontosságának meghatározása a szomszédos elemek fontossága alapján.

Ezt figyelembe véve több megoldást is lefuttatva kiadódhat egy olyan paraméter lista, amely alapján megkapjuk egy közlekedési hálózat érzékeny szakaszait.

A hálózat érzékenységi vizsgálatához kapcsolódóan érdemes lehet nem csak logika mentén kiválasztott szakaszokat eltávolítani, vagy csökkenteni az áteresztő képességet. Szimulálva a véletlenszerűen bekövetkező baleseteket, szükséges forgalmi beavatkozásokat a szakaszok kiválasztása is történhet ilyen módon. Készült erről egy cikk, amelyben kétféle kiválasztást vizsgáltak meg. [6]

Az említett kétféle kiválasztási mód a következő:

- Véletlenszerű hiba
- Szándékos támadás

A véletlenszerű hibának a leírása, hogy a gráfból véletlenszerűen távolítanak el csomópontokat és éleket, majd megvizsgálják ezek milyen következményekkel járnak, mennyire marad robosztus a gráf.

Szándékos támadás esetén itt is rangsorolják az elemeket különböző paraméterek alapján. A csomópontokat a fokszámuk alapján, azaz hány él indul ki belőlök. A szakaszokat pedig a rajtuk keresztülmenő relációk közötti útvonalak száma alapján. A rangsorolást követően csökkenő sorrendbe teszik az elemeket, majd a legmagasabtból indulva elhagyják azokat.

Eredményként kijött, hogy a magas-rendű hálózatok sokkal sebezhetőbbek, mint az alacson-rendű hálózatok a támadásokkal szemben, ez azt is jelenti, hogy törekedni kell a

magas-rendű hálózatok robosztusságának javítására. Ebből látható, hogy szükséges elvégezni egy ilyen vizsgálatot a közlekedési hálózatra, akár fejlesztés, akár véletlenszerű események bekövetkezése előtt, annak érdekében, hogy tisztában legyünk a hálózat kritikus elemeivel.

A nemzetközi irodalomban mások is a szakaszok robosztussági indexe alapján próbálták megközelíteni a problémát és az alapján meghatározni a hálózatok kritikus elemeit. [7]

Egy másik tanulmány szerint nem elegendő csak a szakaszok és csomópontok attribútumait figyelembe venni, mivel ez könnyen hibás eredményt adhat a vizsgálat során. [8] Kutatásukban a szakaszok egyéb tulajdonságait (pl.: görbületi ív) vizsgálták, mivel ez is fontos lehet bizonyos lezárások során. Ezt azonban egy makroszkópikus modellben több ezer szakaszra nem célszerű meghatározni, az ő kutatásuk is mezoszkópikus szinten történt.

Létezik egy PTV Visum hasonló modellező szoftver, aminek SUMO (Simulation of Urban Mobility). Ez egy ingyenes és nyílt forráskódú közlekedési szimulációs csomag. A 2001 óta elérhető program lehetővé teszi az intermodális közlekedési rendszerek modellezését - beleértve a közúti járműveket, a tömegközlekedést és a gyalogosokat. A SUMO számos támogató eszközt tartalmaz, amelyek automatizálják a forgalmi szimulációk létrehozásának, végrehajtásának és értékelésének alapvető feladatait, mint például a hálózatimport, útvonalszámítások, vizualizáció és kibocsátásszámítás. A SUMO egyéni modellekkel bővíthető, és különböző API-kat biztosít a szimuláció távoli vezérléséhez.

Ezt a szoftvert is felhasználva megvizsgálták, hogy az egyes elemeket milyen tulajdonságok, attribútumok alapján lehet rangsorolni érzékenység szempontjából. [9] Rangsorolási attribútumként említették a csomópontokon keresztülmenő legrövidebb útvonalak számát.

3. Előzetes szűrés leírása

Az alábbi fejezetben bemutatom a különböző lehetőségeket, amelyekben más-más paramétereket figyelembe véve meghatározom a legkritikusabb hálózati elemeket. Ezeket felhasználva mindegyik lehetőséggel kiválasztom a legérzékenyebb szakaszokat, majd azok kapacitását lecsökkentve összevetem a hálózaton megjelenő időveszteségeket az alap esethez képest.

Erre az előzetes szűrésre azért van szükség, hogy a szakirodalomban talált paraméterek közül kiválasszam azt a módszert, vagy azoknak a módszereknek a kombinációit, amellyel valóban a legnagyobb veszteséget okozó szakasz lezárásokat tudom megtalálni, így reprezentatív eredményt bemutatva az alkalmazás tesztelésekor.

3.1 *Manuális kiválasztás*

Az egyik módszer lehetne a manuális kiválasztás és a verziók manuális kiértékelése, azonban ennek rengeteg hátránya van. Többek között roppant időigényes, nagy energiát kellene ráfordítani a szakaszok kapacitásának lezárására, a modellek újrafuttatására.

Ennek egy továbbgondolt megoldása lehet a manuális kiválasztás automatikus adatkiszedéssel. Előnye lehet ennek a megoldásnak is, hiszen tudjuk tesztelni, hogy bizonyos, általunk kritikusnak vélt szakaszok kiválasztásával és tulajdonságait változtatásával milyen hatásokat érünk el a hálózaton.

Előnyök:

- Pontosan tudjuk, hogy melyik szakaszok kerülnek lezárásra.

Hátrányok:

- Időigényes a szakaszok átnézése.
- Emberi figyelmetlenség, szakaszok figyelmen kívül hagyása.
- Nem biztos, hogy a legkritikusabb elemet találjuk meg.
- Rossz választás esetén többször kell végrehajtani az elmezt.
- Valamilyen logika mentén kell itt is kiválasztanunk a szakaszokat (program is végezhetné)

Ezzel a módszerrel nem végzünk elemzést a hálózaton, csak az általunk tesztelni kívánt szakaszokat tudjuk megadni. A kritikus elemek meghatározására nem alkalmas ez a módszer, ezért ez az előzetes szűrésnél nem kerül be a vizsgálandó módszerek közé.

Ennek ellenére a manuális kiválasztást pluszban beépítem a programkódba, ezzel a saját verziók tesztelését lehetővé téve.

3.2 Forgalomnagyság

A forgalmi modellekben a szakaszokhoz tartozó forgalomnagyság alapján is fel lehet állítani egy sorrendet, ami alapján a legforgalmasabb útszakaszokat kiválasztva és azokat lezárva megvizsgálhatjuk a hálózaton keletkezett idővesztést.

Ezzel a paraméterrel kapcsolatban több hátrány is felmerül, ezt összegzi a következő felsorolás.

Hátrányok:

- Nem indokolható, hogy a legnagyobb forgalmú utak a legérzékenyebbek.
- A hálózaton nagy valószínűséggel egymás utáni szakaszokat ad ez a vizsgálat.

A feldolgozott szakirodalomban ez a paraméter önmagában nem szerepelt, azonban az előzetes szűrésben ezt is külön megvizsgálom a többi lehetőséggel együtt. Ennek oka lehet a fenti felsorolásban említett egyik érv, miszerint a vizsgálat nagy valószínűséggel a rangsorolást követően egymás utáni szakaszokat fog kiadni.

Abban azonban biztosak lehetünk, hogy egy hálózat kritikus és érzékeny pontjai, szakaszai a hálózaton belül bárhol, egymástól távol is elhelyezkedhetnek.

3.3 Kapacitás kihasználtság

A következő lehetőség a kapacitás kihasználás alapján rangsorolja a szakaszokat. Ebben az esetben összevetem, hogy a megengedett maximális forgalomnagyság mellett hányan használják az adott útszakaszt. A paraméterben megjelenik a forgalomnagyság is, azonban egy másik tényezővel tekintve már más eredményt fog adni a vizsgálat.

Előnyök:

- Forgalomnagyság egy másik paraméter figyelembevételével
- Műveletek elvégzését a program kezeli.

Hátrányok:

- Nem biztos, hogy így kapjuk a legjobb megoldást.
- Könnyen adhat nagyon kis kapacitású és forgalmú szakaszokat eredményül.

Amennyiben a kapacitáskihasználás közelíti a maximális áteresztőképességet, a vizsgált szakasz az útvonalak szempontjából már így is egy szűk keresztmetszet lehet.

Ezzel a módszerrel meghatározzuk a sorrendet a szakaszok között, azonban a számok alapján a kiválasztást is végre kell hajtani. A kiválasztás statisztikai Outlier elemzéssel kelrül meghatározásra.

3.4 Szakaszt határoló csomópontok fokszáma

A feldolgozott cikkekben is szerepelt, mint fontos paraméter, a csomópontok fokszáma, amely mutatja, hogy egy csomópont hány szakaszt köt össze. Minél több szakaszt köt össze, annál nagyobb veszteséget okozhat annak a csomópontnak a hálózathoz való eltávolítása.

Ezt az információt felhasználva az előzetes szűréshez, dolgozatomban összesítve vizsgálom meg a szakaszt határoló csomópontok foksámát. Összeadásra kerül a kezdő és végpont fokszáma, így adódik ki a végleges foksám.

Mivel a szakaszok irányítottan szerepelnek a modellben, ezért nem fog elkülönülni a két irány a vizsgálat során. Ezzel ellentétben adódhat más eredmény a két irány lezárásakor, mivel nem biztos, hogy ugyanakkora a forgalom mindkét irányban és ugyanúgy befolyásolja az arra közlekedőket a lezárás.

Hátrányok:

- Feltehetően sok azonos eredmény
- Egy útszakasz mindkét iránya sok esetben szerepelni fog a kiválasztásban.
(Kivéve egyirányú utaknál)

3.5 Szakaszokon keresztülmenő útvonalak száma

A forgalmi modellekben minden ráterhelés, egyéni közlekedésnél és tömegközlekedésnél is, útvonal alapján történik. Ez azt jelenti, hogy a vizsgált forgalmi hálózat zónákra van osztva, és az egyes relációk között meghatározott forgalom a két zóna közötti útvonalra terhelődik rá.

Ez a forgalom lehet csak egy útvonalra van ráterhelve, azonban lehet, hogy több útvonalra van szétosztva. Ennek érdekében a hálózatnak átjárhatónak kell lennie, hogy mindenholnan mindenholva találjon útvonalat a modell, ellenkező esetben a ráterhelési eljárás nem fut le.

A zónák közötti útvonalakat ki lehet listázni, ebben a listában szerepelnek az egyes útvonalaknak a szakaszai, a szakaszok sorszáma, aszerint, hogy hányadik eleme az útvonalnak. Továbbá itt megjelenik, hogy két zóna között hány útvonalra terhelt

forgalmat az eljárás. Ezek az útvonalak a modellben „Path”-ként szerepelnek, a korábban említett lista értékek láthatóak az alábbi ábrán (1. ábra).

Relációk szűrése (minden reláció)

Ráterhelt járműréteg

OrigZoneNo **DestZoneNo** **PathIndex** **Index** **LinkNo** **FromNodeNo** **ToNodeNo** **Link(Num Lanes)** **Link(CapPrT)** **Link(VolVehPrT(AP))**

Kiinduló zóna **Cél zóna**

Path sorszáma

Linkek sorszáma Path-on belül

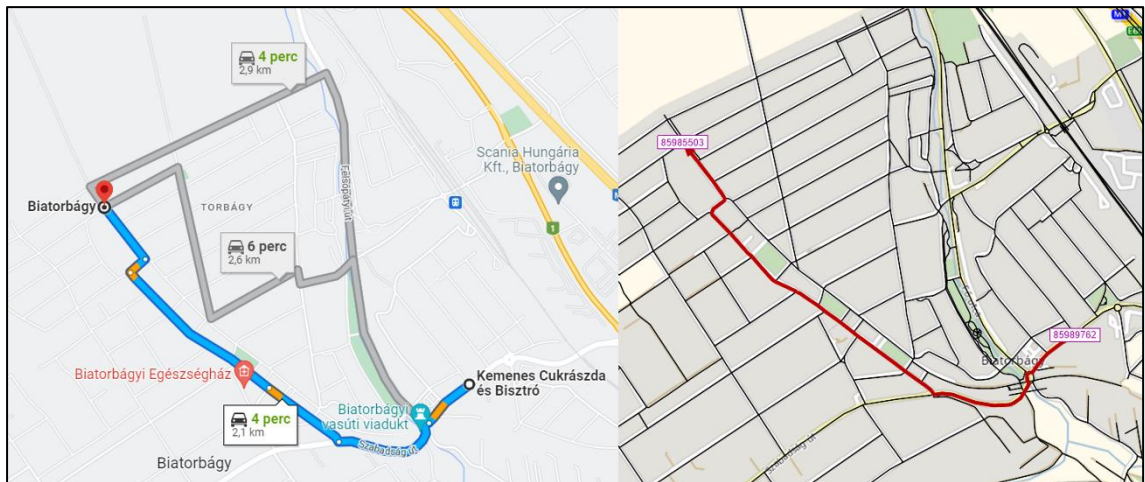
Number	OrigZoneNo	DestZoneNo	PathIndex	Index	LinkNo	FromNodeNo	ToNodeNo	Link(Num Lanes)	Link(CapPrT)	Link(VolVehPrT(AP))
1	1	2	1	1	1611243089	85986352	85989765	1	300	87
2	1	2	1	2	1611243090	85989765	85986353	1	300	87
3	1	2	1	3	1611247322	85986353	85986305	1	1200	154
4	1	2	1	4	1611247320	85986305	85987746	1	1200	140
5	1	2	1	5	1611247316	85987746	85985623	1	1200	140
6	1	2	1	6	1611247312	85985623	85985450	1	1400	438
7	1	2	1	7	1611247312	85985450	94	1	1400	438
8	1	2	1	8	1611247318	94	85989563	1	1200	353
9	1	2	1	9	1611247328	85989563	85986035	1	1200	393
10	1	2	1	10	1611247330	85986035	85986362	1	1200	393
11	1	2	1	11	1611243095	85986362	85986361	1	300	46
12	1	2	1	12						
13	1	2	1	13						
14	1	2	1	14	1611243089	85986352	85989765	1	300	87
15	1	2	1	15	1611243090	85989765	85986353	1	300	87
16	1	2	1	16	1611247322	85986353	85986305	1	1200	154
17	1	2	1	17	1611247320	85986305	85987746	1	1200	140
18	1	2	1	18	1611247316	85987746	85985623	1	1200	140
19	1	2	1	19	1611242247	85985623	85985450	1	1400	654
20	1	2	1	20	1611247312	85985450	94	1	1400	438

1. ábra:

Relációk közötti útvonalak kilistázása

A zónák közötti útvonalakra terhelt forgalom alapján adódnak ki a szakaszokon jelen lévő forgalom nagyság értékek. Továbbá ezen értékek alapján számíthatódnak ki a modellben lévő távolság, idő és ellenállás skim mátrixok. Ezek a mátrixok tartalmazzák az egyes relációk közötti távolság és idő értékeket, továbbá az ezekből és más paraméterekből számolt ellenállásérték..

Lehetőség van ezenfelül két pont, vagy pontlánc közötti legrövidebb útvonal keresésére is a modellben, ellenállás, távolság vagy idő alapján. Ezt a projekteknel validálásra is használjuk, megnézzük, hogy az útvonalkereső alkalmazásokkal összevetve ugyanazt az eredményt adják-e. Ezt mutatja be példának a következő ábra (2. ábra).



2. ábra:

Pontok közötti legrövidebb útvonal, PTV Visum szoftverben és Útvonaltervező alkalmazásban

Látható, hogy a modell és az internetes útvonaltervező is ugyanazt az eredményt szolgáltatva, ilyen keresésekkel tudunk meggyőződni arról, hogy a modellben lévő zónák közötti útvonalkeresés jól működik.

Az útvonal listából ki lehet szűrni, hogy egy-egy szakasz hányszor szerepelt, így ez alapján is meg tudunk határozni egy rangsort a szakaszok között. Ez a módszer szerepelt több nemzetközi irodalomban is, mint befolyásoló tényező.

3.6 Szakaszokon keresztülmenő útvonalak száma, kapacitás kihasználtság

Az előző pontban ismertetett módszert továbbgondolva a következő szűrés beleveszi a keresztülmenő útvonalak mellé a kapacitás kihasználtságot is. Ennek oka, hogy ezen a módon egy pontozási rendszert figyelembe véve kiszűrésre kerülhetnek a még kritikusabb elemek is a hálózaton belül.

A pontozási rendszerben sorrendet állítok a szakaszokon keresztülmenő útvonalak száma alapján, így kiválasztásra kerül az első 100 legnagyobb értékkel rendelkező szakasz. Szintén ilyen módon sorrendet állítok a kapacitás kihasználtság alapján, majd meghatározom az első 100 legjobban telített hálózati elemet.

A pontszám értéke az [1] egyenletben látható részletezve, a szempontok alapján legnagyobb értékekkel rendelkező szakaszokt kapják a legnagyobb pontokat 1-100-ig. A két sorrend és pontszám megállapítása után ezek a pontszámok összegződnek, így kiadva a végleges pontértéket.

$$(1) \quad link_{rang} = link\ occurrence_{rang} + link\ capacity\ utilisation_{rang}$$

$link_{rang}$: szakasz végső sorszáma a kersztülmenő útvonalak száma és a kapacitáskihasználás alapján [-]

$link\ occurrence_{rang}$: szakasz sorszáma a keresztülmenő útvonalak száma alapján [-]

$link\ capacity\ utilisation_{rang}$: szakasz sorszáma a kapacitáskihasználtság alapján [-]

A végső pontértékek alapján újabb sorrendet állítok, majd az 5 legnagyobb pontszámmal bíró szakasz kapacitását egyesével lecsökkentem és újrafuttatom a modellt. A kiválasztást, rangsorolást és ez alapján a modellben végzett változtatásokat, ráterhelési eljárásokat a program futtatja a vizsgálat során.

4. Előzetes szűrés eredménye

Az előző fejezetben leírt paraméterek figyelembevételével és a verziók újboli ráterhelésével kapott eredmények ebben a fejezetben kerülnek részletes bemutatásra.

4.1 Verziók futtatása

A különböző paraméterek alapján a legkritikusabb 5 szakasz kerül kiválasztásra, majd ezek kapacitását a program lecsökkenti az eredeti század részére. Ennek oka, hogy balesetek bekövetkezésekor a jelen lévő autók a legtöbb esetben nem tudják elhagyni a helyszínt, kénytelenek megvárni amíg rendeződik a helyzet. Ennek a valóságszerű modellezésére szolgál az a megoldás, hogy nem csökkenti le a programkód nullára a kiválasztott szakasz kapacitását.

A másik indok, amiért ezt a megoldást választottam, hogy a PTV Visum szoftver nem alkalmas a jelenleg felhasználható ráterhelési eljárásaival az ilyen hazard helyzetek kezelésére. Abban az esetben, ha teljesen lezárásra kerül a szakasz, a különböző zónákból induló járművek úgy viselkednek a modellben, hogy már az elindulás pillanatában tisztában vannak ezzel az információval. Ez sem tükrözi a valóságot, mert az információ csak az idő előrehaladtával tud eljutni az érintettekhez.

Így a választott megoldás, hogy a szakaszok kapacitása az eredeti századára van lecsökkentve. Tökéletes megoldást ez sem jelent, mert így az ezen keresztülmenők akadálytalanul, sebesség csökkentés nélkül tudják igénybe venni az adott hálózati elemet.

A következőkben leírásra kerülnek a különböző paraméterek alapján módosított és ráterhelt hálózatokból kinyert eredmények és az azokkal kapcsolatos tapasztalatok. A kapott verziók a hálózati elemeken lévő forgalomnagyságból és azokhoz tartozó utazási idő szorzatából számolt járműóra alapján kerülnek összehasonlításra.

Az előzetes szűréshez szükséges futtatásokat a Biatorbágyi modellen végeztem, a verziókhoz és eredményekhez tartozó képek is ebből lesznek feltüntetve.

Forgalomnagyság:

Az első változatokban a rangsorolás forgalomnagyság alapján történik. A felállított sorrendben az előzetes szűrés során az 5 legforgalmasabb elemet választja ki a program. Ennek lefuttatásakor valóban feljön az a probléma, hogy az egymás után lévő szakaszokat adja ki ez a módszer. Erről látható példaként a következő ábra (3. ábra).



3. ábra:
Forgalomnagyság alapján kiválasztott és lecsökkentett kapacitású szakaszok –
szűrés előtt

Látható, hogy 2-2 szakasz a kiválasztottak közül egymás után van, és ezek is ugyanazon rész ellentétes irányai. Ennek a módszernek ez a hátránya, hogy jellemzően egy területről ad szakaszokat és azok is egymás utániak. Így nem csak a kiválasztás lesz rossz, de a kapott adatok is közel azonos eredményt adnak. A döntéstámogató alkalmazás által szolgáltatott kimutatások és diagram is megegyeznének minden verzióban.

Kapacitás kihasználtság:

Ez a paraméter nem szerepelt külön a szakirodalomban felhasznált paraméterek között, az előzetes szűrés alapján nem is adott kielégítő eredményt az ez alapján kiválasztott legkritikusabb szakasz.

A kiválasztás során ugyanaz a hiba lépett fel, mint az előző esetben, a kiválasztott szakaszok a következő ábrán láthatóak (4. ábra).



4. ábra:

Kapacitás kihasználtság alapján kiválasztott és lecsökkentett kapacitású szakaszok

Ennek oka, hogy a szakaszok több helyen vannak megtörve, nem csak ott, ahol egy-egy tulajdonságuk változik. Így nem csak a forgalomnagyság lehet egyenlő az egymást követő hálózati elemeken, hanem a kapacitás is. Emiatt ezzel a módszerrel is az előzőhöz hasonló probléma lép fel, ez sem megfelelő megoldás a teszteléshez.

Csomópontok fokszáma:

A módszer miatt összegeztem a szakaszokhoz tartozó foksámokat, hogy megnézzem érdemes-e tovább folytatni a vizsgálódást ezzel a megközelítéssel. A szakaszok által felvett értékek 2-10-ig terjednek, a legtöbb szakaszhoz tartozó foksám összeg 4, 5 vagy 6, ez az alábbi ábrán is (5. ábra). Megfigyelhető, hogy kimagaslóan nagy foksámú csomópontokkal határolt szakaszokból alig van néhány a hálózaton.

Szakaszokat határoló csomópontok foksámának összege	Előfordulás a hálózaton belül
2	110
3	154
4	1148
5	1238
6	2098
7	598
8	136
9	42
10	10

5. ábra:

Szakaszok osztályozása a határoló csomópontok fokszáma alapján – Szűrés előtt

Az ábrán látható táblázat az összes szakaszt tartalmazza, azonban nem mindegyik irányított szakaszon van forgalom. Emiatt kell egy további szűrőt figyelembe venni, ami megvizsgálja, hogy van-e forgalom az adott szakaszon. A szűrt értékeket tartalmazó javított ábra alább látható (6. ábra).

Szakaszokat határoló csomópontok foksámának összege	Előfordulás a hálózaton belül
3	6
4	226
5	445
6	687
7	217
8	69
9	16
10	1

6. ábra:

Szakaszok osztályozása a határoló csomópontok fokszáma alapján - Szűrés után

Látható, hogy jelentősen lecsökkent a vizsgálható szakaszoknak a száma. A ransorolás után itt is szintén az első 5 került kiválasztásra, amelyből megjelent azonos szakasznak is a két ellentétes iránya az azonos határoló csomópontok miatt. Az így kiválasztott szakaszok a következő ábrán láthatóak (7. ábra).



7. ábra:

Határoló csomópontok fokszáma alapján kiválasztott és lecsökkentett kapacitású szakaszok

Szakaszon keresztülmenő útvonalak száma:

Ezt a paraméteret több helyen is említették, mint fontos befolyásoló tényező, ezért az egyik változatban én is ez alapján végeztem a kiválasztást. A módszerrel kapott első 5 legkritikusabb szakasz az alábbi ábrán látható (8. ábra).



8. ábra:

Keresztülmenő útvonalak száma alapján kiválasztott és lecsökkentett kapacitású szakaszok

Látható, hogy a Biatorbágyra vezető körforgalom ága és a Biatorbágyon belüli körforgalom mindegyik szakasza adódott ki eredményül.

Szakaszon keresztülmenő útvonalak száma, kapacitás kihasználtság:

Az előzőhöz hasonlóan az egyik figyelembe vett paraméter a szakaszon keresztülmenő útvonalak száma, a másik a kapacitás kihasználtság. A kettőből képzett randsorolás az előző fejezetben leírtak alapján történik. A Biatorbágyi modellben így adódott szakaszok a következő ábrán vannak megjelítve (9. ábra).



9. ábra:

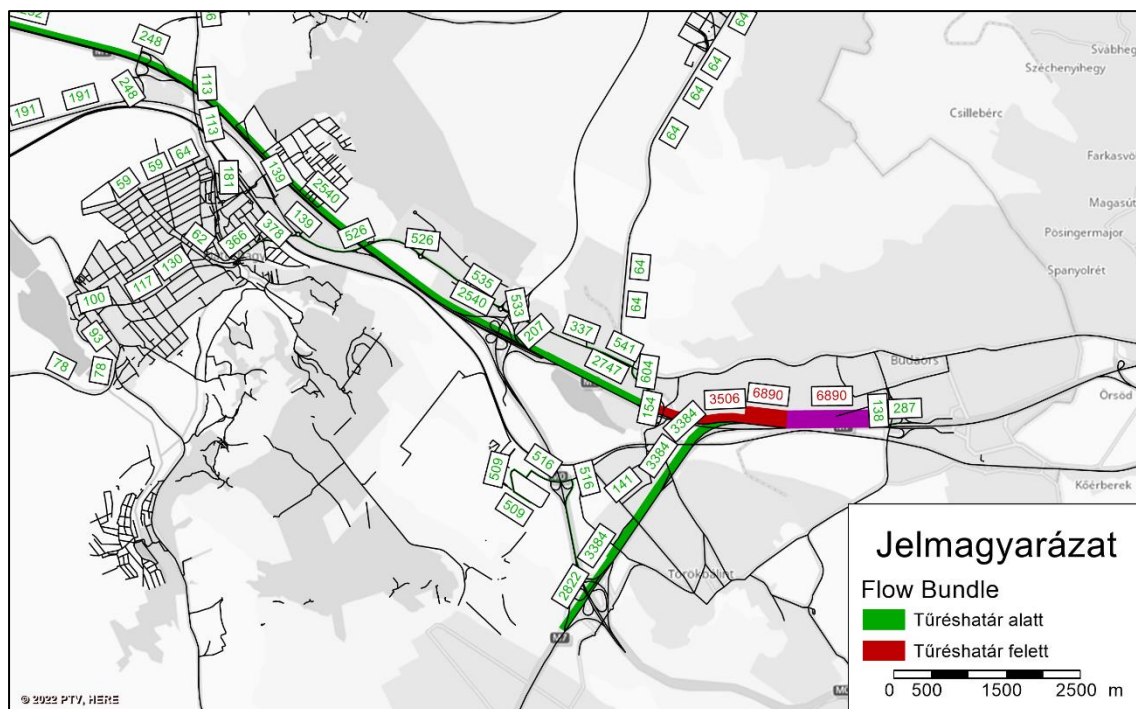
Keresztülmenő útvonalak száma és kapacitás kihasználtság alapján kiválasztott és lecsökkentett kapacitású szakaszok

A képen látható, hogy a kiválasztott szakaszokból ennél a megoldásnál már egyik sincs Biatorbágy területén, mindegyik a bevezető útról van kiválasztva.

4.2 Forgalomnagyság alapján történő kiválasztás módosítása

A forgalomnagyság alapján történő rangsorolást szükséges volt továbbgondolni, mivel az 5 módszer közül az egyik legnagyobb veszteséget ezzel a kiválasztással lehetett elérni.

A kiválasztás első része a korábbival megegyezik, az első elem a forgalomnagyság alapján létrehozott rangsor alapján van meghatározva. A kiválasztás után erre a szakaszra a program készít a „Flow Bundle-t”, amely megmondja, hogy a szakaszon keresztül mennyi forgalom honnan jön és merre megy. Ebből kiindulva a forgalomnagyság alapján meghatározott rangsorból kizárásra kerülnek azok a szakaszok, amelyeken a Flow Bundle maximális forgalmának minimum fele keresztül megy. Így tudjuk elkerülni, hogy az egymás utáni szakaszokat adja ki az elemzés. A Flow Bundle alapú szűrést szemlélteti az alábbi ábra (10. ábra).



10. ábra:
Flow Bundle alapján történő szűrés

Az ábrán látható a legforgalmasabb szakasz lilával jelölve, továbbá az erre a szakaszra készített Flow Bundle értékei a hálózat elemein. Pirossal vannak jelölve azok, amelyek kizárásra kerülnének a rangsorolásból, zölddel vannak jelölve a tűrőhatár alatti szakaszok.

Ezt a műveletet egymás után négyszer elvégezve kiválasztható az 5 legkritikusabb szakasz, amelyeket külön-külön lezárva megvizsgálható az újboli ráterhelés eredménye. Az így meghatározott 5 szakasz a következő ábrán látható (11. ábra).



11. ábra:

Forgalomnagyság alapján kiválasztott és lecsökkentett kapacitású szakaszok –
szűrés után

Az előzőtől eltérően látható, hogy a közlekedési hálózat különböző részeiről választ a program szakaszokat.

4.3 Előzetes szűrés eredményei

Az előzetesen kiválasztott módszerekkel kapott eredményeket járműóra és járműkm veszteség alapján hasonlítottam össze, majd ez alapján kiválasztottam azt a módszert, amellyel a legrelevánsabban határozhatóak meg a kimagaslóan kritikus elemek.

A dolgozatom témája és célja nem ezeknek a paramétereknek a pontos meghatározása volt, hogy melyik szempontot milyen súlyozással kell figyelembe venni. Ez a szűrés azt a célt szolgálta, hogy az alkalmazás létrehozása után a tesztelés értelmezhető és elemezhető eredményeket adjon. A további fejlesztések folyamán lehetőség van ennek a módszernek a javítására, pontosítására, azonban egy másik projekt keretein belül.

A járműóra szakaszokra és kanyarokra számítható ki, ezeket részletezi a (2), (3) és (4) egyenlet.

$$(2) \quad \text{járműóra}_{link} = \text{forgalomnagyság}_{link} \cdot \text{utazási idő}_{link}$$

Ahol,

$járműóra_{link}$: adott szakaszra meghatározott teljes utazási idő [járműóra]

$forgalomnagyság_{link}$: adott szakaszon keresztülmenő forgalom nagysága [jármű]

$utazási\ idő_{link}$: adott szakaszhoz tartozó utazási idő [óra]

$$(3) \quad járműóra_{turn} = forgalomnagyság_{turn} \cdot utazási\ idő_{turn}$$

Ahol,

$járműóra_{turn}$: adott kanyarodó irányra meghatározott teljes utazási idő [járműóra]

$forgalomnagyság_{turn}$: adott kanyarodó irányon keresztülmenő forgalom nagysága [jármű]

$utazási\ idő_{turn}$: adott kanyarodó irányhoz tartozó utazási idő [óra]

Az egész hálózathoz tartozó járműóra érték kiszámításához összegezni kell ezeket a számokat minden hálózati elemre.

$$(4) \quad járműóra = \sum járműóra_{link} + \sum járműóra_{turn}$$

Ahol,

$járműóra$: teljes hálózatra meghatározott utazási idő [járműóra]

A járműkm is hasonló módon számítható, azonban ennek értékét csak a szakaszokra határoztam meg, a kanyarodások hosszától az elemzésben eltekintettem. A szakaszokra történő számítást az (5)-ös egyenlet részletezi.

$$(5) \quad járműkm_{link} = forgalomnagyság_{link} \cdot hossz_{link}$$

Ahol,

$járműkm_{link}$: adott szakaszra meghatározott futásteljesítmény [járműkm]

$forgalomnagyság_{link}$: adott szakaszon keresztülmenő forgalom nagysága [jármű]

$hossz_{link}$: adott szakasz hossza [km]

Az egész hálózathoz tartozó járműkm érték kiszámításához összegezni kell ezeket a számokat minden szakaszra, ezt írja le a (6)-os egyenlet.

$$(6) \quad járműkm = \sum járműkm_{link}$$

Ahol,

járműkm: teljes hálózatra meghatározott futásteljesítmény [*járműkm*]

Kezdetben mindegyik módszernél az első 5 legkritikusabb elemet választotta ki a program és csökkentette azok kapacitását. A verziókból kapott és az alap hálózathoz hasonlított *járműkm* különbség értékeket az alábbi táblázat foglalja össze (1. táblázat).

1. táblázat:

Járműkm adatok különbségei az egyes verziókból és az alap modellből számolva

Különbség Alap hálózathoz képest [<i>járműkm</i>]	1. Verzió	2. Verzió	3. Verzió	4. Verzió	5. Verzió
<i>Forgalomnagyság</i>	821	1255	1335	1842	1961
<i>Kapacitás kihasználás</i>	69	828	751	781	2214
<i>Szakaszt határoló csomópontok fokszáma</i>	7	20	-57	-190	-204
<i>Keresztülmenő útvonalak száma</i>	28	92	88	102	119
<i>Keresztülmenő útvonalak száma, Kapacitás kihasználás</i>	271	338	501	1545	1618

Látható, hogy 5-ből 4 esetben a legtöbb veszteség a forgalomnagyság alapján kiválasztott szakaszok kapacitásának csökkentésével kapható. Az utolsó verziónál a legtöbb veszteség a kapacitás kihasználtság alapján történő kiválasztással adódott. Magas eredmények a keresztülmenő útvonalak száma és a kapacitáskihasználtság figyelembevételével jöttek ki.

A verziókból kapott és az alap hálózathoz hasonlított *járműóra* különbség értékeket az következő táblázat foglalja össze (2. táblázat).

2. táblázat:

Járműóra adatok különbségei az egyes verziókból és az alap modellből számolva

Különbség Alap hálózathoz képest [járműóra]	1. Verzió	2. Verzió	3. Verzió	4. Verzió	5. Verzió
<i>Forgalomnagyság</i>	867	1127	1575	1773	2024
<i>Kapacitás kihasználás</i>	43	45	310	332	828
<i>Szakaszt határoló csomópontok fokszáma</i>	4	6	43	54	53
<i>Keresztülmenő útvonalak száma</i>	23	39	45	49	51
<i>Keresztülmenő útvonalak száma, Kapacitás kihasználás</i>	57	68	112	147	191

Az eredményekből látható, hogy a legtöbb idővesztést magasan a legnagyobb forgalmú szakaszok kapacitásának csökkentésével lehet elérni az előzetes szűrésekben résztvevő módszerek közül.

Mivel mindkét mérőszám meghatározásakor a forgalomnagyság alapján történő kiválasztás bizonyult a legtöbbször jónak, ezért a döntéstámogató alkalmazás fejlesztéséhez és teszteléséhez ezt a paramétert fogom alapul venni.

5. Értékelési kritériumok

Az alábbi fejezetben részletezésre kerülnek az értékelési szempontrendszer elemei, továbbá ezeknek a leírása, hogy melyiket milyen céllal vettem bele a verziók elemzésébe. Az értékelés több részből áll, ezeket egymástól függetlenül ismertetem és vizsgálom a modelleken.

5.1 Szempontrendszer

Ahhoz, hogy megfelelően tudjunk értékelni egy módosított verziót, azt több szempontból is meg kell vizsgálni. Az előzetes szűrésnél csak két tényezőt hasonlítottam össze a releváns módszer kiválasztásának érdekében, azonban ennél több megközelítésre van szükség.

5.1.1 Futásteljesítmény, időveszteség

Az előzetes szűrésnél is ez a két szempont volt meghatározó, ez alapján választottam ki a tesztelés módszerét.

Mind a futásteljesítmény, mind az időveszteség fontos, mivel ezekből kifejezhető monetarizált értékekkel több veszteség is. Társadalmi, környezeti hatások pénzbeli értéke is kifejezhető ezek segítségével, amelyeket a következő alfejezben egyesével részletezek.

5.1.2 Kritikus objektum megközelítése

Az döntéstámogató alkalmazás egyik összehasonlító tényezője, a kritikus objektumok megközelíthetősége. Kritikus objektumok alatt kórházakat, iskolákat, különböző fontos szerepet betöltő objektumokat értek.

Ezeknek modellezése fontos lehet egy-egy közúti beavatkozásnál, fejlesztésnél vagy valamilyen rendezvény miatti lezárásoknál. A lezárások, akadályok következtében felléphet bizonyos mértékű időveszteség, azonban a verziók medellezésével kiválasztható az optimális megoldás a legkevesebb időveszteséggel.

Ennek mérésére szükség van előzetesen meghatározni a kritikus zónákat a modellben, amelyek tartalmaznak legalább egyet a korábban említett létesítményekből. Az ezekből való eljutási idő, illetve az ezekbe való eljutási idő mértékét skim mátrixok tartalmazzák. A ráterhelés elején meghatározott zónákra való szűrésnél ezeket az utazási idő értékeket kapjuk vissza.

A skim mátrix értékei két zóna közötti utazási időt tartalmaznak, melynek számítási módját a (7)-es egyenlet részletezi.

$$(7) \quad \text{utazási idő}_{ij} = \frac{\sum_1^n \text{utazási idő}_{path\ n} \cdot \text{forgalomnagyság}_n}{\text{forgalomnagyság}_{ij}}$$

Ahol,

utazási idő_{ij}: „i” és „j” zóna közötti súlyozott utazási idő [min]

utazási idő_{path n}: „n”-edik útvonal utazási ideje

forgalomnagyság_n: „n”-edik útvonalhoz tartozó forgalom nagysága

forgalomnagyság_{ij}: „i” és „j” zóna közötti forgalom nagysága

Két zóna között több útvonalra is terhelhet a modell forgalmat, azonban a skim mátrixban csak egy érték jelenik meg. Ezért a mátrixban lévő utazási idő egy forgalomnagyság által súlyozott értéke az egyes útvonalak utazási idejének.

5.1.3 Eljutási idő romlása

Egy másik fontos szempont az idővesztésből adódik. A skim mátrix és forgalomnagyság értékek alapján kiszámítható, hogy a lakosság hány százalékát érinti bizonyos mértékű idővesztés.

Ez a fajta mutatószám is hasznos lehet a verziók összevetésekor, mivel az idővesztés értéke jobban szét is tud oszlani a lakosság között, de van olyan helyzet, amikor kis százalékot érint viszonylag nagy eljutási idő romlás.

5.2 Közgazdasági elemzés

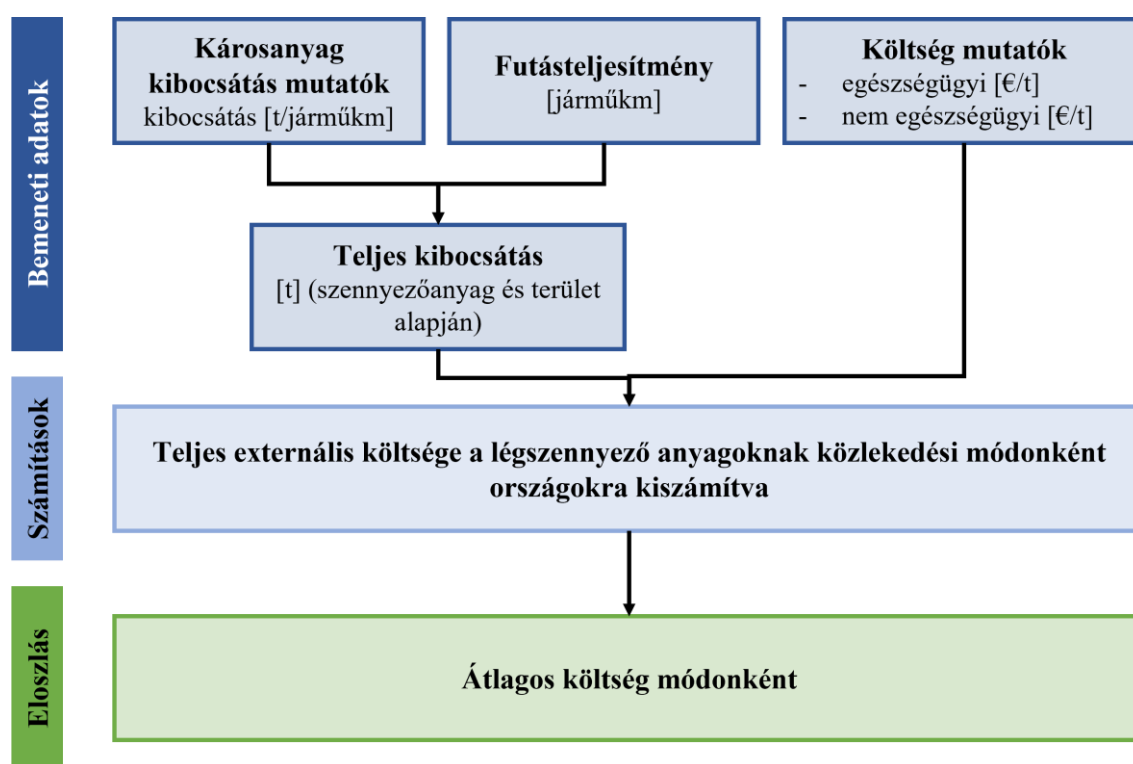
A már korábban említett futásteljesítmény és idővesztés alapján kiszámíthatóak más káros hatásnak is a monetarizált értékei. Ezek meghatározásához az útmutatót használtam, a számításokat ez alapján végeztem. [10]

5.2.1 Légszennyezés

A légszennyező anyagok kibocsátása különböző típusú károkat okozhat. Valószínűleg a legfontosabb és a legjobban elemzettek a légszennyező anyagok által okozott egészségügyi hatások. Azonban más károk is relevánsak, mint például az anyagi károk, terméskiesések és a biológiai sokféleség csökkenése.

A légszennyezés költségei az egyik legtöbbet elemzett externális költség. A kilencvenes évek óta nemzetközi tanulmányokat és kutatási projekteket végeztek ezzel a témával kapcsolatban. Az elmúlt néhány évben nem sok olyan nagy nemzetközi tanulmány jelent meg, amely a teljes hatáspályát lefedné a kibocsátástól a következményekig, továbbá ami a költségeket is magába foglalja. Folytatódtak azonban a további kutatások, amelyek a légszennyező anyagoknak való kitettség és a kapcsolódó egészségügyi kockázatok közötti dózis-válasz összefüggést vizsgálják.

Az ezekből a károsanyagokból való externális költség átszámítását foglalja magába a következő ábra, ami az útmutató alapján készült (12. ábra). Ez az ábra az egészségügyi és a nem egészségügyi hatások költségeinek szaitását tartalmazza.



12. ábra:

Módszertan a légszennyezés teljes és átlagos költségeinek kiszámítására

Az ábrán látható, hogy bemeneti adatnak szükséges meghatározni a futásteljesítményt. Ezt önmagában össze fogja vetni a döntéstámogató alkalmazás és kiszámítja a különböző verziókhoz, azonban ezt felhasználva számítható ki a légszennyezés externális költsége is.

Az útmutató alapján a légszennyezés értéke járműkm-enként személygépjárművekre meghatározva átlagosan (benzin és dízel meghajtásúakra) a következő:

1.14 €/cent/járműkm

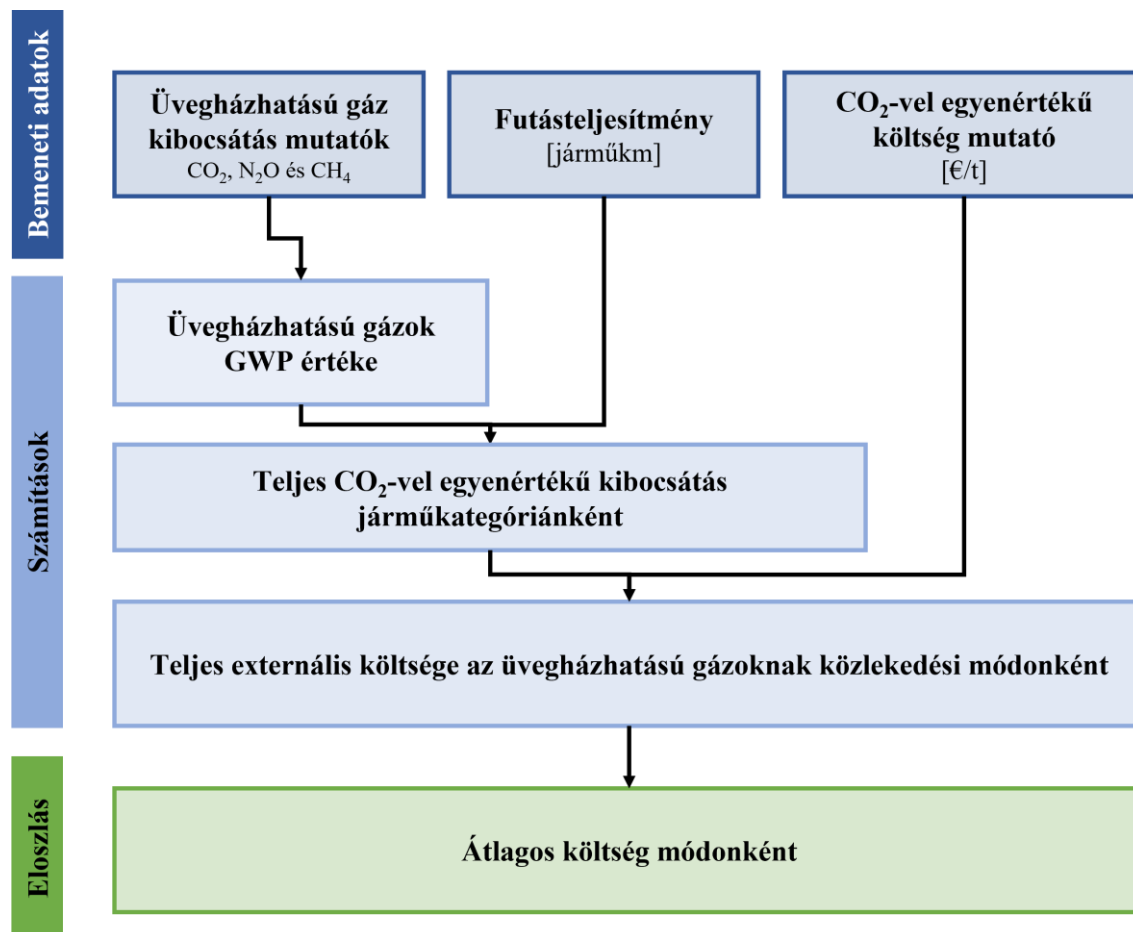
Ezt felhasználva kiszámítható az elemzési időszakra a teljes hálózat légszennyezésének monetarizált költsége. A döntéstámogató alkalmazáshoz készített Power BI fájl is ezt az értéket fogja alapul venni a számításokhoz a már meglévő futásteljesítményből kiindulva.

Az útmutatóban meghatározott érték még tovább bontható részletesebben meghatározott kategóriákra, azonban ezt dolgozatomban nem használtam fel. Ennek oka, hogy a verziók közötti különbségek meghatározásához nagyságrendbeli eltéréseket fogok vizsgálni, a további részletes adatok nagyobb projektek pontos externális költséges meghatározásához szükségesek.

5.2.2 Üvegházhatású gázok

Az üvegházhatású gázok (pl.: CO₂, N₂O és CH₄) nem tartoztak bele a légszennyező anyagok közé. Mivel ezek a gázok szerepet játszanak a globális felmelegedésben és az üvegházhatás kialakulásában, ezért máshogy kell számolni az ezek által okozott károkat.

Az okozott következmények miatt azonban fontos a károk számszerű értékének kifejezése. Az útmutató tartalmazza mind az 5 közlekedési alágazatra az externális költségek kiszámításának leírását.



13. ábra:
Módszertan a légszennyezés teljes és átlagos költségeinek kiszámítására

Az ábrán látható (13. ábra), hogy GWP értékre is szükség van az átlagos költség érték meghatározásához. Ez az érték segít abban, hogy a különböző gázokat közös nevezőre hozzuk, össze tudjuk hasonlítani egymással. A GWP értéke a CO₂-nek 1, ami azt jelenti, hogy ez az etalon, a többi gáz hatását és tulajdonságait ehhez mérten adjuk meg.

Az útmutató alapján az üvegházhatású gázok által okozott károk értéke járműkm-enként személygépjárművekre meghatározva átlagosan (benzin és dízel meghajtásúakra) a következő:

1.90 €/cent/járműkm

A teljes okozott kár externális költségének meghatározásához szintén szükség van a futásteljesítményre.

5.2.3 Zajterhelés

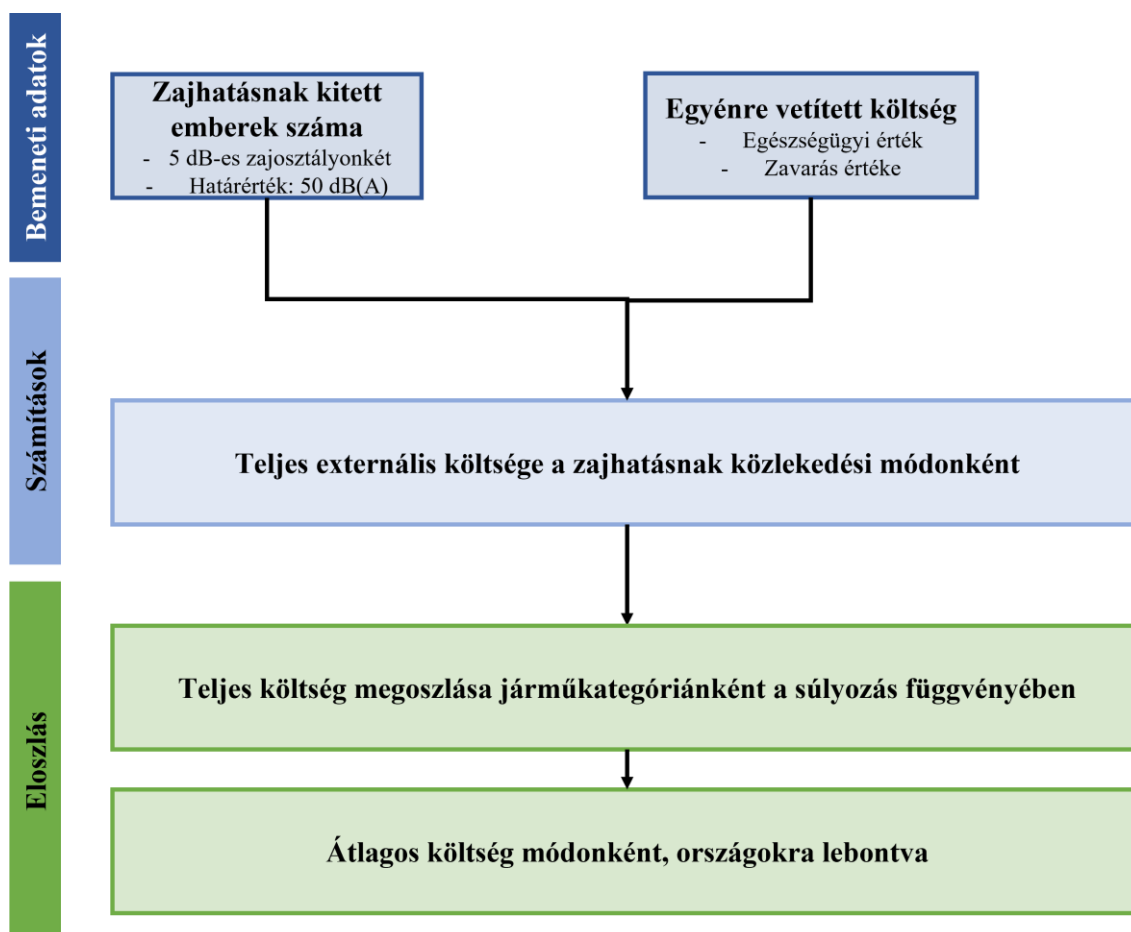
Egy másik negatív tényező, ami alapján a különböző verziókat össze tudjuk hasonlítani, az a zajterhelés változásának értéke. Szintén fontos tényező mivel az

urbanizáció és a forgalomnagyság növekedésével egyre nagyobb problémát jelent a zajszennyezés a lakosság nagy részénél.

Általánosságban zajnak nevezzük a nem kívánt, változó időtartamú, intenzitású vagy más minőségű hanghatásokat, amelyek fizikai vagy pszichológiai károkat okoz az embereknek. A tanulmány vizsgálja a közúti, vasúti és légi közlekedés által okozott zaj káros hatásait. A belvízi és tengeri közlekedés zajterhelését elhanyagolhatónak tekinti, mivel általában nem sűrűn lakott területet érintenek.

A közlekedési zajnak való tartós és gyakori kitettség számos egészségügyi problémához vezethet. Ezek közé tartoznak a következő betegségek:

- Szívbetegség
- Stroke
- Demencia
- Magas vérnyomás
- Zavartság



14. ábra:
Módszertan a zajszennyezés teljes és átlagos költségeinek kiszámítására

Kétféle bementi érték szükséges, amely az ábrán is látható (14. ábra): a zajnak kitett személyek száma minden egyes közlekedési módra, és az egyénre jutó zajköltségek. A zajhatások osztályokba vannak sorolva, pl.: 5dB(A) érték alatti zajszennyezés. Minden egyes zajosztály és közlekedési mód esetében ki kell számítani a zsínsk kitett személyek teljes létszámát. A másik bemeneti érték az egy személyre vetített érték, amelynek két összetevője van:

- Egészségügyi érték
- Zavarás érték

Az útmutató alapján az zajszennyezés által okozott károk értéke járműkm-enként személygépjárművekre meghatározva átlagosan (benzin és dízel meghajtásúakra) a következő:

- **0.90 €-cent/járműkm**

A teljes okozott kár externális költségének meghatározásához szintén szükség van a futásteljesítményre.

6. Python Script bemutatása

A következő fejezet részletezi az alkalmazás logikai kapcsolatait, működését, illetve a kimeneti adatok feldolgozásának leírását. Továbbá bemutatom röviden a programkód működésének környezetét.

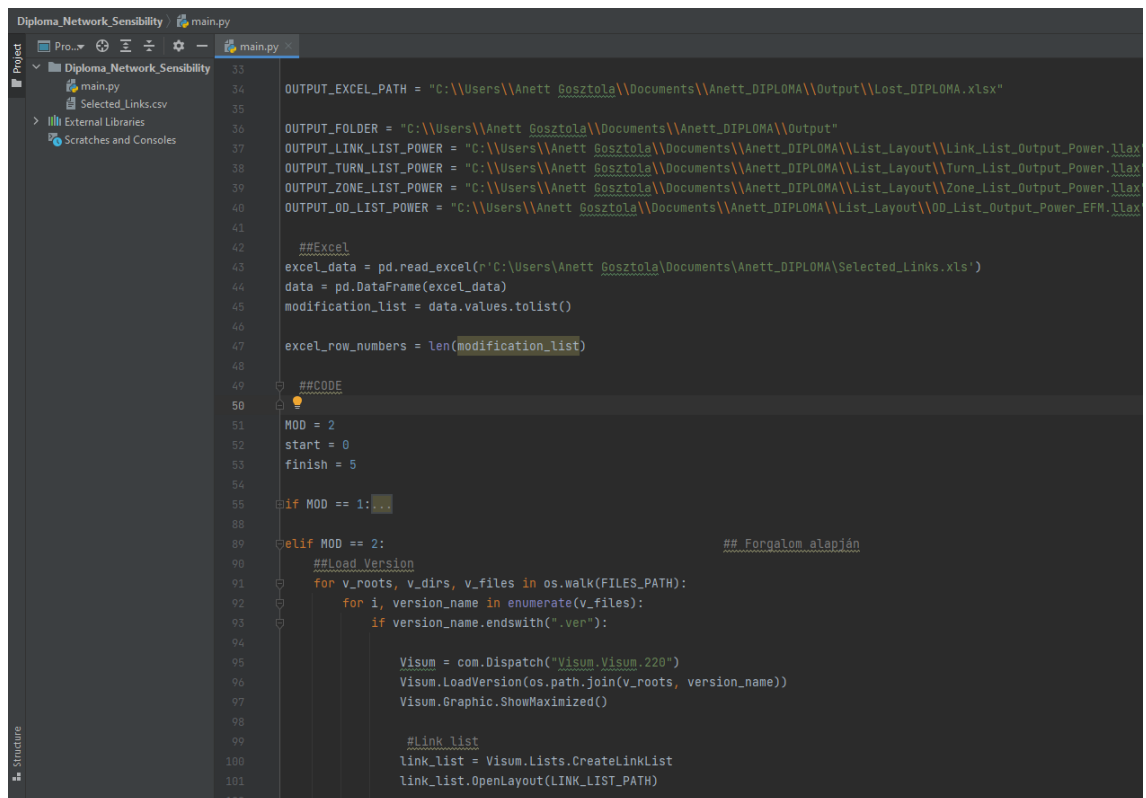
6.1 Python és COM környezet kapcsolata

A COM környezet hozzáférést biztosít más programokban található (esetemben Visumban) adatokhoz és funkciókhoz. A Visum 7.0-s verziójától kezdve a Visumban található adatok és algoritmusok is elérhetőek ezen a környezeten keresztül.

Ez a környezet a Visum telepítésekor automatikusan bekerül a programba, ezáltal egyből használható, a felhasználók bármikor hozzá tudnak férni.

A COM nem függ egy bizonyos programozási nyelvtől, ez azt jelenti, hogy a fejlesztések, programkódok elkészítési nyelve sincs meghatározva. VBA-val és Python-nal is egyaránt működnek a parancsok.

Az én választásom a Python programozási nyelvre esett korábban szerzett tapasztalatok alapján, továbbá ennek vannak meg azok az előnyei, amelyek egy szoftver fejlesztésénél nagyon praktikusak tudnak lenni. Ide tartozik, hogy ehhez a programozási nyelvhez olyan eszköztár tartozik, amely lehetővé teszi az egyszerű grafikus felhasználói felületek létrehozását. Párbeszédpanelek, eredmények vizuális ábrázolása könnyedén megoldható Python-ban. A következő ábrán (15. ábra) látható az általam létrehozott kód egy részlete.



- Bemeneti adatok megadása
- Modell adatainak elemzése
- Hálózati elemek paramétereinek változtatása, verziók futtatása
- Verziókból kinyert eredmények megjelenítése

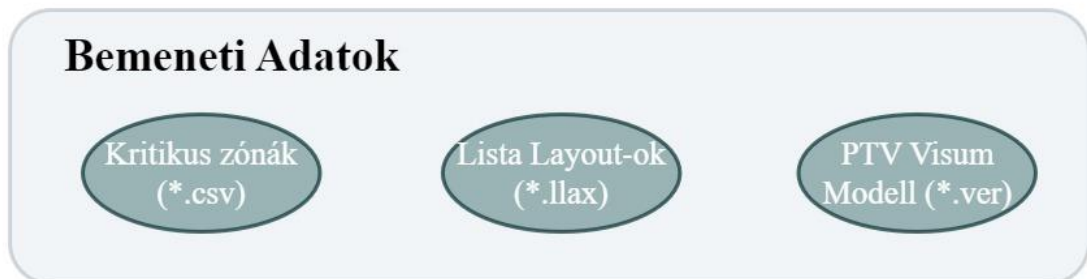
A program minden indításakor végigmegy a felsorolt lépéseken, majd a sikeres lefutást követően kimentti a verziókból nyert értékeket a megfelelő helyre. A végső vizuális megjelenítés egy Power BI fájl segítségével történik.

A Power BI interaktív felületének köszönhetően a programot használók nem csak diagramok sokaságát láthatják eredményként, hanem saját maguk is rá tudnak szűrni az eredményekre.

Bemeneti adatként nincs szükség sok fájl megadására vagy kitöltésére, csak az egyes modellekből adódó különbségeket kell áthidalni. Ezekre részletesen a következő alfejezben térek ki.

6.3 Bemeneti Adatok

A program működésének első lépése a bemeneti adatok megadása, ez a részlet a következő ábrán látható (17. ábra).



17. ábra:

Bementi Adatok - Első rész

A program futtatása előtt meg kell adni az alkalmazás által beolvasott lista layout-okat, amelyek a hálózati elemek attribútumainak elnevezésétől függően változhatnak. A listák megalkotása után ezt egy „List_Layout” mappába szükséges menteni, innen történik a beolvasás.

A szükséges lista layoutok a következők a tartalmazott attribútumokkal együtt:

Szakasz lista – elemzéshez:

- Kezdő pont
- Vég pont
- Szakasz típusa
- Szakasz hossza
- Sávok száma
- Kapacitás
- Szakaszon keresztülmenő forgalom
- Szakaszon megengedett sebesség
- Flow Bundle értéke

Ennek a beolvasása az elemzés során többször megtörténik, első lépésben csak a sorrend felállítása miatt van rá szükség, majd később a szakaszokhoz tartozó Flow Bundle érték is ezzel a listával kapható meg.

Szakasz lista – kimenethez:

- Kezdő pont

- Vég pont
- Szakasz típusa
- Szakasz hossza
- Sávok száma
- Új kapacitás
- Szakaszhoz tartozó utazási idő
- Szakaszhoz tartozó új forgalom nagyság

Ez a bemeneti fájl már a program lefutását követően, a verziókból való eredmények kiszedésekor van beolvasva. A Power BI fájl bemeneti adatainak egyik forrása ezzel a listával kerül kimentésre.

Kanyarodás lista – kimenethez:

- Kanyarodás bemenő iránya
- Csomópont száma
- Kanyarodás kimenő iránya
- Irány típusa (bal, egyenes, jobb)
- Kanyarodáshoz tartozó új forgalom nagyság
- Kanyarodáshoz tartozó utazási idő

A Power BI fájl bemeneti adatainak egyik forrása ezzel a listával kerül kimentésre.

Reláció lista – kimenethez:

- Kiinduló zóna
- Cél zóna
- Forgalm nagyság két zóna között
- Súlyozott átlagos utazási idő
- Súlyozott átlagos utazási sebesség
- Súlyozott átlagos utazási távolság

A verziók kiértékelésekor fontos információ, hogy az egyes zónák között hogy változtak meg az eljutási idő, utazási távolságok. Ezeket az adatokat ebből a kimeneti listából tudjuk kiszűrni.

Zóna lista – kimenethez:

- Zóna szám
- X koordináta
- Y koordináta

Az adatok sokszínű ábrázolásánál lehetőség van a térképen való megjelítéshez, amihez koordinátákra van szükség. A modell fájlokból kimenthető a zónák középpontjának pontos koordinátája, ehhez szükség van a megfelelő koordinátarendszer beállításához a program futtatása előtt.

A megjelenítés nem adja vissza a zónák alakját, azonban térben elhelyezhetővé válnak az információk.

A program indítása előtt szükséges megadni az általunk megjelölt kritikus zónák számát. Az előző fejezetben leírt logika alapján kiválasztott zónák számát a mintasablon alapján kell megadni egy „.csv” kiterjesztésű fájlban. Erre látható példa a következő ábrán (18. ábra).

	A	B	C	D
1	No	Critical Zones		
2	1	1		
3	2	2		
4	3	17		
5	4	24041		
6				
7				

18. ábra:

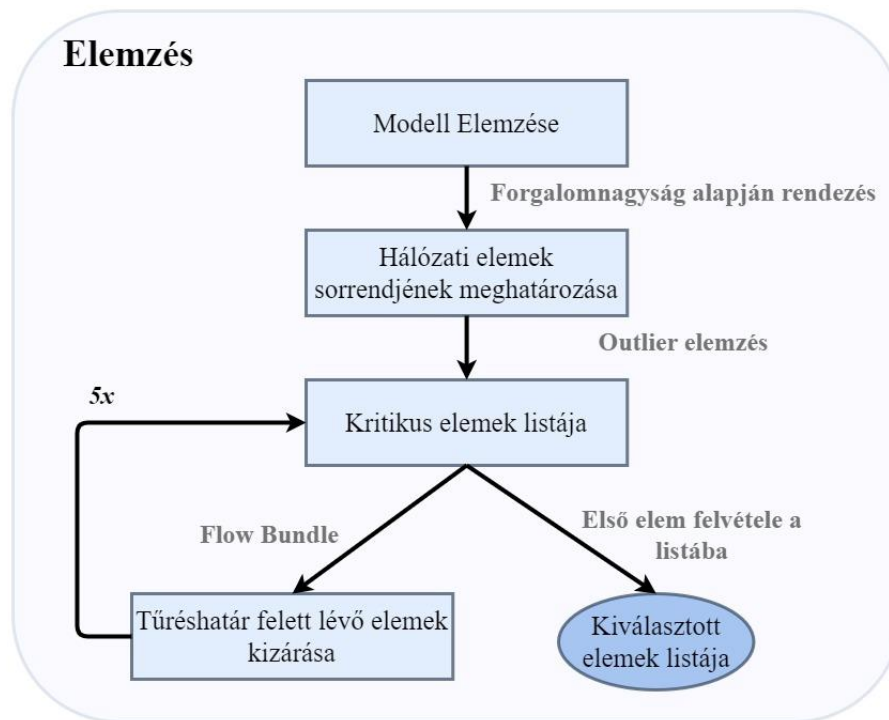
Kritikus zónák megadása - Sablon

Az első oszlopban jelölhetjük a nyomonkövethetőség érdekében, hogy hány zónát választottunk ki eddig. A második oszlopba kerülnek maguk a zónáknak a számaik, ezt jelöli a piros téglalap. Az oszlopneveket változatlanul kell hagyni, ugyanis ez alapján találja meg a Power BI fájl a hivatkozásokhoz tartozó adatokat.

Ebből a fájlból szükség van egy plusz másolatra, ugyanazon mappába. Erre azért van szükség, mert a relációk adattábláját és a kritikus zóna adattábláját csak egy kapcsolattal lehet összekötni egyidejűleg. Ebből adódóan nem lenne lehetőség egyszerre megjeleníteni a kritikus zónákból való szűrésre és a kritikus zónákba való szűrésre. A létrehozott kapcsolatok az adattáblák között később kerülnek részletezésre.

6.4 Elemzés

A program a második részben elemzi a hálózatot, ez látható az alábbi kivágott ábrán (19. ábra).



19. ábra:
Elemzés - Második rész

A modell elemzése az előzetes szűrés eredményének következtében a forgalomnagyság alapján történik. A beolvasott lista layout-ok után megtörténik a hálózati elemek sorbarendeze.

Az elemek kiválasztása a már korábban leírt módszer alapján történik. Az elsőnek kiválasztott kritikus elem a legnagyobb forgalmú szakasz, majd ezt követően flow bundle érték alapján kizárásra kerülnek azok az elemek, amelyeken az ezen a szakaszon áthaladó forgalom több mint fele megjelenik.

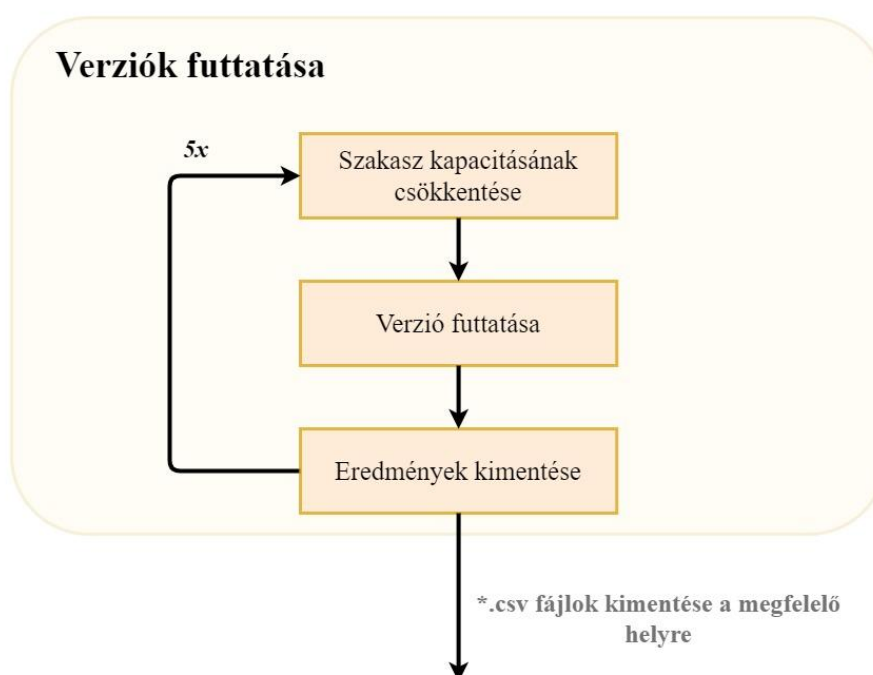
Az előzetes szűrés során minden módszer vizsgálatakor az első öt kritikus elem tulajdonságait változtatva vizsgáltam öt verziót. A program tesztelésénél azonban ez a megoldás nem elég precíz, meg kellett határozni, mely értékek térnek el szignifikánsan. Ehhez statisztikai elmeztést végeztem.

A forgalomnagyság adatait sorbarendeze után kiértékeltem, meghatároztam az első, második és harmadik kvartilis értékét. Az első és a harmadik kvartilis közötti érték (interkvartilis) másfélszeresét hozzáadtam a második kvartilis (medián) értékéhez. Azokat az elemeket, amelyekhez ennél nagyobb forgalom tartozik, azokat vettem bele a vizsgálandó listába, az úgynevezett outlier értékeket.

Így azonban a program működésének tesztelése során nem sikerült eléggé leszűkíteni a szignifikánsan eltérő szakaszok halmazát. Az outlier elemzés alapján való kiválasztással és a flow bundle érték alapján történő kizárással is több kritikus szakasz maradt a listában. Emiatt végleges megoldásként a szűrt lista első öt elemét módosítva futtat a program 5 verziót, majd azok eredményeit menti ki és hasonlítja össze a kiinduló állapottal.

6.5 Verziók Futtatása

A harmadik részben az elemzést követően történik a verziók megalkotása, ezt mutatja be a következő ábra (20. ábra).



20. ábra:

Verziók Futtatása - Harmadik rész

A program végigmegy egy for ciklus segítségével az öt elemű szűrt szakasz listán, majd minden ciklusban ment egy verziót. Beolvassa a szakasz jelenlegi kapacitását, utána veszi annak a tizedét és egyenlővé teszi a kapacitás értékét azzal.

A változtatásokat követően elmenti az újonnan ráterhelt modellt az eredmények mappába, azzal a jelöléssel, ahányadikként futott az adott modell. Ezen felül beolvassa a bemeneti adatoknál megadott lista layout-okat, majd ezekből adattáblát készítve kimentí az értékeket „.csv” kiterjesztésű fájlokba.

Ezt a folyamatot ötször megismételve a program kilép a for ciklusból és bezárja a modell minden verzióját. A Python kód működése ezen a ponton leáll, ezt követően nem történik több változás a modellen belül, nem történik több adatkimentés.

6.6 Eredmények megjelenítése

Az utolsó része a programnak az adatok megjelenítése, ezt mutatja a következő ábra (21. ábra).



21. ábra:

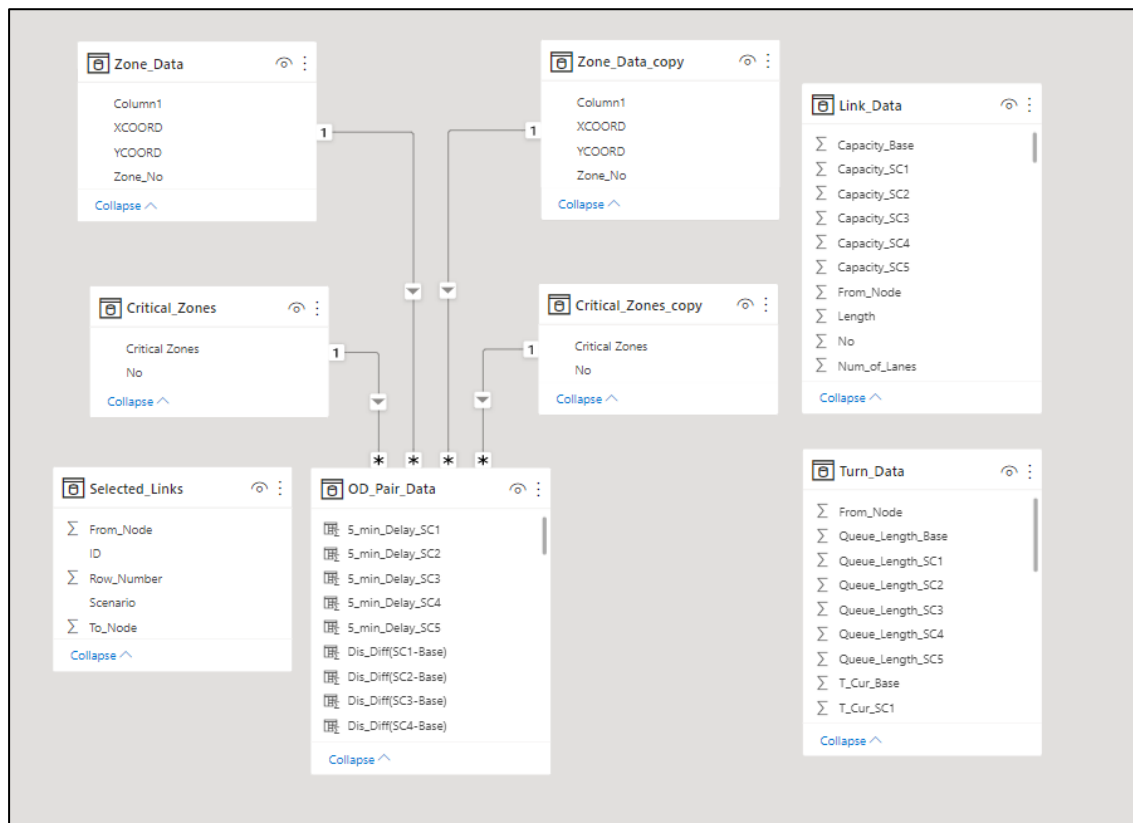
Eredmények megjelenítése - Negyedik rész

A meglévő Power BI fájl a beállított mappából beolvassa a verziókból kimentett adatokat, majd ez alapján frissíti a megjelenítéseket.

A különböző légszennyezés, zajszennyezés értékét a korábban leírt átlagos adat alapján számolja a táblázat. Ezek 2019-es hivatalos adatok, az útmutató ekori verziója állt rendelkezésre. Azonban ezek az értékek paraméteresen vannak a számításban, emiatt bármikor kicserélhetőek és személyre szabhatóak.

Az adattáblák kapcsolatát egymással az alábbi ábra mutatja be (22. ábra). Nincs minden összefüggésben mindennel, a különböző hálózati elemek táblája nem kötődik egymáshoz, ugyanis nincs megkülönböztetve, hogy az egyes szakaszok és kanyarodások melyik zónán belül vannak. Az általunk bemeneti értéként megadott kritikus zónákat kell összekapcsolni a modellből kimentett zóna listával, így tudunk rászűrni a megjelenítésnél az eredményekre.

Az adattáblák között megjelenik még egy bemeneti fájl, ami tartalmazza a program által kiválasztott és lecsökkentett kapacitású szakaszok azonosítóját.

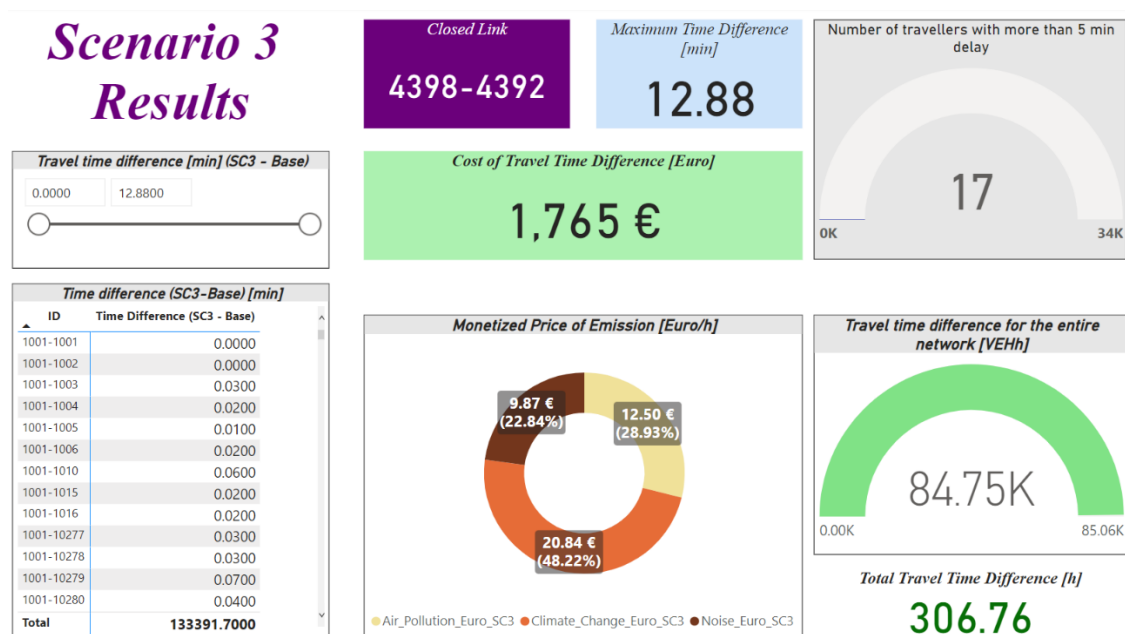


22. ábra:

Power BI adattáblák közötti kapcsolat megjelenítése

Minden verzióhoz külön fűlek tartozik, ahol az ahhoz kapcsolódó eredmények láthatóak. Az első fülön az adott verzióban lévő lezárásokhoz kapcsolódó időveszteség értéke pénzben kifejezve, levegőszennyezés, zajszennyezés monetarizált értéke látható. Ez látható jelmagyarázattal a következő ábrán (23. ábra).

Fel van tüntetve a relációnkénti időveszteség is, ennek szűrésére rendelkezésre áll egy csúsztatható szűrő, amely a beállított intervallumon belüli relációkat jeleníti meg. A szűrő a jobb felső sarokban lévő ábrával is kapcsolatban van. Az ábrán látható maximális érték, az az összes utazás értéke a hálózaton, a sötét kékkel jelölt csík azoknak az utazásoknak a száma, amelyet több mint 5 perces késés érint.



23. ábra:
Verziókról megjelenített adatok

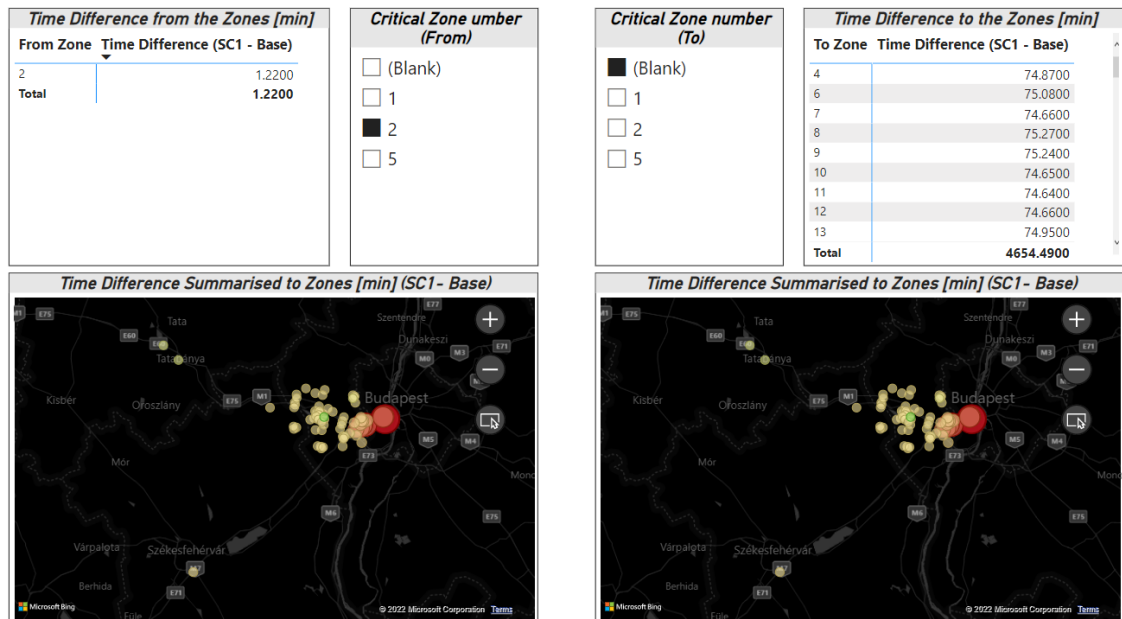
A bal oldalon az ábrán látható az egyes relációkhoz tartozó lejutási idő változása, ehhez kapcsolódóan a világos kék téglalapban ki an emelve a legmagasabb időváltozás, időtöbblet értéke.

A jobb oldali világos zöld ábrán látható színnel jelölt érték az az alaphálózatra kiszámolt összes utazási idő, az ábrán megadott maximális érték a verzióval kapott összes utazási idő a hálózatraszámítva. Ezzel az ábrázolással megjeleníthető a változás mértékének az aránya az alap adatokból kiindulva.

A világos zöld téglalapban ennek az utazási idő különbségnek, idővesztésnek a pénzben kifejezett értéke látható Euro-ban megadva. Ehhez szükség volt az egyének idejének a pénzben kifejezett értékére, ami szintén egy 2018-as módszertani útmutató alapján van meghatározva. [10]

A középben lévő kör diagram a különböző légszennyezések és zajszennyezés által okozott károk monetarizált értékeit jelenítik meg. Látható az egymáshoz viszonyított arányuk, százalékok, tovább a pontos értékük Euro-ban kifejezve.

A verziókhöz tartozó második fülön a kritikus zónákhoz tartozó elemzés található, ezt látható a következő képen (24. ábra).



24. ábra:

Kritikus zónához tartozó adatok

A Power BI fül szemmel láthatóan két részre bontható, bal oldalt lehetséges az induló zónákra szűrni, jobb oldalt az érkező zónákra. Mindkét oldalon lehetőség van kijelölni egyet a bemeneti adatoknál meghatározott kritikus zónák közül.

Amennyiben kiválasztunk egyet, úgy az adott oldalhoz tartozó lista elmeinek száma lecsökken egyre. Így látható a kiválasztott zónához tartozó utazási idő különbség, minden relációra összegezve az adott zónából vagy zónába. Abban az esetben, ha nem választunk ki egyet sem a lehetőségek közül, úgy az összes zónához tartozó érték szerepel a listában.

Az alsó részen lévő térképeken a buborékok jelölik a zóna középpontokat, amelyeknek koordinátáit a bemeneti adatoknál adtuk meg. A buborékok mérete és színe függ a zónához tartozó időérték változásának nagyságától. Piros színű a buborék, ha az érték negatív, 0-hoz közelítve sárgul, a pozitív értékek zöldek.

A kiválasztás előtt minden zónához összegzi a szoftver az összes relációból származó értéket. Miután kiválasztottunk egy zónát, úgy már csak az adott zónából induló, vagy zónába érkező relációkhoz tartozó érték jelenik meg a térképen. Lehetőség van a térképen való ráközelítésre, kiválasztásra, a buborékokra kattintva kiírja az ahhoz tartozó részletes adatokat.

6.7 Kezelői felület, mappaszerkezet

Az előzőekben leírt fájlokat, amelyek szükségesek a program futtatásához, a megfelelő helyre kell másolni. Az általam létrehozott mappaszerkezet sablonát mutatja be az alábbi ábra (25. ábra).

Name	Date modified	Type	Size
SS	02/11/2022 20:52	File folder	
Link_Full_List_flow.llax	20/10/2022 10:15	LLAX File	13 KB
Link_List_Output_Power.llax	24/10/2022 11:32	LLAX File	11 KB
Link_List_vol.llax	25/09/2022 22:22	LLAX File	12 KB
OD_List_Output.llax	22/10/2022 11:51	LLAX File	7 KB
OD_List_Output_Power.llax	27/10/2022 20:49	LLAX File	7 KB
Turn_List_Output_Power.llax	24/10/2022 15:46	LLAX File	8 KB
Zone_List_Output_Power.llax	27/10/2022 11:18	LLAX File	4 KB

Name	Date modified	Type	Size
List_Layout	02/11/2022 20:52	File folder	
Output	02/11/2022 20:51	File folder	
Procedure	02/11/2022 20:52	File folder	
BIATORBAGY_EFM_DG_BASE_no_block	27/10/2022 19:20	PTV Visum-File	2,127 KB

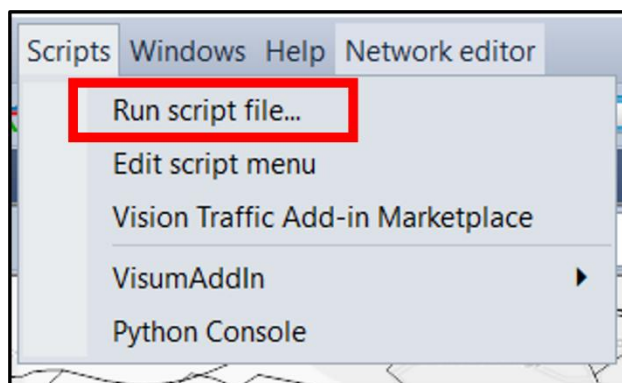
Name	Date modified	Type	Size
Critical_Zones	26/10/2022 20:54	Microsoft Excel Co...	1 KB
Critical_Zones_copy	26/10/2022 20:54	Microsoft Excel Co...	1 KB
Link_Data	28/10/2022 09:44	Microsoft Excel Co...	613 KB
Network_Sensibility	28/10/2022 10:15	Microsoft.Microsof...	1,193 KB
OD_Pair_Data	28/10/2022 09:43	Microsoft Excel Co...	686 KB
Selected_Links	29/10/2022 21:55	Microsoft Excel Co...	1 KB
Turn_Data	28/10/2022 09:44	Microsoft Excel Co...	1,256 KB
Zone_Data	28/10/2022 09:43	Microsoft Excel Co...	3 KB
Zone_Data_copy	28/10/2022 09:43	Microsoft Excel Co...	3 KB

25. ábra:
Mappaszerkezet felépítése

Az általunk megvizsgálni kívánt verziót a gyöker mappába szükséges menteni. A többi bemeneti és kimeneti fájl almappákban helyezkednek el. A verzió ráterhelését tartalmazó „procedure”-t is át kell helyezni az erre a célra létrehozott mappába, hogy a hozzátartozó szűrőket megtalálja a modell ráterhelés közben.

6.8 Program integrálásra Visumba

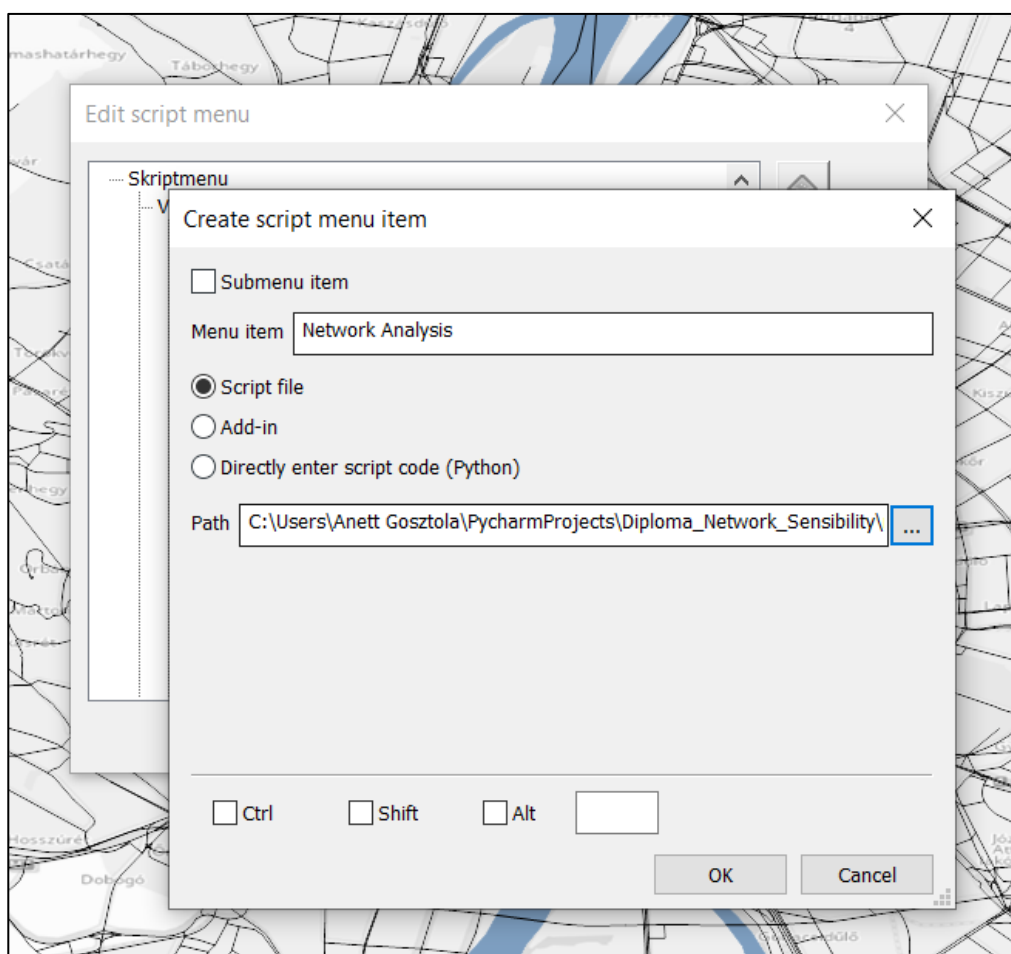
Lehetőség van arra, hogy a kész programkódot magából a Visumból indítsuk el és ne kelljen ehhez egy, a felhasználónak ismeretlen, külön környezetben dolgoznia. Erre kétféle lehetőség van, az első az, amikor a Visumban a „Script” fülre kattintva kiválasztjuk a programkódot tartalmazó fájlt. Ebben az esetben a legcélszerűbb, ha ez egy helyre van másolva a modellel. Ennek megnyitására mutat példát a következő ábra (26. ábra, amelyen látható, hogy a Visum melyik fülén érhető el ez a funkció).



26. ábra:

Programkód futtatása Visum-ból, 1. megoldás

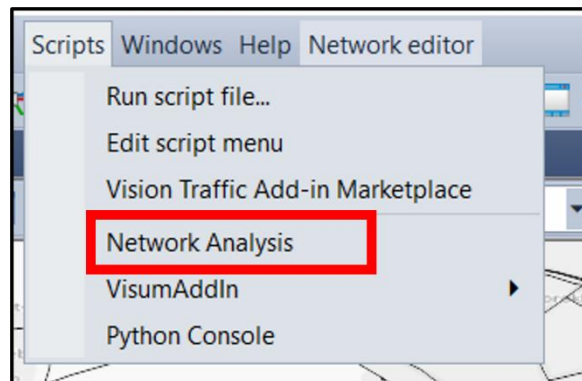
A másik megoldás ennél egy fokkal kényelmesebb, amelyben a programkódot tartalmazó fájlt sem kell kikeresnünk, hanem egyszerűen a menüsorból kiválaszthatjuk és azonnal elindul az elemzés. Az új menüpont létrehozása látható a következő ábrán (27. ábra).



27. ábra:

Programkód futtatásához szükséges menüpont létrehozása

Az ábrán látható, hogy az előzőtől eltérően itt az „Edit script menu” lehetőséget kell választani, így nyílik meg a képen szereplő két ablak. Ezután meg kell adni, hogy mi legyen az új menüpont neve (az én választásom a programkód alapján „Network Analysis” lett). A felsorolt választási lehetőségek közül a „Script file”-on kell hagyni a kiválasztást, majd meg kell adni az elérhetőségét a kódnak. Ha ezzel elkészültünk, akkor a mentést követően a továbbiakban emg fog jelenni az általunk újonnan létrehozott menüpont, ez látható a következő ábrán (28. ábra).



28. ábra:

Programkód futtatása Visum-ból, 2. megoldás

Ennek hátránya, hogy minden megvizsgálandó modellbe ezt bele kell ültetni, továbbá az elérési útvonalat is meg kell változtatni. Azonban az egyszeri integrálás után már a további változtatásokat követően is rendelkezésre áll a modellben.

6.9 Futtatás módjának kiválasztása

A korábban leírtakban említettem, hogy előzetes szűrés alapján határoztam meg a teszteléshez használt befolyásoló attribútumot. Ehhez minden választási lehetőséghez beépítettem a kódba egy olyan funkciót, amely az aktuálisan vizsgált paraméter alapján választja ki a szakaszokat.

Ehhez hasonlóan van integrálva a programkódba a manuálisan történő kiválasztáshoz tartozó program részlet, amelyről kicsit részletesebben egy későbbi fejezetben lesz említés (8.6). Az aktuális futtatáshoz történő kiválasztáshoz bevezettem egy „MOD” változót, amelyet számértékekkel egyenlővé téve választ az egyes futtatási lehetőségek közül. Erről látható ábra (29. ábra) a programkódból kivágva.

```
49  ##CODE
50
51  MOD = 2
52  start = 0
53  finish = 5
54
55  if MOD == 1:...
88
89  elif MOD == 2:...
650
651  elif MOD == 3:...
733
734  elif MOD == 4:...
867
868  elif MOD == 5:...
1039
1040  elif MOD == 6:...
```

29. ábra:

Programkód aktuális futtatásához befolyásoló attribútum kiválasztása

Összesen 6 féle kiválasztás közül választhatunk a futtatás elején. Ezeket a füleket lenyitva láthatóak a kódrészletek.

7. EFM bemutatása

A döntéstámogató alkalmazás létrehozását követően megvizsgáltam vele az Egységes Forgalmi Modellt (EFM), amely Budapestnek a modellje. A hivatalos verziót a BKK-tól igényeltem meg, és rajtuk keresztül jutottam hozzá.

7.1 EFM Leírása

Az EFM projekt célja az volt, hogy a BKK Zrt. az elvárásoknak megfelelően egy olyan közlekedési modellt hozzon létre, amely a jövőbeni fővárosi és agglomerációs közlekedési beruházások vizsgálatára alkalmas. További cél volt, hogy a folyamatosan karbantartott, rendszeresen frissülő saját tulajdonú közlekedési modellt a jövőben indítandó projektek mondellezési munkarésze egységes, áttekinthető és szakmailag stabil alapon álló legyen.

Ezeket a szempontokat figyelembe véve a modell jellegét tekintve az EFM egy „stratégiai modell”, így alkalmas nagytávú közlekedés stratégiai vizsgálatok elvégzésére, komplex, több-módú infrastruktúrális beavatkozások vizsgálatára. [11]

A területi modell adja meg az EFM határait és tartalmazza a közlekedési igények keletkezési helyének területi vonatkoztatási egyégeit, a forgalmi körzeteket és az azokat összekötő közlekedési hálózatokat.

A modell területileg Budapestre és annak agglomerációjára vonatkozik. Az agglomerációs terület tartalmazza a 2005. évi LXIV. törvény a Budapesti Agglomeráció Területrendezési Tervében felsorolt településeket, Pest megye településeit, valamint kiegészül további településekkel.

A területi modell körzetbeosztása többszintű, a rendelkezésre álló területi adatok jellemzően valamilyen közigazgatási vagy városrendezési körzetbeosztáshoz kapcsolódnak és abban a részletességben vannak tárolva, amelyben az adatok megfelelően felhasználhatóak. A körzetek és azok adatai szükség esetén összevonhatóak, illetve megfelelő becsléssel szét is bonthatóak.

Az ország egyéb részeinek forgalma a tervezési terület határán kialakult kordonpontokon vehető figyelembe.

7.2 Szakaszok ellenállása

Az EFM alap beállításai alapján egy napi modell, a mátrixokat a hálózatra ráterhelve egy egész napi forgalom lebonyolódásának eredményét láthatjuk. Az útmutatóban leírtak alapján ennek megfelelően vannak beállítva a szakaszok ellenállásai is.

Az egyes szakaszokra jellemző ellenállásban járműkategóriánként eltérő súlyok az alábbi tényezők vannak figyelembe véve: utazási távolság, útvonalon található útdíj vagy behajtási díj, illetve a forgalom nagyságtól függő eljutási idő. Ez utóbbi elem úttípusonként különböző paraméterezésű BPR típusú VDF (forgalom nagyság-késedelem) görbe segítségével határozza meg az adott szakaszon az aktuális forgalmi terhelés hatására kialakuló eljutási időket.

A forgalom nagyság-sebesség összefüggéseket állandó forgalomszámláló mérőhelyek adatainak felhasználásával készítették az EFM-hez, mind ezt több úttípusra vonatkozóan.

A forgalom nagyság-sebesség görbéket forgalom nagyság-idővesztés (eljutási-idő növekedés) alakra alakították a modell készítői, a VISUM modellben használt BPR-formának megfelelően.

A következő úttípusokra készültek a VDF függvények:

- gyorsforgalmi- és főutak,
- átkelési szakasz, főbb városi szakaszok
- lakóutcák
- egyéb

A BPR típusú forgalom nagyság-késedelem görbe képlete a következő:

$$T_{Cur} = T_0 \cdot \left(1 + a \cdot \left(\frac{Q}{Q_{MAX} \cdot c} \right)^b \right)$$

T_{Cur} : Az aktuális forgalom nagyság függő időérték

T_0 : A szakasz minimális időigénye szabadáramlási sebesség mellett

Q, Q_{MAX} : A közúthálózati elem elméleti kapacitását jelöli

a, b , és c : szabadon választott paraméterek

A függvények paraméterezésénél használt „a”, és „b” értékek szakasztípus függők, ezek határozzák meg a görbék alakját.

A „c” tényező a vizsgált időszaktól függő kapacitástényező. A napi forgalom a csúcsórai forgalom 17 szerese a modell leírása alapján, ezért napi forgalom ráterhelése

esetén a szakaszok paraméterezett órás kapacitását $c=17$ értékkel szorozzuk, míg órás terhelés esetén $c=1$. Ha nem megfelelően választjuk ki a kapacitástényezőket, úgy a hálózat a forgalom változásának hatását nem megfelelően képezi le.

A döntéstámogató alkalmazás teszteléséhez szükséges volt átállítani a „c” paramétert 1-re, mivel az esetlegesen bekövetkező lezárásokat, korlátozásokat vagy baleseteket órás forgalmi modellen célszerű modellezni.

Ehhez a következő paramétereket kellett átállítani a modellben:

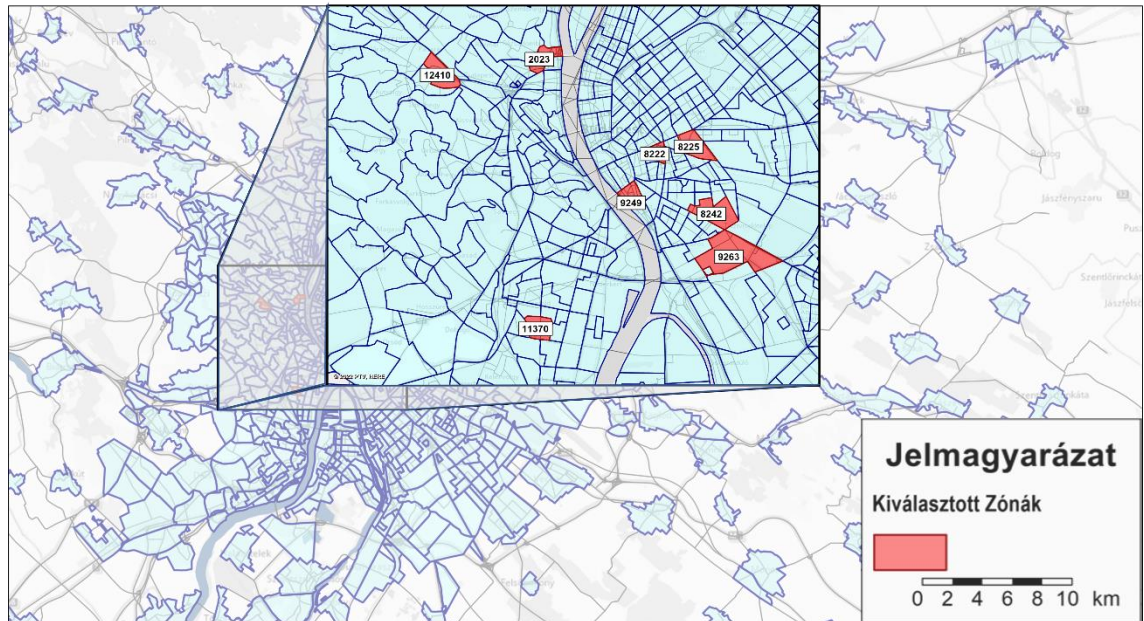
- „c” paraméter értékét 1-re
- Mátrixok minden értékét leosztani a „c” paraméter eredeti értékével
- Beállítani az új mátrixokat ráterhelési mátrixnak

Ezeket a változtatásokat követően szükséges volt még átnézni a ráterhelési eljárást, ugyanis az EFM közúti ráterhelés mellett tömegközlekedési ráterhelést is modellez. Továbbá bele van építve egy igénymodell, amely a jelen kutatás szempontjából nem fontos a számunkra.

Ezen részek kivételével jelentősen rövidíthető a ráterhelés időtartama, amely öt verzió futtatásánál már sokat számíthat.

7.3 Kritikus Zónák

Az EFM-en való teszteléshez meghatároztam a kritikus zónákat, amelyeknek az elérhetőségére fontos lehet. Ehhez kiválasztottam Budapesten belül 8 zónát, ahol kórház található. Ez a 8 zóna látható a térképen kiemelve (30. ábra).



30. ábra:
Tesztelés céljából kiválasztott kritikus zónák

A kritikus zónák megadásának száma korlátlan, a program szempontjából nincs jelentősége annak, hogy mennyihez szeretnénk megvizsgálni az eljutási időt. A megadáshoz szükség van a zónák számának kimentéséhez, majd ebből kell készíteni a másolatot. A feltöltött fájl az alábbi módon néz ki (31. ábra).

	A	B	C
1	No	Critical Zones	
2	1	2023	
3	2	12410	
4	3	11370	
5	4	9249	
6	5	8222	
7	6	8225	
8	7	8242	
9	8	9263	
10			

31. ábra:
Teszteléshez meghatározott kritikus zónák számai

A következő fejezetben be lesz mutatva a példa, ahol ezek között lehet választani az adatok térképes megjelenítésénél.

8. Eredmények bemutatása

A megfelelő előkészületek után az EFM is alkalmas lett a program tesztelésére, a gyökérmappába másolása után elindítottam a program futtatását. Ennek eredményeit részletezi a következő fejezet.

8.1 Döntéstámogató rendszer virtuális megjelenítése

A döntéstámogató alkalmazás lefutásakor kimentí a kiválasztott 5 szakaszt, amelynek kapacitását tizedére csökkentí le, majd elindítí az újboli ráterhelést. Az EFM-ből kiválasztott 5 szakasz a forgalomnagyság értékek alapján az alábbi ábrán van megjelölve (32. ábra).



32. ábra:

A program által kiválasztott 5 kritikus szakasz az EFM-ből

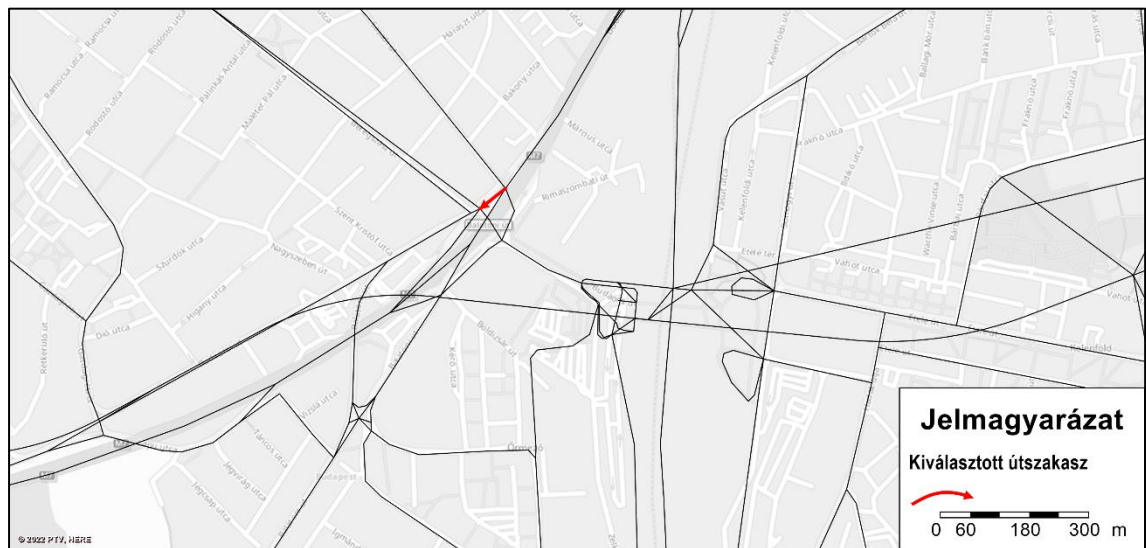
Látható az ábrán, hogy a program által kiválasztott szakaszok az M1-M7-bevezetőnél, a Könyves Kálmán körút – Üllői út kereszteződésénél és az Árpád híd fel és levezető szakaszainál helyezkednek el.

Ezt a kiválasztást jelentősen meghatározza, melyik időszakra végezzük a vizsgálatot, délelőtti csúcsórákban a városba befelé vezető utak fognak kiadódni, délutáni csúcsórákban a városból kivezető utak.

Az egyes szakaszok kapacitását külön-külön csökkentve az eredményeket a következő alfejezetek tartalmazzák.

8.2 Verzió - 1

Az első verzióban kiválasztott és lecsökkentett kapacitású szakasz az alábbi ábrán látható (33. ábra).



33. ábra:

Az első verzióban kiválasztott szakasz

Az ábrán látható kiemelve a Budaörsi út első szakasza, forgalomnagyság alapján ezt azta az elemzés legforgalmasabb szakasznak eredményül.

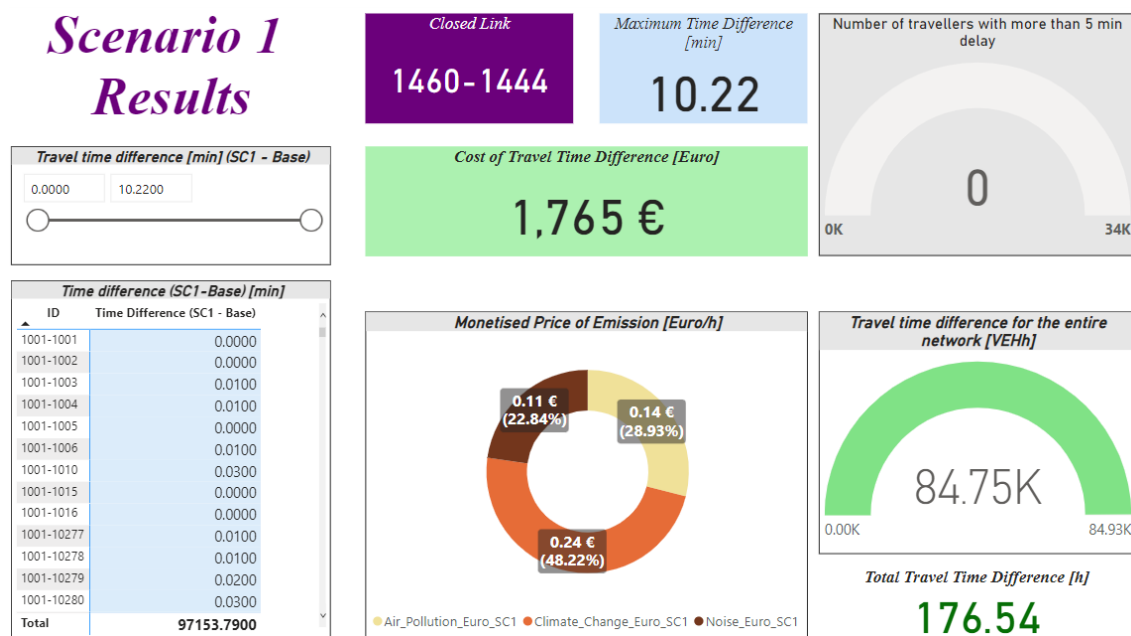
Ebben az esetben a relációk közötti maximális időnövekedés 10,22 perc, ezzel ellentétben azonban az összes utazás közül összesen 0-t érint 5 percnél nagyobb időveszteség. Az 5 percnél nagyobb időveszteséggel járó relációkból több is előfordul ebben a verzióban, azonban az adatok szerint ez nem senkit a közlekedők közül (34. ábra).

Az utazási idő veszteség 176,41 óra, amely csak elenyésző része az összes utazási időnek. A relációk listájánál látható, hogy az összesre meghatározott időveszteség és azoknak az összege nagyjából 1000 óra lenne. Erre magyarázat, hogy ez az érték tényleges időveszteségnek akkor adódnak ki, ha minden relációban 1 utazás lépne fel. Ez azonban nem így van a modellben, ezért eltérő a tényleges és az elvi időveszteség érték összege relációkra.

Az időveszteség pénzben kifejezett értéke az ábrán a zöld háttérű téglalapban található, ez 1765 Euro. Egy óra pénzben kifejezett értékére az utazásicélok

szétválasztása nélkül egy átlagolt összeget használtam, amely nagyjából 4000 Ft. Ezt a számításokban 10 Euro-ra váltottam át az egységes megjelenítés és a követhetőség érdekében.

Az általam használt értékek mindegyik paraméteres, emiatt az egyes évek közötti különbségek könnyen kezelhetők a kimeneti fájlban.



34. ábra:

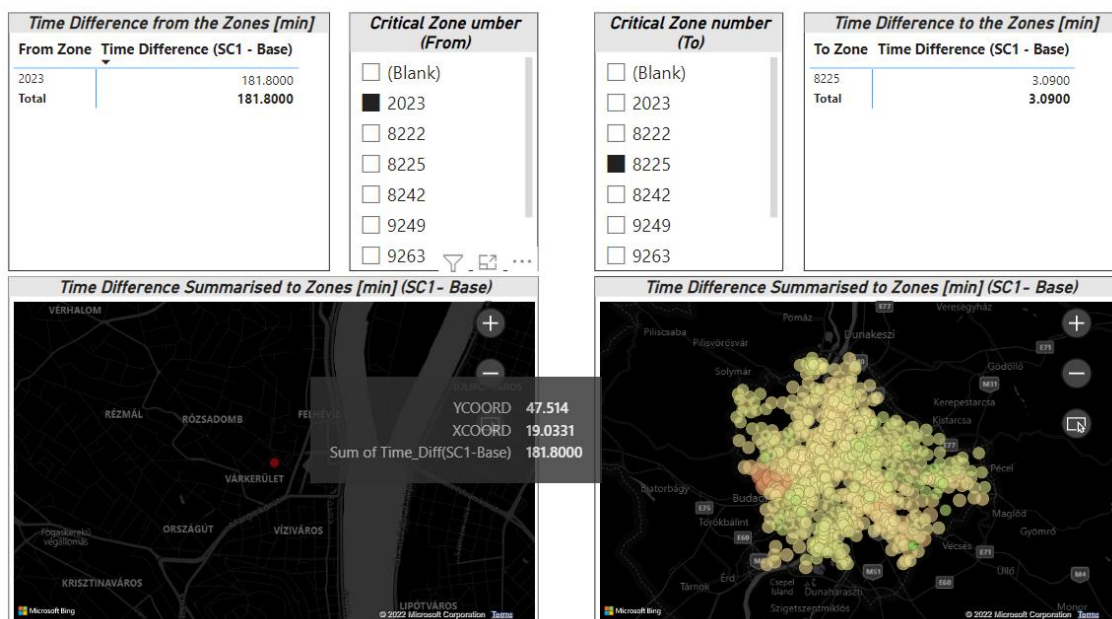
Első verzióból kapott eredmények - Power BI első fül

A gyűrű alakú diagramon látható, mennyi a pontos értéke a pluszban megtett utazási táv légszennyező és zajszennyező hatásának. A diagramon csak az alap és az első verzió értékei közötti különbség pénzben kifejezett értéke látható. Ez az eredmény egy órára vonatkozóan van meghatározva az órás ráterhelés miatt.

A légszennyezés és zajszennyezés nem volt ábrázolható egy diagramon, ugyanis nagyságrendileg különböznek az adatok. Látható, hogy a lég- és zajszennyezéshez kapcsolódó költségek 10 Euro, míg az időveszteség értéke 1000 Euro nagyságrendben van.

Az eredményekben nullához közeli értékek szerepelnek, melynek magyarázata lehet, hogy a szakasz lezárását követően az ott közlekedők egy olyan alternatív útvonalon tudtak közlekedni, amely közel azonos hosszúságú vagy rövidebb. Ezzel ellentétben viszont valószínűleg lassabb, mivel a hálózaton lévő utazási idő megnövekedett.

A verzióhoz tartozó második fülön a kritikus zónákhoz kapcsolódó értékek láthatóak, ezt mutatja be a következő ábra (35. ábra).



35. ábra:

Első verzióból kapott eredmények - Power BI második fül

A bal oldalon a kritikus zónákból induló utazási idő különbségekről kapunk információt. A kritikus zónák listából való kiválasztásánál a relációk listája is leszűkül arra az adott elemre, továbbá a térképen is ráközelít az adott zóna középpontjára. Erre ráhúzva az egeret, további információkat láthatunk a zónáról.

A jobb oldalon a kritikus zónákba való eljutási idők különbségei vannak ábrázolva különböző színnel és nagysággal. A zóna kiválasztása után látható, hogy a szakasz kapacitásának csökkentésével hogy változtak az eljutási idők az adott zónába. Ezen kívül a jobb oldali reláció lista is leszűkül egy elemre a kiválasztást követően.

8.3 Verzió -2

A második verzióban a Budaörsi út másik irányú szakasza lett kiválasztva, amely látható a következő ábrán (36. ábra).

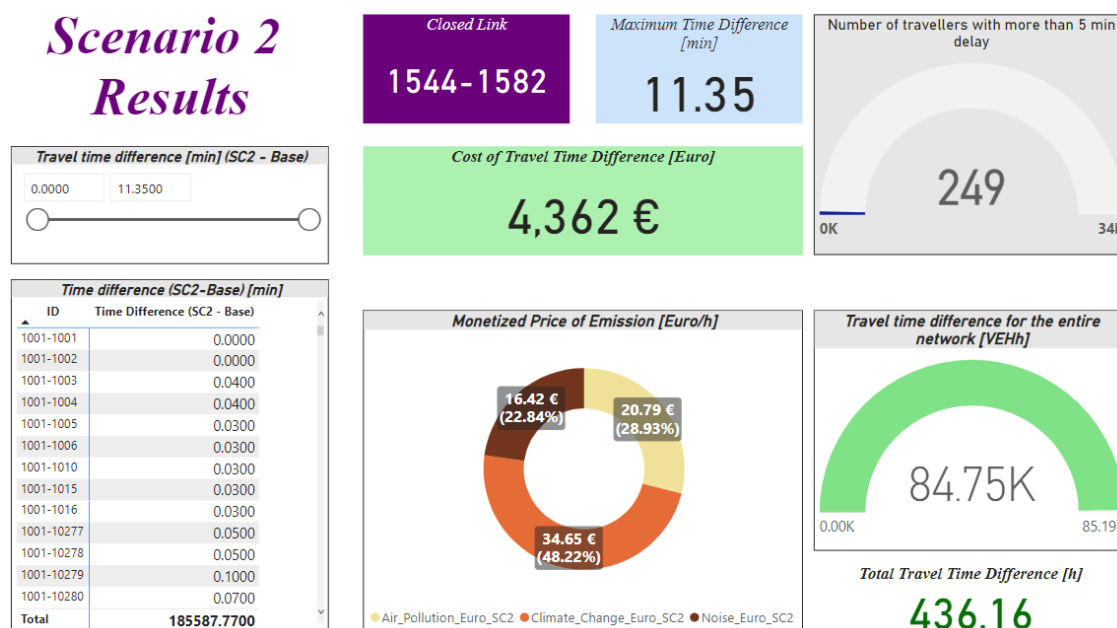


36. ábra:
A második verzióban kiválasztott szakasz

A lezárást követően az eredmények a következőket mutatják.

A relációk közötti maximális időnövekedés a hálózaton 11,35 perc a kapacitáscsökkentést követően. Továbbá a 34 ezer utazás nagyon kevés hányadát érinti több, mint 5 perc késés, összesen 249-t.

A hálózaton fellépő összes utazási idővesztés értéke, az alábbi ábrán látható (37. ábra) a jobb alsó sarokban, 436,16 óra. Ez szintén nagyon kevés hányada az összes utazási időnek, ezt szemlélteti és mutatja be a felette lévő félkör alakú diagram. Ennek az idővesztésnek kiszámítható a pénzben kifejezett értéke, amely 4362 Euro-ra jön ki a számítások alapján.



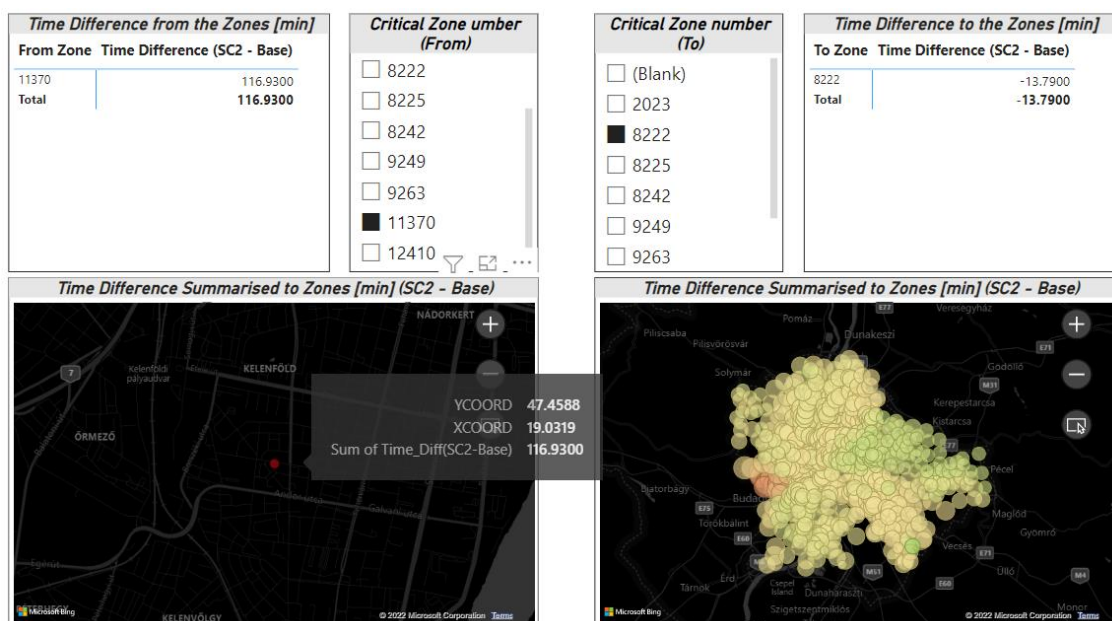
37. ábra:

Második verzióból kapott eredmények - Power BI első fül

A gyűrű alakú diagramon látható, mennyi a pontos értéke a pluszban megtett utazási táv légszennyező és zajszennyező hatásának. A diagramon csak az alap és a második verzió értékei közötti különbség pénzben kifejezett értéke látható. Ez az eredmény egy órára vonatkozóan van meghatározva az órás ráterhelés miatt.

A légszennyezés és zajszennyezés nem volt ábrázolható egy diagramon, ugyanis nagyságrendileg különböznek az adatok. Látható, hogy a lég- és zajszennyezéshez kapcsolódó költségek 10 Euro, míg az idővesztés értéke 1000 Euro nagyságrendben van.

A verzióhoz tartozó második fülön a kritikus zónákhoz kapcsolódó értékek láthatóak, ezt mutatja be a következő ábra (38. ábra).



38. ábra:

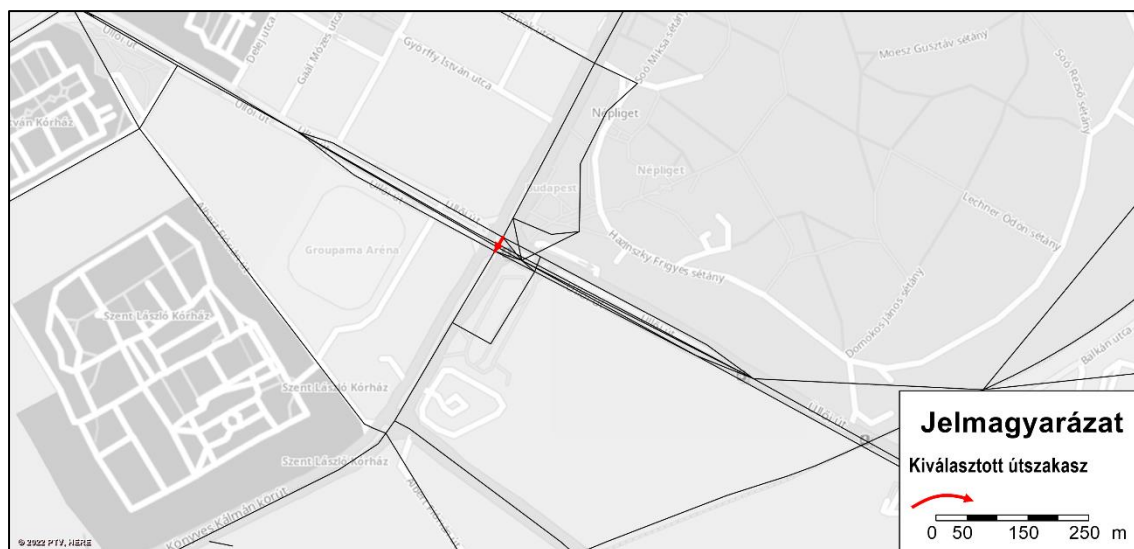
Első verzióból kapott eredmények - Power BI második fül

A bal oldalon szintén a kritikus zónákból induló utazási idő különbségekről kapunk információt. A kiválasztott zónából látható, hogy az össz utazási idő minden relációba együtt véve 141 perccel nőtt meg.

A jobb oldalon a kritikus zónákba való eljutási idők különbségei vannak ábrázolva különböző színnel és nagysággal. A kiválasztott zónába az összes eljutási idő változás negatív, ez látható a pöttyök színén is. A bal oldalon megfigyelhető a lezárt szakasz környékén pár nagyobb piros pötty. Ez jelöli, hogy onnan növekedett az eljutási idő, a jobb oldalon azonban több zöld pötty is található, ezekből a kiválasztott zónába csökkent az elméleti eljutási idő.

8.4 Verzió 3

A harmadik verzióban lecsökkentett kapacitású szakasz a Könyves Kálmán körút és az Üllői út találkozásánál van, ez látható a következő ábrán is (39. ábra), melyik szakasz adódott ki pontosan.

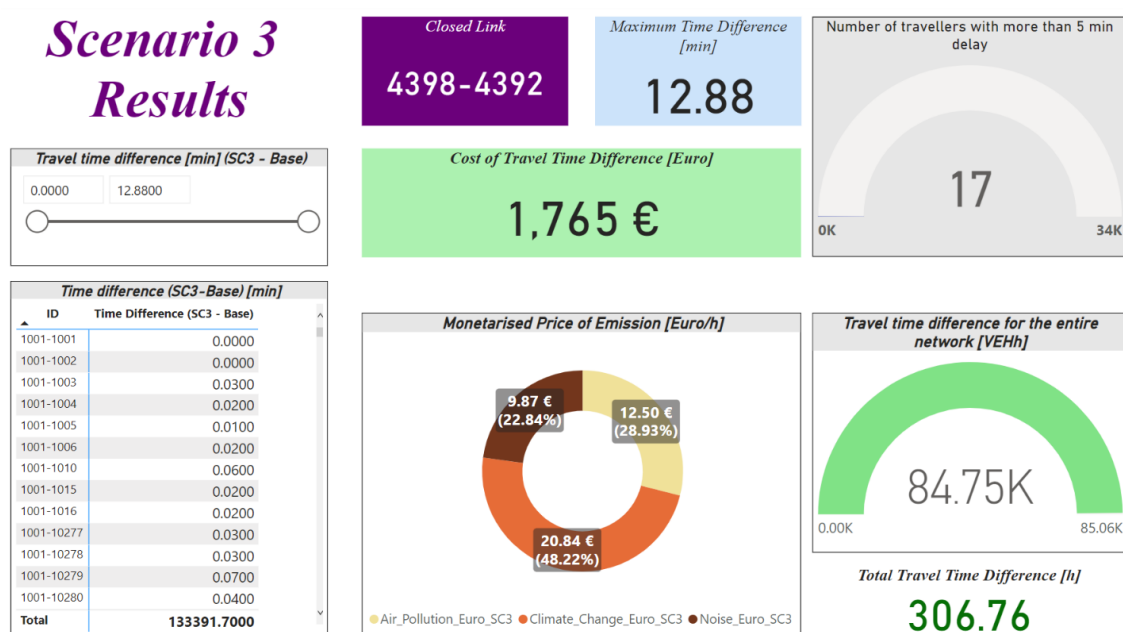


39. ábra:
A harmadik verzióban kiválasztott szakasz

A kapacitás csökkentés után a verzióban a következő eredmények adódtak.

A relációk közötti maximális időnövekedés a hálózaton 12,88 perc a kapacitáscsökkentést követően, ez nagyobb mint a másodiknak lefuttatott verzióban. A 34 ezer utazásnak továbbra is nagyon kevés hányadát érinti több, mint 5 perc késés, összesen 17-et. Ez az érték jóval alacsonyabb az első és második verziónál. Ennek oka lehet, hogy a keletkezett időveszteség összesítve sok, relációkra vetítve nem kiemelkedően magas.

A hálózaton fellépő összes utazási időveszteség értéke, az alábbi ábrán látható (40. ábra) a jobb alsó sarokban, 306,76 óra. Ez szintén nagyon kevés hányada a hálózaton mérhető összes utazási időnek, ezt szemlélteti és mutatja be a felette lévő félkör alakú diagram. Ennek az időveszteségnek kiszámítható a pénzben kifejezett értéke, amely 1765 Euro-ra jön ki a korábban részletezett számítások alapján.



40. ábra:

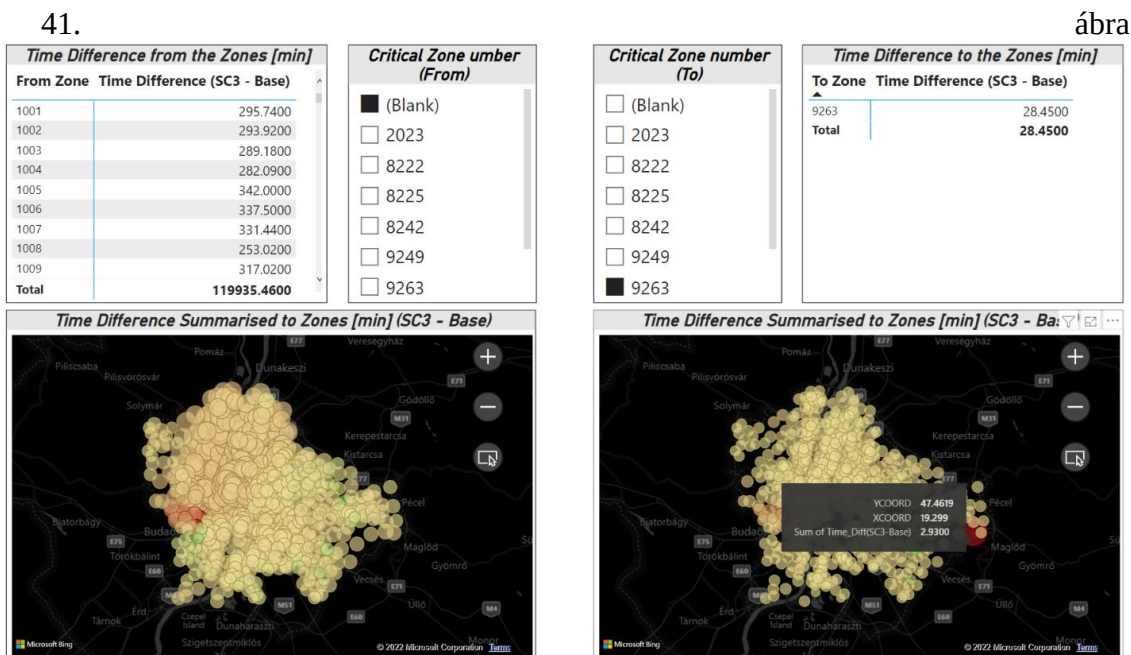
Harmadik verzióból kapott eredmények - Power BI első fül

A gyűrű alakú diagramon látható, mennyi a pontos értéke a pluszban megtett utazási táv légszennyező és zajszennyező hatásának. A diagramon csak az alap és a harmadik verzió értékei közötti különbség pénzben kifejezett értéke látható. Ez az eredmény egy órára vonatkozóan van meghatározva az órás ráterhelés miatt.

Észrevehető, hogy ezek az értékek is alacsonyabban a második verzióban kapott értékeknél, tehát nem csak az időveszteség mértéke csökkent a harmadik verzióban, hanem a futásteljesítmény mértéke is.

A légszennyezés és zajszennyezés nem volt ábrázolható egy diagramon, a nagyságrend itt is különbözik. Látható, hogy a lég- és zajszennyezéshez kapcsolódó költségek 10 Euro, míg az időveszteség értéke 1000 Euro nagyságrendben van, hasonlóan a korábbi verzióhoz.

A kimeenti félj második fülön a kritikus zónákhoz kapcsolódó értékek láthatóak, ezt mutatja be a következő ábra (41. ábra).



41. ábra:

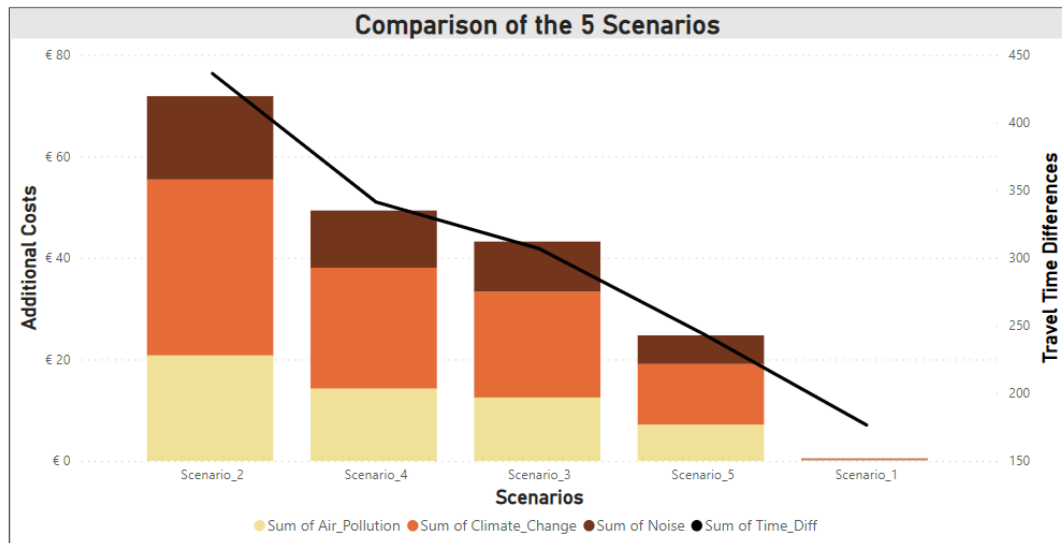
Első verzióból kapott eredmények - Power BI második fül

A bal oldalon szintén a kritikus zónákból induló utazási idő különbségekről kapunk információt.

A jobb oldalon a kritikus zónákba való eljutási idők különbségei vannak ábrázolva különböző színnel és nagysággal. A kiválasztott zónába az összes eljutási idő változás pozitív, látható, hogy a térkép jobb oldalán az egyik zónához tartozó eljutási idő növekedése kiugró a többihez képest.

8.5 Kapott eredmények összevetése az 5 verzióra

Az eredmények minden verzióhoz külön fülön tekinthetők meg, azonban készítettem egy összehasonlításra alkalmas diagramot. Ezt a kimeneti Power BI fájl még nem tartalmazza, ezeket az adatokat külön mentettem ki manuálisan (42. ábra).



42. ábra:
5 verzió összehasonlítása

Az ábrán látható oszlopok csökkenő sorrendben vannak rendezve. Megfigyelhető, ami már a korábbi eredményekből is látszódott, hogy az első verzió eredményei nem mutattak szignifikánsan eltérő utazási időket, továbbá a járművek által megtett km-ek száma sem növekedett.

8.6 Manuális kiválasztással történő elemzés

A dolgozatomban elején említettem, hogy a forgalomnagyság alapú kiválasztás mellett a programkód egy másik felhasználásánál lehetőség van kiválasztani manuálisan a kapacitás csökkentett szakaszokat. Ennek a megadásához szükség van kibővíteni a bemeneti fájlok listáját egy másik „.csv” kiterjesztésű fájlal, mennek sablonja megtekinthető az alábbi ábrán (43. ábra).

	A	B	C	
1	Item_1	Item_2		
2	85987065	85987072		
3	85989763	85985455		
4	116	74979376		
5	85985857	74979376		
6	1540	1444		
7				
8				

43. ábra:

Manuálisan kiválasztani kíván szakaszokat határoló csomópontok listája

A két oszlopba szükséges megadni a kiválasztani kívánt szakaszokat határoló csomópontokat. A kezdőcsomópontokat a bal oldali, a végesomópontokat a jobb oldali oszlop tartalmazza.

A sablonban lévő felsorolásnál 5 minta szakasz van megadva, ennek oka, hogy a kimeneti adatok ugyanabban a Power BI fájl sablonba vannak kimentve, így a program által vizsgált változatok száma megegyezik az előzőekben leírttal. Az elemzés ugyanolyan módon történik, a kimentett verziók neve nem egyezik csak meg, ezeknél szerepel, hogy a manuális kiválasztással történt a szakaszok attribútumainak módosítása.

9. További fejlesztési lehetőségek

Ahhoz, hogy az alkalmazás kompatibilis legyen más modellekkel, lehetőség van az elérési útvonalak kiválasztással történő megadására. Ez azt jelenteni, hogy a modell és a listák, illetve a kimeneti fájlok elérési útvonalát nem szükséges megadni a kódon belül. Ezeknek a kiválasztása minden futtatáskor manuálisan történik jelen állapotban, azonban lehetőség van ennek a kiváltására. A beírásuk helyett, a felhasználónak kell az utasítások alapján az adott fájlt vagy mappát kiválasztani a kód futtatása elején.

Ettől függetlenül a listáknak a megalkotását minden modellenél el kell végezni, mivel a felhasznált attribútumok azonosítója modellenként eltérő.

Egy másik fontos fejlesztési lehetőség lehet a kimeneti Power BI fájl frissítése. Az alkalmazás tulajdonságaiból adódóan így is könnyedén cserélhetőek a képletekben használt értékek. Azonban erre is célszerű lenne egy külön funkció megalkotása a programkódon belül, amely a kód futtatása elején bekéri a felhasználótól a használni kívánt adatokat és azzal dolgozik tovább.

Ezekkel a változtatásokkal hatékonyabb lehet az időfelhasználás, mivel egyrészt az elérési útvonal megadása nem csak személyenként, de gépenként eltérő. Továbbá a veszteségekhez felhasznált értékek manuális adatbevitelének hibázási lehetőségét is csökkentené a második felsorolt pont.

A program fejlesztésének következő lépéseként szeretném beépíteni ezeket a funkciókat a parancssorba, ezzel megkönnyítve a felhasználók dolgát.

10.Összegzés

Dolgozatom célja egy olyan döntéstámogató alkalmazás fejlesztése volt, amely segíti a hálózatok kritikus és érzékeny elemeinek megtalálását. Ez segítséget nyújthat a különböző beavatkozások és fejlesztések megtervezésekor. Továbbá információt nyújt a kritikus elemekről, amelyek fontosságával nem vagyunk tisztában.

Az általam készített programkód egy Python alapú döntéstámogató alkalmazás, amely az előzetes szűrés eredménye alapján, forgalomnagyság figyelembevételével kiválasztja ezeket a szakaszokat és egy előre létrehozott Power BI fájlhoz kimentí a verziókhoz tartozó eredményeket. A célom nem a pontos paramétereknek a meghatározása volt, hanem maga az alkalmazás és programkód megalkotása.

Az általam készített Power BI sablon több szempontból is kiértékeli az egyes verziókat. Kiszámolja az alapállapothoz képest fellépő idővesztést a relációkhoz külön-külön és a teljes hálózat egészére. Továbbá a járművek által pluszban megtett km-ek alapján kiszámolja a légszennyezés és zajszennyezés mértékét. Majd ezekből az adatokból meghatározza a pénzben kifejezett értékeket is.

Az alkalmazás másik használatában a felhasználónak van lehetősége kiválasztani azt a maximum 5 szakaszt, amelynek kapacitását csökkentve meg szeretné figyelni a hálózaton történő változásokat.

A programkód tesztelését az EFM-en (Egységes Forgalmi Modell) végeztem, amelyhez szükség volt a modellt órás forgalmi igényre megfelelően átalakítani. Ehhez át kellett állítani a VDF függvényekben a „c” paramétert, illetve le kellett szorozni a ráterhelési mátrixokat. A kapott eredmények újboli kimentésével a bemeneti adattáblák frissítésével a kimutatások automatikusan frissülnek.

A tesztelés során kapott eredmények azt mutatják, hogy a programkód futtatása és alkalmazása működik, látható a bemeneti adattáblák értékei között is, hogy a kiválasztott szakaszok kapacitása le van csökkentve az adott verziókban.

A befolyásoló paraméterek pontos megadására egy további kutatás adhat eredményt, azonban az eredmény megtalálásakor a programkód paraméterezése és könnyű átíráhatósága miatt nem időigényes a módosítások végrehajtása.

Felhasznált irodalom

- [1] D. Grether, A. Neumann, és K. Nagel, „Simulation of Urban Traffic Control: A Queue Model Approach”, *Procedia Comput. Sci.*, köt. 10, o. 808–814, 2012, doi: 10.1016/j.procs.2012.06.104.
- [2] M. J. Alam, M. Ahsanul Habib, és K. Quigley, „Vulnerability in Transport Network during Critical Infrastructure Renewal: Lessons Learned from a Dynamic Traffic Microsimulation Model”, *Procedia Comput. Sci.*, köt. 109, o. 616–623, 2017, doi: 10.1016/j.procs.2017.05.367.
- [3] S. A. Zarghami és J. Dumrak, „Unearthing vulnerability of supply provision in logistics networks to the black swan events: Applications of entropy theory and network analysis”, *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, köt. 215, o. 107798, nov. 2021, doi: 10.1016/j.ress.2021.107798.
- [4] M. G. Cedillo-Campos, J. Piña-Barcenas, C. M. Pérez-González, és J. Mora-Vargas, „How to measure and monitor the transportation infrastructure contribution to logistics value of supply chains?”, *Transp. Policy*, köt. 120, o. 120–129, máj. 2022, doi: 10.1016/j.tranpol.2022.03.001.
- [5] S. Hosseini, N. Morshedlou, D. Ivanov, M. D. Sarder, K. Barker, és A. A. Khaled, „Resilient supplier selection and optimal order allocation under disruption risks”, *Int. J. Prod. Econ.*, köt. 213, o. 124–137, júl. 2019, doi: 10.1016/j.ijpe.2019.03.018.
- [6] D. Xia, Q. Li, Y. Lei, X. Shen, M. Qian, és C. Zhang, „Extreme vulnerability of high-order organization in complex networks”, *Phys. Lett. A*, köt. 424, o. 127829, febr. 2022, doi: 10.1016/j.physleta.2021.127829.
- [7] D. M. Scott, D. C. Novak, L. Aultman-Hall, és F. Guo, „Network Robustness Index: A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks”, *J. Transp. Geogr.*, köt. 14, sz. 3, o. 215–227, máj. 2006, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2005.10.003.
- [8] Q.-C. Lu, P.-C. Xu, és J. Zhang, „Infrastructure-based transportation network vulnerability modeling and analysis”, *Phys. Stat. Mech. Its Appl.*, köt. 584, o. 126350, dec. 2021, doi: 10.1016/j.physa.2021.126350.
- [9] S. Vivek és H. Conner, „Urban road network vulnerability and resilience to large-scale attacks”, *Saf. Sci.*, köt. 147, o. 105575, márc. 2022, doi: 10.1016/j.ssci.2021.105575.
- [10] European Commission. Directorate General for Mobility and Transport. és CE Delft., *Handbook on the external costs of transport: version 2019 – 1.1*. LU: Publications Office, 2020. Elérés: 2022. október 30. [Online]. Elérhető: <https://data.europa.eu/doi/10.2832/51388>
- [11] TRENECON COWI Kft., KÖZLEKEDÉS Kft., és FŐMTERV Zrt., „Egységes Forgalmi Modell (EFM) Modellezési és használati útmutató”. 2015. június.

Ábrajegyzék

1. ábra:.....	9
2. ábra:.....	10
3. ábra:.....	13
4. ábra:.....	14
5. ábra:.....	14
6. ábra:.....	15
7. ábra:.....	15
8. ábra:.....	16
9. ábra:.....	17
10. ábra:.....	18
11. ábra:.....	19
12. ábra:.....	25
13. ábra:.....	27
14. ábra:.....	28
15. ábra:.....	31
16. ábra:.....	33
17. ábra:.....	34
18. ábra:.....	36
19. ábra:.....	37
20. ábra:.....	38
21. ábra:.....	39
22. ábra:.....	40
23. ábra:.....	41
24. ábra:.....	42
25. ábra:.....	43
26. ábra:.....	44
27. ábra:.....	44
28. ábra:.....	45
29. ábra:.....	46
30. ábra:.....	50
31. ábra:.....	50
32. ábra:.....	51

33. ábra:.....	52
34. ábra:.....	53
35. ábra:.....	54
36. ábra:.....	55
37. ábra:.....	56
38. ábra:.....	57
39. ábra:.....	58
40. ábra:.....	59
41. ábra:.....	60
42. ábra:.....	61
43. ábra:.....	62

Táblajegyzék

1. táblázat:	21
2. táblázat:	22