



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Közlekedésmérnöki és Járműmérnöki Kar

Közlekedés- és Járműirányítási Tanszék

Gráf Tamás (LWPLSR)

CÉLFORGALMI MÁTRIX AKTUALIZÁLÁSA GENETIKUS ALGORITMUS SEGÍTSÉGÉVEL

TDK dolgozat

Konzulens: Dr. Tettamanti Tamás

2015. OKTÓBER 28.

Absztrakt

A célforgalmi mátrixok meghatározása számos alkalommal problémás feladatnak bizonyul a közlekedéstervezési gyakorlatban. Az egyes kialakult módszerek vagy túlságosan idő- vagy költségigényes adatfelvételi eljárásokat alkalmaznak, vagy bonyolult matematikai számítások eredményeként hoznak megoldást, vagy tényleges forgalmi adatok nélkül törekednek az értékek meghatározására. Ezen módszerek áttekintése után kijelenthetjük, hogy a témában számos megfelelően működő módszer létezik, az adott megoldáshoz tartozó hátrányokkal együtt élve, ugyanakkor van lehetőség a témakörben új eljárásokkal való kísérletezésekre. Erre a célra választottam a genetikus algoritmus alkalmazását, melynek működési mechanizmusa a természetből eredeztethető, ugyanakkor számos helyen használják optimalizálási feladatok megoldására, nem csak általános műszaki, hanem közlekedési területen is. Alkalmazása olyan területen célszerű, ahol nem feltétlenül van szükségünk a pontos, optimális megoldásra, elegendő egy közel optimális érték is, amilyen a kitűzött feladat jellege is.

A dolgozatom felépítése során elsőként a különböző célforgalmi adatfelvételeket tekintetem át, majd rátértem a célforgalmi mátrixok meghatározásának problémáira. Az egyes modellek osztályozása és rövid bemutatása során igyekeztem azon részleteiket bemutatni, amelyek ötleteket biztosítottak a feladat során alkalmazott módszer kialakításához. A genetikus algoritmus általános bemutatása után a módszer közlekedési alkalmazásait szemléltettem, az előző mondatban megfogalmazott irányelvet szem előtt tartva. A konkrét feladat megvalósítása során létrehoztam egy modellt a célforgalmi mátrixok pontosítására, bizonyos egyszerűsítések alkalmazásával, valamint egy virtuális hálózaton teszteltem az algoritmust. A feladatmegoldás során elvégeztem a modell paramétereinek optimalizálását és levontam a megfelelő következtetéseket.

Az algoritmus leprogramozása a MATLAB szoftver segítségével történt, míg a modellezett hálózatot a VISSIM szoftver alkalmazásával építettem fel.

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	3
2.	Célforgalmi mátrix meghatározása	4
2.1.	Adatfelvételi eljárások	5
2.1.1.	Hagyományos módszerek	6
2.1.2.	Rendszámrögzítéses adatfelvétel	7
2.1.3.	Modern célforgalmi adatfelvételek	9
2.2.	Modellek felépítése	9
2.3.	Célforgalmi mátrixok meghatározásának problémái	10
2.4.	Célforgalmi mátrixok meghatározására irányuló modellek csoportosítása	12
2.4.1.	Előzetes célforgalmi mátrix és útvonalválasztás	12
2.4.2.	Elméleti modellek	13
2.4.3.	Bemenő adatok	16
2.4.4.	Dinamikus modellek	17
3.	Genetikus algoritmus	18
3.1.	A genetikus algoritmusról általánosságban	18
3.2.	Genetikus algoritmus alkalmazásai a közlekedésben	20
3.2.1.	Autópálya forgalmak meghatározása	21
3.2.2.	Jelzőlámpás irányítás	21
3.2.3.	Közlekedési modellhálózat kalibrálása	24
3.2.4.	Csomóponti kialakítás tervezése	26
3.2.5.	Forgalomszámlálási pontok meghatározása	27
3.2.6.	Utazó ügynök problémája	28
4.	Célforgalmi mátrix meghatározhatóságának vizsgálata genetikus algoritmussal ..	29
4.1.	Az alkalmazott modell megfogalmazása	29
4.2.	A modell tesztelése	30

4.3. Eredmények, következtetések	36
5. Összefoglalás	38
6. Ábrajegyzék	39
7. Irodalomjegyzék	40
8. Mellékletek	44
8.1. MATLAB kód	44

1. Bevezetés

Forgalmi modellezés során szeretnénk feltárni egy adott közlekedési terület viselkedését a valóságban előforduló körülmények között. Ehhez különböző forgalomfelvételekre van szükség, melyek bizonyos költségekkel járnak, attól függően, hogy milyen vizsgálati módszert választunk. A modellezésben ismert négylépcsős tervezési folyamat egyik fontos alkotóeleme a célforgalmi mátrix. A célforgalmi (vagy honnan-hová) mátrixok előállítására több eljárás is ismert a tervezési gyakorlatban, ám ezen módszerek alkalmazása számos problémát vet fel. A korábbi évtizedekben sokan kíséreltek meg olyan eljárásokat alkalmazni a mátrix előállítására, amely kiküszöböli az említett problémákat, azaz egyszerre szolgáltat pontos, megbízható adatokat, költséghatékonyan. A forgalomfelvétel legegyszerűbb, legolcsóbb megoldása a keresztmetszeti forgalomszámlálás, ugyanakkor kutatások kimutatták, hogy egy általános közúti hálózaton kizárólag keresztmetszeti adatok ismeretében nem állítható elő egyértelműen a célforgalmi mátrix. Munkám témája ezzel összhangban egy korábbi, elavult célforgalmi mátrix aktualizálása, naprakész keresztmetszeti forgalomszámlálási adatok felhasználásával. A feladat megvalósításához genetikus algoritmust használok, amely egy általános optimalizáló eljárás, mely a természetből ismert evolúciós elméletet alkalmazza működése során. A MATLAB programban megírt algoritmus a keresztmetszeti adatok ismeretében, az elavult mátrix elemeit, mint kezdeti értékeket használva kiszámítja a keresett mátrix elemeinek értékét. A kapott mátrix validálása a VISSIM programban felépített teszhálózat segítségével kerül megvalósításra.

2. Célforgalmi mátrix meghatározása

A közlekedéstervezés során előszeretettel alkalmazzák a szakmában négylépcsős tervezési eljárásként ismert módszert. A honnan-hová irányuló mozgásokat a tervezés során egy ún. **célforgalmi mátrixban** rögzítjük, ahol egy adott cella értéke szimbolizálja az adott sor zónájából az adott oszlop zónájába irányuló forgalom mennyiségét.

Zones	1	2	...	j	...	n	Productions
1	T_{11}	T_{12}	...	T_{1j}	...	T_{1n}	O_1
2	T_{21}	T_{22}	...	T_{2j}	...	T_{2n}	O_2
⋮	⋮
	T_{i1}	T_{i2}	...	T_{ij}	...	T_{in}	O_i
⋮	⋮
n	T_{n1}	T_{n2}	...	T_{nj}	...	T_{nn}	O_n
Attractions	D_1	D_2	...	D_j	...	D_n	T

where $D_j = \sum_i T_{ij}$, $O_i = \sum_j T_{ij}$, and $T = \sum_{ij} T_{ij}$.

1. ábra: Célforgalmi mátrix

(http://www.civil.iitb.ac.in/tvm/1100_LnTse/204_InTse/plain/img3.png)

A négylépcsős tervezési folyamat az alábbi lépésekre osztható: [12] [26]

- Keltés
 - Kiinduló és beérkező forgalom meghatározása az egyes körzetekre.
 - Célforgalmi mátrix sor- és oszlopösszegeinek meghatározása.
- Megosztás
 - A forgalmak elkülönítése közlekedési módok szerint.
 - Célforgalmi mátrixok különválasztása közlekedési módok szerint. (Jelen tervezési feladatban a továbbiakban csak az egyéni közlekedés mátrixával foglalkozunk.)
- Szétoztás
 - Az egyes kiinduló körzetekből az egyes cél körzetekbe áramló forgalmak meghatározása.
 - Célforgalmi mátrix cella értékeinek kitöltése. (T_{ij})

- Ráterhelés
 - A körzetek közötti forgalmak megjelenése a hálózat útszakaszain.
 - Az egyes cella értékek ráterhelése a modellezett hálózatra.

A célforgalmi mátrix a közlekedéstervezési folyamat egyik legfontosabb eleme, éppen ezért rendkívül fontos, hogy a cellákban szereplő adatok pontossága megfelelő minőségű legyen. A különböző általánosan elterjedt célforgalmi adatfelvételi eljárások ugyanakkor ezt nehezen tudják garantálni. [24]

2.1. Adatfelvételi eljárások

„A közlekedési infrastruktúra hatékony üzemeltetéshez, fejlesztéséhez és a társadalmi igények mind költség-, idő- és energiatakarékosan történő kielégítéséhez nélkülözhetetlen a forgalom mennyiségének, összetételének, valamint az idő, valamint térbeli lefutásukat meghatározó közlekedési szokásoknak a megismerése.” [5]

Mindehhez szükségünk van az adott célnak megfelelő adatfelvételekre. A közúti keresztmetszeti forgalomszámlálás olcsóbb, egyszerűbb, könnyebben automatizálható és gyorsabb módja az adatfelvételnek, mint a célforgalmi adatgyűjtés. A számlálás legegyszerűbb megvalósítása az útburkolatba épített hurokdetektor segítségével történhet, mely egy adott keresztmetszetben méri a felette elhaladó járművek darabszámát, mely információ segítségével meghatározható az adott útszakasz forgalomnagyság értéke. [1] [13] [23]

Ugyanakkor a keresztmetszeti forgalomszámlálás nem képes teljes körűen helyettesíteni a célforgalmi adatfelvételeket. Ahhoz, hogy ez megvalósítható legyen, kiegészítő információra van szükség, ez lehet valamilyen előzetes információ a hálózatról vagy a közlekedők viselkedését magukban foglaló feltételezések. [5] [8] [21]

Célforgalmi adatfelvételre elsősorban az egyes utazási mintázatok megismerése céljából van szükség egy adott tervezési területen. Négy különböző helyváltoztatást különböztetünk meg, egy honnan-hová mozgásokon alapuló tervezés esetén: [9]

- átmenő utazások,
- külső-belső utazások,
- belső-külső utazások,

- belső-belső utazások.

A célforgalmi mátrixok fontos követelménye a tervezés során, hogy naprakészek legyenek, ennek érdekében olyan módszert szükséges találni az adatfelvételre, amely bizonyos időközönként újból elvégezhető. Egy teljes körű lakossági felmérés ugyanakkor nem tartozik az egyszerűen kivitelezhető adatfelvételek közé. [6]

A négylépcsős tervezés során a szétosztási lépésben a cellák értékeinek kitöltése célforgalmi adatfelvételek nélkül meglehetősen nehéz feladat. Az olyan országokban, ahol a célforgalmi adatfelvételek automatizálása kevésbé megoldott, nagyobb létjogosultsága lehet egy olyan algoritmusnak, amely a könnyebben mérhető keresztmetszeti adatokból képes megbecsülni a célforgalmi mátrix elemeit. [22] [26]

A feladat megvalósítása során törekedtem egy olyan megoldás kidolgozására, amely a fenti állításnak megfelel.

2.1.1. Hagyományos módszerek

Hagyományos célforgalmi adatfelvételi módszerek között az alábbiakat sorolhatjuk fel: [24]

- Telefonos interjú,
- Útmenti, megállítási interjú,
- Rendszámrögzítéses forgalomszámlálás.

A módszerek közül utóbbival egy későbbi részfejezetben részletesebben foglalkozom.

A gyakran alkalmazott, **útmenti megállítási kikérdezés** hátránya, hogy rendőri jelenlét nélkül nem elvégezhető, valamint helyszínenként maximum 4-5 jármű állítható meg egy időben. A tapasztalatok szerint ezzel a módszerrel legfeljebb 600 jármű adatait rögzíthetjük egy nap alatt. Továbbá a kikérdezés során a válaszadó által szolgáltatott információk könnyen hibával terheltek lehetnek, mely hibák felfedése rendkívül nehéz folyamattá válhat. [6] [13]

[5] szerint a célforgalmi mátrix hagyományos – kikérdezéses – módszerrel történő előállításának módszerei összefoglalva:

	Előny	Hátrány
Postai leveles kérdőív	Viszonylag olcsón eljuttatható az alanyokhoz	Költségesebb előkészítés, alacsony visszaküldési ráta
Útinaplók	Egyik legpraktikusabb módszer	Szűkebb kör alkalmas rá. Kellően nagy elemszámnál lassabb feldolgozás
Telefonos felmérés	Főleg automatikus esetén, olcsón sok helyre lehetséges	Sok félbeszakadt interjú, növekvő mobiltelefon használat bizonytalanabbá teszi
Személyes interjú (háztartásfelvétel vagy kordonponti kikérdezés)	Legbiztosabb, legpontosabb eredményt éri el	Időigényes, meglehetősen költséges, csökkenő helyre tud eljutni

2. ábra: Személyforgalmi felvételek típusai [5]

2.1.2. Rendszámrögzítéses adatfelvétel

Az 1950-es évek óta ismert, hogy statikus célforgalmi adatok gyűjtésére a **rendszámrögzítéses** technika kiválóan alkalmazható. [2]

Napjainkban négy különböző rendszámrögzítési technikát ismerünk: [3]

- Manuális megoldás (papír, toll vagy diktafon)
 - Előnye: olcsó, nincs szükség felszerelésre.
 - Hátránya: fárasztó munka, kifejezetten nagyobb forgalmú utak esetén.
- Hordozható készüléken történő rögzítés
 - Előnye: gyorsabb adatrögzítés
 - Hátránya: adatrögzítés pontossága romolhat
- Tervezési terület videóra vétele, majd manuális elemzése
 - Előnye: bármikor visszanezhető felvételek, amely segítségével a forgalom más jellemzői is megfigyelhetők
 - Hátránya: az adatrögzítők munkáját nem váltja ki, fárasztó, koncentrációigényes tevékenység
- Videofelvétel automatikus rendszámfelismerő algoritmussal kiegészítve
 - Előnye: alacsonyabb adatfeldolgozási idő, hatékony megoldás
 - Hátránya: drága, „outsourcing”-ot igénylő technológia, környezeti körülményekre érzékeny megoldás

A rendszámrögzítéses technika előnyei és hátrányai a következők: [3]

- Előnyök:
 - Nagy számú minta áll rendelkezésre.
 - Egy adott időszokról folyamatosan rendelkezésre állnak adatok.
 - Mérési pontok könnyen áthelyezhetőek.
- Hátrányok:
 - Kizárólag a mérési pontokon jutunk adatokhoz.
 - Az adatfelvételt végző személyek, kamerák száma korlátozza az adatgyűjtést.
 - Nagy sebességű utakon és kis forgalomsűrűségű útszakaszokon nem javasolt az alkalmazása.
 - Nem megfelelő pontosságú adatok.
 - Manuális esetben megfelelően képzett személyzet szükségeltetik.

Korábbi kutatások kimutatták, hogy a rendszámrögzítéses adatok felhasználhatóságához legalább 50 rendszám párt szükséges azonosítani a feldolgozás során. Annak az esélye, hogy egy adott rendszám párja is megjelenik a rendszerben 5-20% körül alakul és az alábbi paramétereiktől függ:

- távolság a két mérési pont között,
- csomópontok, útvonalak száma,
- átmenő és cél/eredő forgalom aránya,
- feldolgozás módja, algoritmus.

A fenti adatokból következik, hogy egy megfelelő minta előállításához, egy adott mérési ponton 400-700 rendszámot szükséges óránként rögzíteni. [3]

Hatékonysági és személyiségvédelmi okokból kifolyólag a rendszám rögzítése során a gyakorlatban nem a teljes rendszámot olvassák le a számlálók, csak bizonyos számú karaktert. Ez gyorsítja a folyamatot, ugyanakkor bizonyos mértékű hibát visz a rendszerbe, hiszen megvan az esélye, hogy két egyedi azonosító egyezővé válik. Automatizált rendszerek esetében megvalósítható a teljes rendszám leolvasása, ugyanakkor itt sem garantálható a 100%-os pontosság, többek között a nem megfelelő fényviszonyok vagy a kitakarás miatt. [2]

Rendszámrögzítéses adatfelvételnél az adatok pontosságát befolyásolja, hogy

- a felvett adatok hibával terheltek (kimutatták, hogy bizonyos karaktereket a számlálók gyakrabban olvasnak félre),
- bizonyos utazások nem fejeződnek be a vizsgálati időtartam alatt. [1] [2]

Ugyanakkor hiába hibával terhelt ez a típusú adatfelvétel, forgalomszámlálási adatokkal kiegészítve megfelelő alapot nyújthat a tervezéshez. [2]

2.1.3. Modern célforgalmi adatfelvételek

Napjainkban használnak már FCD (Floating Car Data) adatokat is célforgalmi mátrixok előállítására, de ez a módszer leginkább az egyéni közlekedés mátrixa esetében elterjedt. [5]

Szintén napjainkban terjedő megoldás az automatikus jármű azonosítás (AVI – Automated Vehicle Identification), amely történhet az alábbi módokon: [2]

- jármű felszerelve fedélzeti egységgel,
- automata rendszámrögzítő berendezésekkel,
- jármű trajektória automatikus továbbításával.

2.2. Modellek felépítése

Egy **forgalmi modell** a valós hálózat tulajdonképpeni absztrakciója. Fontos, hogy ezek a modellek egyszerűek, könnyen kezelhetőek és átláthatóak legyenek, hogy alkalmazásukkal nehéz döntéseket is gyorsan és egyszerűen meg lehessen valósítani. [20]

Közlekedéstervezés során a forgalmi modellezésnek első lépésként a jelenlegi állapot rekonstruálására kell koncentrálnia, majd a jövőbeli igények és tervezett változások figyelembe vételével szükséges kiválasztani a legmegfelelőbb változatot. Ahhoz, hogy a modell eredményeit elfogadjuk, szükséges a valós értékek alapján elvégzett kalibrálás folyamata. Ennek során a modell kimenő adatait hasonlítjuk össze a valóságban mért adatokkal, és regisztráljuk az értékek közötti eltérést. Amennyiben ez egy adott határérték alatt marad, a modellt hitelesnek tekinthetjük. [12]

Két részre oszthatjuk a különböző alkalmazott modelleket: [1]

- **optimalizációs modellek**, melyek a valóságban mért adatok és a modell értékek közötti eltérést igyekeznek minimalizálni,
- **statisztikai modellek**, melyek a naponta változó forgalom miatt, az utazási igényekből indulnak ki.

A statisztikai modellek használatát támasztja alá az alábbi felvetés. Általános tervezési megoldás, hogy egy útszakasz forgalmát kizárólag egy adott forgalomnagyság értékkel jellemezzük, ugyanakkor ez a megoldás nem kielégítő, mivel ez az érték óráról-óra, napról-napra, hónapról-hónapra változik. Megfelelő adatok használatához célszerűbb több számlálás adataiból egy átlagos értéket kiszámítani, amely a tervezés alapja lehet. A kérdés az, hogy mekkora mennyiségű adat felvétele után mondhatjuk azt, hogy az már elegendő a tervezéshez. [4]

A feladat során egy olyan eljárás megvalósítására törekedtem, amely nem csak egy adott időpontban végzett forgalomszámlálás eredményeinek felel meg, hanem a vizsgált (tesztelt) közlekedési környezetre általánosságban használható. Ennek érdekében adott volt egy könnyen alkalmazható, egyszerű modell megalkotása.

Célforgalmi mátrix meghatározására irányuló modellezés esetében a modell eredménye az útvonalak forgalma, melyekből vissza tudjuk következtetni a célforgalmi mátrix elemeit, és az egyes útszakaszok forgalmát is. Egy adott útvonal bizonyos számú vizsgált útszakaszból áll össze. [1]

2.3. Célforgalmi mátrixok meghatározásának problémái

A célforgalmi mátrix előrebecslése egy **alulhatározott probléma**, mivel az ismeretlen elemek – célforgalmi mátrix celláinak – száma meghaladja az ismert elemek – forgalomnagyság értékek a hálózat szakaszain – számát. Ezt azt jelenti, hogy egy adott forgalomszámlálási eredmény sorhoz végtelen sok optimális mátrix passzolhat. [1] [24]

Hagyományos esetben a modellezés során forgalmi igényeket leíró célforgalmi mátrixot terheljük rá a modellezett hálózatra, így kapjuk meg az egyes útszakaszok forgalomnagyság értékeit. Esetünkben a ráterhelési probléma inverzét szükséges megoldani, azaz **határozzuk meg a célforgalmi mátrix elemeinek értékét, a szakaszok forgalmi adatainak ismeretében**. A feladat nehézségét a fentiekben már tárgyalt

alulhatározottság adja, hogy egy adott adatsor ismeretében nem határozható meg egyértelműen a keresett mátrix. [8]

[13] szerint „*a teljes rendszer folyamváltozóinak megállapítása nem szükséges ahhoz, hogy a célforgalmi mátrix elemeit ki lehessen számolni. Mivel a mátrix elemei lineáris kombinációi a folyam változóknak, elég megvizsgálni a mérések által kifeszített lineáris altér és a célforgalmi mátrix elemei által kifeszített altér viszonyát.*”

Amennyiben a járműfolyamok közötti összefüggést leíró és az élek és utak kapcsolatát leíró mátrixok összefűzéséből képzett mátrix rangja megegyezik az utóbbi mátrix rangjával, egyértelműen meghatározható a célforgalmi mátrix. [13]

Ez az eset ugyanakkor csak speciális úthálózatokra áll fent, így jelen feladat során - általánosan használható megoldásra törekedve – kijelenthetjük, hogy **kizárólag forgalomszámlálási adatok felhasználásával nem állítható elő egyértelműen a célforgalmi mátrix**. Ugyanakkor ez azt is jelenti, hogy keresni kell olyan extra információt a hálózatról, amely lehetővé teszi a feladat egyértelmű megoldását.

A honnan-hová lefedettségi szabály teljesüléséhez elengedhetetlen, hogy minden kiinduló és cél zóna között legalább egy helyen vizsgáljuk a forgalmat. Minél több helyen tesszük ezt meg, annál pontosabbak lesznek az adatok, ugyanakkor a költségek is emelkednek. A feladat megtalálni az adatgyűjtésre kiválasztott útszakaszok optimális számát. Az ilyen feladatok során áll elő az ún. **trade-off szituáció**. [1]

Rendszámrögzítéses adatok segítségével egyértelműen előállítható egy célforgalmi mátrix az adott hálózatra, ugyanakkor kizárólag az útszakaszok forgalomnagyságait ismerve ez az állítás nem minden esetben áll fent. Egy adott hálózat forgalomszámlálási eredményeit ugyanis több mátrix is kielégítheti. Amennyiben csak forgalomszámlálási adatok segítségével szeretnénk előállítani célforgalmi mátrixot, erős feltevésekkel kell élni a forgalom generálódását illetően. [1] [2]

Az új megvalósítandó cél lehet nem feltétlenül a valóságban megjelenő útvonalak rekonstruálása, de egy olyan ún. „**legjobb**” **mátrix megalkotása**, mely megfelelő mértékben passzol a keresztmetszeti forgalomszámlálási eredményekhez. [2]

Egy célforgalmi mátrix előállítása hagyományos módon (rendszámrögzítéses módszer, kikérdezéses módszer) rendkívül költséges és bonyolult folyamat lehet. Ugyanakkor a

keresztmetszeti forgalomszámlálási adatokat megfelelő információkkal kiegészítve költségkímélőbb módszerekkel kaphatunk egy megfelelő minőségű célforgalmi mátrixot. [8]

2.4. Célforgalmi mátrixok meghatározására irányuló modellek csoportosítása

A célforgalmi mátrix előállítására alkalmazott algoritmusok alapvetően három különböző elv szerint csoportosíthatóak. [20]

- Útvonalválasztás metódusa.
- A felhasznált elméleti modell.
- Szükséges bemenő adatok.

2.4.1. Előzetes célforgalmi mátrix és útvonalválasztás

A különböző célforgalmi mátrixok meghatározására felépített modellek az alábbiak szerint különíthetők el, további szempontok alapján: [8]

- Használ-e a módszer egy ún. **iránymutató célforgalmi mátrixot** (pl. egy az adott hálózatra érvényes, elavult mátrixot)? Ez a mátrix származhat akár kérdőíves kikérdezésből is, de lehet egy korábban alkalmazott algoritmus eredménye is, a lényeg, hogy felhasználhatóak a mátrixban található strukturális információk, melyek a hálózatot jellemzik. [11] [24]
 - [1] szerint amennyiben nincsenek korábbi adataink az útvonalak forgalomnagyságát illetően, úgy kell megválasztani a mátrix celláinak értékeit, hogy a forgalomszámlálásból adódó értékektől térjünk el, de ne túl jelentős mértékben.
- Figyelembe veszi-e az úthálózaton kialakult torlódásokat, ez alapján megkülönböztetünk [21]
 - **Arányos ráterhelést**, ahol a közlekedők útvonalválasztását nem befolyásolja az útszakaszok terhelése. Tanulmányok vizsgálták, hogy amíg egy hálózat nem válik túlszűfolttá, a közlekedőket nem befolyásolja az útvonalválasztásban az adott útszakasz forgalomnagysága. [29]

- **Egyensúlyi ráterhelést**, ahol egy adott útszakasz költsége függ a rajta megjelenő forgalom nagyságától. Ebben az esetben teljesülnie kell Wardrop elvének, miszerint egyensúlyi helyzetben egy közlekedő sem tudja csökkenteni a saját költségét azáltal, hogy másik útvonalat választ magának.

2.4.2. Elméleti modellek

[11] az alábbiak szerint osztályozza a célforgalmi mátrix előrebecslő eljárásokat:

- Egyszerű módszerek
 - Növekedési tényezős módszer
 - Hátránya: Nem képes megváltoztatni a zéró elemű cellákat, valamint rugalmatlan a közlekedési rendszer változásait illetően.
 - Arányos módszer
 - Az utazások költségét is figyelembe veszi, melyet a növekedési tényezős módszer még nem tesz meg.
- Elméleti módszerek
 - **Gravitációs modellek**
 - Két körzet közötti utazások mennyiségét befolyásolja a népességszám, a munkahelyek és iskolák száma, valamint fordítottn a két zóna közötti távolság.
 - Fontos a modell kalibrálása.
 - A modell alkalmazásával felhasználhatjuk az egyes zónák lakossági adatait a feladat megoldására. A módszer hátránya, hogy túlságosan erősen veszi figyelembe a demográfiai adatokat, a forgalomszámlálási adatok kárára, valamint, hogy nem képes pontosan kezelni az átmenő utazásokat. Előbbi hátrány kiküszöbölésére alkalmazható például az információ minimalizáló vagy az entrópia maximalizáló eljárás. [10] [21]
 - Az Országos Célforgalmi Mátrix elkészítése során a lakossági kikérdezéses adatokat a gravitációs modell szerint szétosztva kapták a készítő a megfelelő célforgalmi mátrixot eredményül. [6]

- Számoláson alapuló módszerek
 - Az általam alkalmazni kívánt módszer is ebbe a csoportba tartozik. A keresztmetszeti forgalomszámlálási adatokon alapuló módszerek legfőbb előnye az olcsó adatgyűjtési technika.
 - Ilyen típusú módszerek még:
 - Általános legkisebb négyzetek módszere (GLS)
 - Információ minimalizálás (IM)
 - Entrópia maximalizálás (EM)

[8] szerint a célforgalmi mátrix előállítására alkalmazott eljárásokat három különböző csoportba osztjuk:

- Közlekedési modellen alapuló eljárások
 - **Információ minimalizáló módszer**, melynek lényege, hogy a keresztmetszeti forgalomszámlálási adatokra támaszkodva a segéd célforgalmi mátrixból, csak a feladat megoldhatóságát elérendő minimális információt teszi hozzá. Ugyanakkor a módszer nem veszi figyelembe, hogy a forgalomszámlálási adatok sok esetben hibával terheltek. [10]
 - **Entrópia maximalizáló módszer**: Azt tekinti a legvalószínűbb célforgalmi mátrixnak, mellyel a legnagyobb számú mikro-állapot összekapcsolható, azaz a célfüggvény az állapotok maximalizálása. [21]
- Statisztikai eljárások
 - **Maximális valószínűség módszere (ML)**
 - **Általános legkisebb négyzetek módszere (GLS)**
 - Bayes-féle interferencia módszer
- Gradiens alapú megoldások

A fenti kategóriák közül a továbbiakban elsősorban a közlekedési modellen alapuló és a statisztikai eljárásokkal foglalkozom dolgozatomban.

A jelzett forrásban szereplő példában egy nagyobb város részhálózatának célforgalmi mátrixának meghatározása volt a feladat. Mivel tudjuk, hogy a feladat alulhatározott, ezért szükség van valamilyen többlet megoldásra, mely a vizsgált tanulmány szerint a következő lehet. [20]

- Entrópia maximalizálással történő egyensúlyi ráterhelés a teljes városi hálózatra, majd ez alapján aggregálás segítségével a városrész célforgalmi mátrixának meghatározása.
- A teljes városi hálózatra történő ráterhelésből adódó forgalmak szolgálnak az entrópia maximalizálású módszer bemenetétül, melynek kimenete a keresett részhálózati célforgalmi mátrix.

A második módszer előnye, hogy hozzáférhető forgalmi adatokkal dolgozik, valamint számítási gyorsasága is magasabb. Az alábbi feltételezésekkel éltek az alkotók a modell felépítése során. [20]

- A hálózat minden csomópontja lehet cél- és kiinduló pont is.
- A célforgalmi mátrix értékei függetlenek a hálózat változásaitól.
- A hálózatról történő adatgyűjtési módok közül modell csak a mért keresztmetszeti forgalmakra támaszkodik.

Ugyanakkor a korábbiakban tárgyaltak szerint, amennyiben csak keresztmetszeti adataink vannak a hálózatról, további feltevések valamint bonyolult számítások alkalmazására van szükség. A forrásban alkalmazott példa az entrópia maximalizálás megvalósítását a Frank-Wolfe algoritmus segítségével végzi el. Ugyanakkor ez a példa azért is került bemutatásra a dolgozatomban, mert az ellenőrzés során az algoritmus által megalkotott részhálózati mátrix ráterhelésének forgalmi eredményeit hasonlítja össze a teljes városi ráterhelés eredményeivel. [20]

Hasonló értékelési módszert kívánok én is használni a dolgozatomban a VISSIM szimulációs környezet alkalmazásával.

[29]-ben került tesztelésre a maximális valószínűség és az általános legkisebb négyzetek módszere. Az előbbi módszer nagy általánosságban jobban teljesített a teszteken, leginkább azokban az esetekben, amikor nagy mennyiségű számlálási adat mellett nem állt rendelkezésre információ az előzetes mátrixszal kapcsolatban. A tesztelést három különböző előzetes információ szimulálásával végezték, melyek a következők voltak:

- Előzetes információ hiánya.
- Az előzetes mátrix és a mért forgalmak között kismértékű eltérés tapasztalható, de a forgalom mintázata megegyezik.

- Az előzetes mátrix és a mért forgalmak között kismértékű forgalomnövekedés tapasztalható, és a forgalom mintázata is megváltozott.

Értelemszerűen a második és a harmadik eset összevetésében a második számú produkál jobb eredményeket, ugyanakkor a tesztek arra is rávilágítottak, hogy az első eset homogén előzetes mátrixa a maximális valószínűség módszer használata esetén jobb eredményekkel zárt, mint a harmadik eset mátrixa. [29]

Alkalmazznak még hagyományos becsülő statisztikai algoritmusokat: [2]

- Csökkentett korlátú legkisebb négyzetek módszere (DCLS)
 - A DCLS módszer előnye a viszonylag könnyű implementáció, ugyanakkor hátránya is egyszerűségéből adódik, ugyanis a probléma részleteinek leírására nem alkalmas.
- Kálmán szűrő
- Bayes-féle optimalizáció

2.4.3. Bemelő adatok

[7]-ben szereplő módszer egy egylépéses célforgalmi mátrix generáló algoritmus, amely nem igényel kikérdezéses adatokat. A modell ötféle adattal dolgozik:

- útvonalak ellenállása két zóna között,
- egyes zónák szociodemográfiai jellemzői,
- zónák közötti forgalmak,
- bizonyos útvonalak forgalmai,
- egy adott zónából kiinduló és oda érkező forgalmak.

A fenti modell előnye, hogy a kérdőíves adatokhoz képest sokkal könnyebben hozzáférhető kiinduló adatokból dolgozik.

[21]-ben tesztelésre került egy olyan eljárás, amely bizonyos számítási módszerek segítségével, kizárólag keresztmetszeti forgalmi adatokból kiindulva, az előzetes mátrix értékeit cellánként egyaránt 50-re választva oldja meg a felmerülő problémát. A felhasznált módszer előnyei a következők: [21]

- A modell igyekszik minden elérhető információt felhasználni a keresztmetszeti forgalomszámlálás adataiból.
- Az előzetes mátrix alkalmazásával beépíthetők a modellbe olyan információk, melyeket a számlálási eredmények nem tartalmaznak.
- A modell jól használható kisebb területekre is, ahol a hagyományos módszerekkel (pl. gravitációs eljárás) nehezen igazolhatók az útvonalválasztások.

2.4.4. Dinamikus modellek

Célforgalmi mátrixok ugyanakkor nem csak statikus, hanem dinamikus módon is előállíthatók. Léteznek továbbá két szintű programozási feladatok is, ahol a felső szinten történik az utazások mátrixának kiszámítása, az alsó szinten pedig egy hálózati ráterhelési probléma jelenik meg. Ezek az összetett feladatok többek között genetikusan algoritmus segítségével is realizálhatóak. Dinamikus célforgalmi mátrix becslés megvalósítható többek között állapotter modellt vagy Kálmán szűrő segítségével. Ugyanakkor az ismertett probléma dinamikus megoldása egyelőre csak kis hálózatok esetében megoldott. Ugyanis a dinamikus célforgalmi mátrixok problémája olyan összetett feladat, hogy nagyobb hálózatok esetében is a probléma egyszerűsítésének érdekében az útvonalválasztásokat statikusnak és előre megadottnak tekintik. [10] [27]

3. Genetikus algoritmus

A genetikus algoritmus a természetből ismert folyamat alapján írja le egy adott rendszer működését. Célforgalmi mátrix meghatározására ismert ugyanakkor másik természetből vett minta alapján felépített algoritmus is, mely a központi idegrendszer szerkezetét veszi alapul, és komplex feladatok megoldásában kap szerepet. [26]

3.1. A genetikus algoritmusról általánosságban

A genetikus algoritmus egy olyan optimalizációs eljárás, melynek működési elve sokban hasonlatos az evolúcióhoz. Az eljárás sikerére a garancia, hogy amennyiben sikerül a természetben előforduló evolúció működését megfelelően leírni, az algoritmus a várt eredményt fogja produkálni, ahogy azt a természetben is tapasztalhatjuk. A továbbiakban részletesebb bemutatásra kerülnek a genetikus algoritmus összetevői és függvényei.

A genetikus algoritmus az evolúcióhoz hasonlóan egyedekkel dolgozik. Az **egyedek** típusai közül meg kell említenünk a csak bináris (0 vagy 1) értékeket tartalmazó bitsorozatot, vagy a vektoros felépítésű egyedek lehetőségét. Fontos paraméter az algoritmussal kapcsolatban a változók száma, ugyanis ez adja meg a bitsorozat elemeinek számát vagy a vektor dimenzióját. Mivel a feladat célja optimalizáció, az algoritmus működésének végeredménye az optimális egyed megtalálása. [30]

Ugyanakkor, mint a természetben is, az egyedekre nem külön-külön tekintünk, hanem mint a belőlük összeálló **populáció** tagjaira, a populáció egyedeinek száma szintén az algoritmus fontos paramétere. Növelésével az eredmény pontossága javítható, ugyanakkor nagyobb méretű populációk esetén a futási idő jelentősen megnőhet. [30]

Természetesen az idő előrehaladtával minden populáció változik, csak az egyedek mennyisége marad állandó, a megváltozott populációt egy új **generációnak** nevezzük. Egy új generáció kialakulása összetett jelenség, a továbbiakban az alapvető lépések kerülnek részletezésre egy generáció kialakulása során. Egy új generáció új egyedének kialakulásához szükség van két egyedre (szülőre) a jelenlegi populációból. [30]

Első lépésben a **szelekció** folyamatáról kell említést tenni, amely meghatározza, hogy az adott populáció elemei, milyen módon és mértékben jelenjenek meg az újabb generáció során. A szelekció megvalósítása a következők szerint történhet: [30]

- Véletlen kiválasztásos szelekció
- Rátermettség-arányos szelekció
- Sztochasztikus univerzális mintavétel (hasonló a rátermettség-arányos változathoz, de csökkenti az azonos egyedek többszöri kiválasztásának esélyét)
- Lineáris rangsorolás (a kiválasztás valószínűsége a rátermettségi rangsorban elfoglalt helytől függ)
- Pár-verseny szelekció (két egyed közül mindig a rátermettebb választása)

Második lépés a **rekombináció** lépése, amely az újonnan keletkező (születő) egyedek kialakításának módszerét határozza meg. A rekombináció során az alábbi megoldások kerülhetnek előtérbe: [30]

- Egy pontos keresztezés (az adott pont határozza meg, hogy az öröklött tulajdonságok mely halmaza származik az adott szülőtől)
- Egyenletes keresztezés (az egyes tulajdonságok 50-50 % eséllyel öröklődnek az egyik vagy másik szülőtől)
- Köztes keresztezés (az utód tulajdonságai a szülők tulajdonságainak függvényei)

A harmadik lépés a **mutáció**, melynek során az egyedek bizonyos tulajdonságai egy adott valószínűséggel megváltoznak. Ugyanakkor a mutáció alkalmazása csak megfelelő körülményekkel végezhető, ugyanis a korábbi lépések hatékonyságát csökkentheti a nem megfelelően paraméterezett mutációs függvény. [30]

Az algoritmus alkalmazása során meghatározhatunk adott korlátozó feltételeket, amelyek teljesülését minden egyed esetében megköveteljük, ezek lehetnek lineáris és nemlineáris egyenlőségek vagy egyenlőtlenségek, valamint alsó és felső korlátok. Továbbá meghatározhatunk feltételeket arra vonatkozóan is, hogy az algoritmus milyen esetben szakítsa meg működését, és az aktuális legjobb egyedeket válassza optimális megoldásnak. Ilyen kilépési feltételek lehetnek többek között az alábbiak is: [30]

- Adott generációs szám elérése
- Adott futási idő elérése

- Adott rátermettség érték elérése
- Rátermettség értékének változása kisebb mint a függvény toleranciája
- Korlátozó feltételek túl nagy mértékű megsértése

Korábban részletezésre került, hogy az egyedek rátermettségének meghatározása fontos feladat, tulajdonképpen a genetikus algoritmus alapvető működésének egyik legfontosabb eleme. A rátermettség értékét az úgynevezett **fitnessz függvény** határozza meg az adott populáció összes egyedére, majd ezekből választja ki az algoritmus a legkisebb fitnessz értékkel rendelkező egyedet. Amennyiben egyik kilépési feltétel sem teljesül, újabb generáció kerül létrehozásra a korábban bemutatott lépések alapján, az új egyedek fitnessz értékeinek meghatározásával. [30]

A genetikus algoritmus működési folyamata az alábbi 5 lépésből tevődik össze: [25]

- Kódolás
- Kiértékelés
- Keresztezés
- Mutáció
- Dekódolás

A genetikus algoritmusok esetében a legfontosabb jellemző az ún. fitnessz függvény, mivel az egyes megoldások a függvény szerint számított értékei alapján hasonlíthatók össze, valamint a fitnessz függvény egyedileg definiálható az éppen aktuális problémára. [17]

3.2. Genetikus algoritmus alkalmazásai a közlekedésben

A genetikus algoritmus alkalmazása során az első és egyik legnehezebb lépés a probléma kódolása, azaz a kromoszómák meghatározása, melyek kiválasztása során célszerűbb a hálózatot alapul venni, mint az egyes útvonalakat kódolni. Az útvonalak értékelése a dekódolást követő fitnessz értékek összehasonlításával adódhat. [24] [25]

A keresztezés és a mutáció műveletek sajátosságait az adott probléma ismeretében célszerű testre szabni, az ismert megoldások közül nem emelhető ki egy általánosan legjobbnak mondható eljárás. [25]

A genetikus algoritmus megfelelő paraméterek mellett gyors futási teljesítményt biztosít, ám nem garantálja a legjobb megoldás megtalálását, csak egy ahhoz közeli optimumot. [18] [25]

3.2.1. Autópálya forgalmak meghatározása

Genetikus algoritmust alkalmaztak már célforgalmi mátrixok előállítására, az alábbi példában különböző ITS eszközök adataiból kiindulva, autópálya környezetben. Az ITS eszközök elterjedésével az offline és az online adatok mennyisége és hozzáférhetősége is jelentősen megnőtt. Ez lehetővé tette, hogy a megnövekedett adatmennyiséghez különböző, korábban már említett módszereket társítva elérhetővé váljon egy célforgalmi mátrix előállítása kikérdezéses adatfelvétel nélkül. A tesztelési környezet egy autópálya szakasz volt, le- és felhajtókkal kiegészítve. A módszer az utazási idők és a szakaszok forgalomsűrűségeinek figyelésével dinamikus módon optimalizálja az adott forgalmi szituációt. Vizsgáljuk meg a felhasznált genetikus algoritmus paramétereit, melyek amennyiben megfelelően teljesítenek a tesztkörnyezetben, átültethetőek saját feladatunk megoldására. [19]

- Bináris kódolás alkalmazása.
- Rulett szelekció alkalmazása. (Minél nagyobb egy egyed fitnessz értéke annál nagyobb valószínűséggel kerül kiválasztásra.)
- Populáció száma: 80
- Maximális generációk száma: 200
- Egyponos keresztezés alkalmazása (0,6-os valószínűség értékkel)
- Mutációs valószínűség: 0,04

Az elvégzett vizsgálatok bizonyították az algoritmus pontosságát, robusztusságát és hatékonyságát a felmerülő problémát illetően. [19]

3.2.2. Jelzőlámpás irányítás

Genetikus algoritmus segítségével megvalósítható olyan jelzőlámpás irányítás, amely magas forgalmi telítettség mellett is képes megfelelő mértékben lebonyolítani az adott csomópont forgalmát, melyre a hagyományos módon optimalizált programok nem képesek. Az alkalmazott módszer nem a megszokott megoldásokat használja, hanem

valós idejű adatokat felhasználva kínál dinamikus megoldást a problémára. A vizsgált feladatban egy kétpólusú optimalizálási problémát kell megoldani, párhuzamosan maximalizálva az átbocsátott járművek számát, és minimalizálva a kialakuló sorhosszakat, melyek hatására kialakuló visszatörlesztés drasztikus következményekkel járhat egy túlszűfolt hálózaton. Ennek érdekében a genetikus algoritmus génjeinek valós számokat választottak, melyek az egyes fázisok zöldidejeit szimbolizálják, ezek az értékek lesznek az algoritmus kimenő értékei. A feladat során a fázissorrendet előre definiáltként kezelték, csak az egyes fázisok hosszát számította ki az algoritmus. Az optimalizálandó függvények az alábbiak voltak: [14]

$$O_c = \max \sum_{i=1} (\omega_i \cdot n_i (g_i, C, t)),$$

3. ábra: Átbocsátandó járművek maximalizálásának függvénye [14]

ahol

ω_i súlyozó tényező

n_i pedig az átbocsátott járművek száma, amely függ a zöldidő hosszától (g_i), a periódusidőtől (C), valamint az időtől (t)

$$O_l = \min \frac{1}{p} \sum_{p=1}^p \frac{\text{len}_p}{L_p},$$

4. ábra: Sorhossz minimalizálás függvénye [14]

ahol

p a fázisok száma

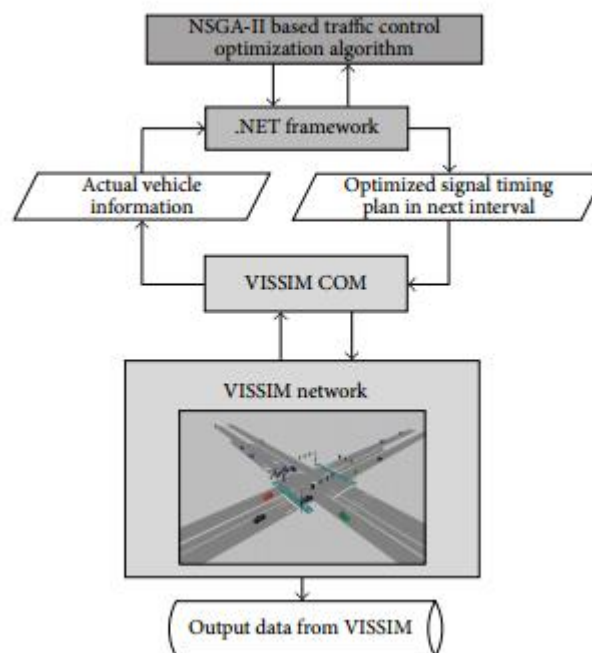
len_p a p -edik fázis során kialakuló sorhossz

L_p az adott fázis esetén maximálisan elfogadható sorhossz

Az algoritmus tesztelése 50 és 100 generáció futtatásával történt, 4, 5 és 8 gén alkalmazásával. Természetesen a gének és a generációk számának növekedésével a futási idő is nőtt, mint ahogyan a feladat megvalósításának komplexitása is. A tapasztalatok

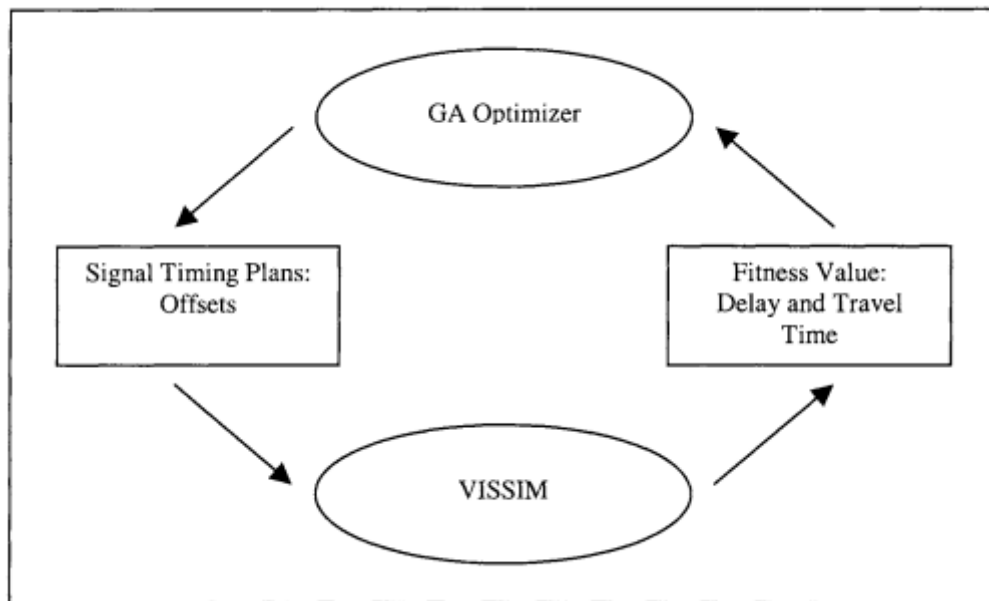
szerint genetikus algoritmus segítségével történő jelzőlámpa optimalizálási feladatok során 8 génnél többet nem érdemes felhasználni, mert hiába nő a komplexitás, az algoritmus ésszerű időn belül nem talál megfelelő megoldást. Fontos kiemelni még továbbá, hogy a módszer csak túlterhelt hálózaton ért el minőségi eredményeket, normál körülmények között a hagyományos irányítási formák alkalmazandóak. [14]

A feladat megoldásához a genetikus algoritmus felhasználása mellett a VISSIM mikroszimulációs modellező szoftver került felhasználásra, mely mintaként szolgált az általam elvégzett feladat során. [14]



5. ábra: A feladat megoldásának folyamatábrája [14]

Genetikus algoritmus alkalmazását tesztelték fázistervek optimalizálására is, mivel egy jól működő jelzésterv nem csak a járművek késési idejét csökkenti, de mérsékli a károsanyag-kibocsátást és az üzemanyag fogyasztást is. Az algoritmus felhasználása azért merülhet fel, mert képes elkerülni a lokális optimumokban történő megragadást, és a globális optimum elérésére összpontosít. A felállított rendszer folyamatábrája az alábbiak szerint került kialakításra. [15]



6. ábra: Példa a GA-VISSIM kapcsolatra (jelzésterv optimalizáció) [15]

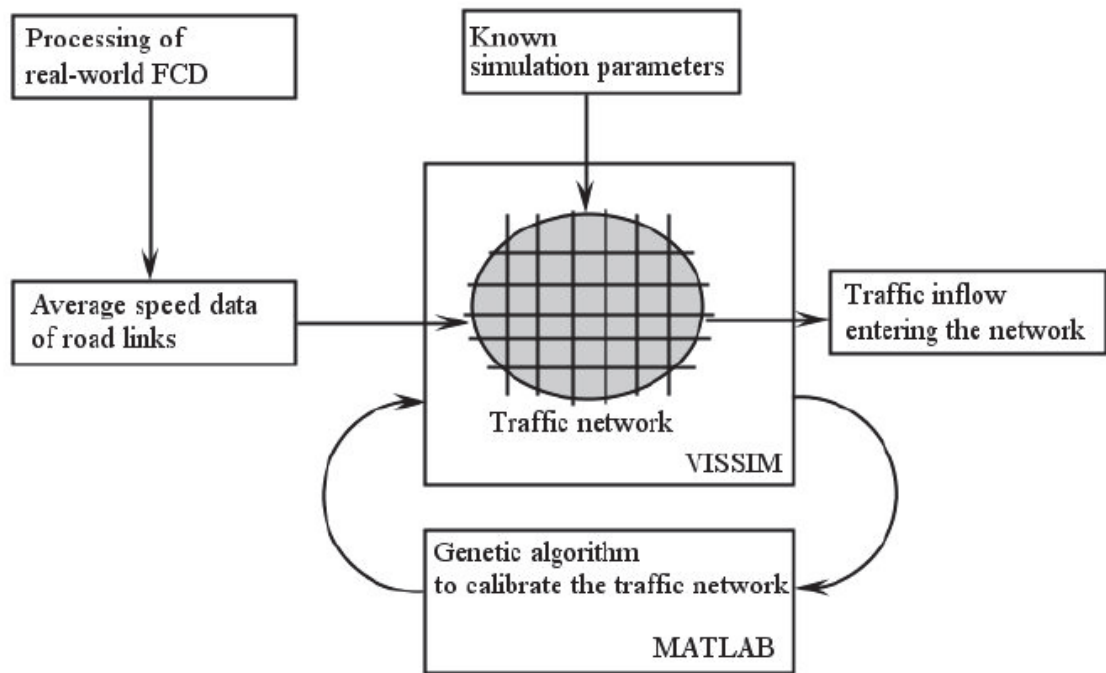
A vizsgált példában a fitnessz függvény értékét az utazási idők súlyozott átlaga biztosította, ez alapján kerültek az egyes fázisstervek elbírálásra. A tesztek ugyanakkor kimutatták, sem a genetikus algoritmus segítségével optimalizált programok, sem a Synchro vagy a TRANSYT-7F módszerrel fejlesztett megoldások sem értek el lényegi minőségi javulást a virginiai tesztkörnyezetben jelenleg alkalmazott hagyományos programokhoz képest. [15]

Jelzőlámpás tervezés során a genetikus algoritmus alkalmazható az optimális fázisrend kialakítására is. A tesztelési környezet egy négyágú közlekedési csomópont volt, közúti, gyalogos és villamos közlekedéssel. A genetikus algoritmus alkalmazása során megvalósult a lokális optimumok elkerülése, és megtörtént az optimális fázisrend kiválasztása a fitnessz függvény értéke alapján. Ugyanakkor a szerző felhívja a figyelmet arra, hogy a genetikus algoritmus helyenként kontrollálatlan működése miatt a módszernek nagyobb létjogosultsága lehet a közlekedés tervezésében, mint valós idejű irányításban. [18]

3.2.3. Közlekedési modellhálózat kalibrálása

A genetikus algoritmus egy másik felhasználási területe a közlekedésben egy modellezett hálózat kalibrálása, a valós hálózat adatai alapján. Ahhoz, hogy egy tervezési feladat

megoldásához egy általunk épített forgalmi modell adatait használjuk, szükséges a modell kimenő adatainak hitelességét biztosítani. Erre szolgál a valós adatok segítségével történő kalibrálás, mely jelenlegi példánkban a hálózaton megjelenő járművek által szolgáltatott FCD (Floating Car Data) segítségével került megvalósításra. A feladat megoldására célszerű lehet genetikus algoritmus felhasználása, mivel egy alulhatározott problémával állunk szemben, melynek során az FCD adatokból kapott sebesség értékek segítségével szükséges meghatározni a hálózat egyes szakaszainak forgalomnagyság értékeit. A gyakorlati megvalósításhoz a MATLAB szoftverben megírt kód segítségével a COM felületen keresztül került programozásra a VISSIM mikroszkópikus szimulációs szoftver. A felépített rendszer folyamatábrája az alábbi ábrán látható. [16]



7. ábra: Példa a GA-VISSIM kapcsolatra (hálózat kalibrálás) [16]

Az alkalmazott fitnessz függvény lényege, hogy a modellezett sebesség értékek és az FCD adatokból számított sebesség értékek relatív eltérését bünteti.

$$J(k) = \sum_{i=1}^n \left\| \frac{\bar{V}_i^{FCD}(k) - \bar{V}_i^{VISSIM}(Q(k))}{\bar{V}_i^{FCD}(k)} \right\|_{\infty} \rightarrow \min$$

8. ábra: FCD adatok alapján történő kalibrálás fitness függvénye [16]

Amennyiben ez az eltérés egy adott határérték alá csökken, a hálózat kalibrálása teljesült, és a modell kimenő adatai felhasználhatóak a tervezési folyamat során. [16]

Egy másik hálózat kalibrálási példa megvalósítása genetikus algoritmus segítségével a shanghai úthálózat kapcsán került előtérbe. A kínai és az európai közlekedési szokások közötti eltéréseket modellezendő, a kutatók az ázsiai ország vezetési viselkedésére kívánták bekalibrálni az alapvetően európai elveket alkalmazó Vissim szoftvert. A kalibrálás paraméterei az alábbiak voltak: [28]

- Kanyarodási sebességek
- Sáv váltások
- Forgalomban megállásra kényszerülő járművek közötti távolság
- Követési távolság
- Biztonsági távolságok

A kalibrálás sikeres megvalósítása után eredményként leszűrhető, hogy a kínai sofőrök mind a követések mind a sáv váltások tekintetében agresszívebb viselkedési mintákat mutattak. A forrás említést tesz a genetikus algoritmus további közlekedéssel kapcsolatos alkalmazásairól is, úgy mint híd fenntartási munkálatok tervezése, járda felújítás ütemezése, vagy jelzőlámpás tervezés. [28]

3.2.4. Csomóponti kialakítás tervezése

Genetikus algoritmus felhasználásra került már hálózat optimalizációs feladatok során is, melyben a vizsgált hálózat csomópontjainak típusát határozza meg az algoritmus, jelzőtáblás, jelzőlámpás valamint körforgalmú irányítási módok közül választva. A fitnessz függvény az egyes hálózatok közül a járműátbocsátás hatékonysága és a várakozási idő szerint választja ki az optimális megoldást. A vizsgálatok igazolták, hogy

viszonylag alacsony számú generáció alkalmazásával is elérhető volt javulás az eredményekben. [17]

3.2.5. Forgalomszámlálási pontok meghatározása

A célforgalmi mátrixok minősége függ a forgalomszámláló helyszínek darabszámától és elhelyezésétől is. A feladat megoldására genetikus algoritmus használható fel, hogy a lehető legkisebb ráfordítással érjünk el megfelelő minőségű adatokat. [10]

A célforgalmi mátrixok előállításához kötődően genetikus algoritmus segítségével optimalizálható a forgalomszámlálási mérőhelyek száma és elhelyezése is. Az algoritmus célja minél kevesebb számláló hely segítségével az összes honnan-hová irányról megfelelő minőségű forgalmi adat begyűjtése. A feladat megoldása tulajdonképpen egy fontossági sorrend felállítása a hálózat útszakaszai között, melyek közül a sor elejétől kezdve kerülnek beválogatásra az útszakaszok a számlálási pontok közé. A probléma kiterjesztése során nem csak a számlálólhelyek száma az optimalizálás tárgya, de az adott helyszínek beüzemelésének időpontja is, mely az alapfeladat többszöri egymás utáni elvégzését vonja maga után. Az általános feladat megoldása két szinten történik, első szinten kerülnek kiválasztásra a telepítendő számlálólhelyek, majd a második szinten történik az így kapott adatokból a célforgalmi mátrix becslése. A genetikus algoritmus működéséből kifolyólag nem veszi sorra az összes lehetséges esetet, hanem sajátosságait kihasználva más módszerrel találja meg az optimális (vagy optimálishoz közeli) megoldást. Az algoritmus a különböző korlátozások helyett a fitnessz függvénybe épít be egy büntető faktort, amennyiben az adott szakaszra történő telepítés költségeit is figyelembe kívánjuk venni. Az alkalmazott genetikus algoritmus paraméterei a következők: [23]

- populáció száma: 16
- maximális generációk száma: 2000
- keresztezés valószínűsége: 0,5
- mutáció valószínűsége: 0,05

Az algoritmus által biztosított számlálólhely elhelyezési sorrend ellenőrzése két ellenpélda segítségével történhetett meg. A kiválasztott mérőhelyek véletlenszerű sorrendben, és az

algorithmus által biztosított sorrenddel ellenkező irányban rosszabb eredményeket produkáltak, mint az algoritmus által biztosított megoldás. [23]

3.2.6. Utazó ügynök problémája

Genetikus algoritmus alkalmazását tesztelték már az utazó ügynök problémájára is, mely megfelelő kódolási, keresztezési és mutációs beállítások esetén megoldást kínál a feladatra. A kihívást ez esetben az jelenti, hogy a két kromoszóma keresztezéséből létrejövő új egyed is egy megvalósítható körutazást írjon le. [25]

4. Célforgalmi mátrix meghatározhatóságának vizsgálata genetikus algoritmussal

4.1. Az alkalmazott modell megfogalmazása

[29] állítása szerint, amennyiben az útszakaszok és az azokból összetevődő útvonalak kapcsolatát leíró mátrix oszlopai különbözőek, valamint mindegyik oszlopban legalább egy nem zérus elem található, az útszakaszokon végzett forgalomszámlálási eredményekből megvan a lehetőség a célforgalmi mátrix elemeit tartalmazó vektor azonosítására, a célforgalmi mátrix meghatározása elméletileg lehetséges.

Amennyiben keresztmetszeti forgalomszámlálási adatokból kerül előállításra a célforgalmi mátrix, első lépésként meg kell határozni a két adott körzet közti útvonalakat, és a forgalom azok közti megoszlását. [21]

$$0 \leq p_{ij}^a \leq 1$$

ahol

p_{ij}^a egy arányszám, amely megmutatja, hogy az i körzetből a j körzetbe közlekedők közül mekkora hányaduk veszi igénybe az a útszakaszt. ($i \in O, j \in D$, ahol O az összes kiinduló és D az összes cél körzet száma)

Az **optimalizálandó függvény** a következőképpen alakul a feladat megoldása során [11] mintájára:

$$V_a = \sum_{i \in O, j \in D} p_{ij}^a T_{ij}$$
$$\min_{T_{i,j}} \sum_{i \in O, j \in D} w_{ij} (T_{ij} - t_{ij})^2 + \sum_{i \in O, j \in D} w_a (V_a - v_a)^2$$

ahol

T_{ij} a keresett célforgalmi mátrix eleme, az i körzetből a j körzetbe közlekedő forgalom nagysága

V_a a keresett célforgalmi mátrix hálózatra terhelése után adódó keresztmetszeti forgalom értéke az a útszakaszon

t_{ij} az előzetes célforgalmi mátrix eleme, az i körzetből a j körzetbe közlekedő forgalom nagysága

v_a a keresztmetszeti forgalomszámlálás eredménye az a útszakaszon

w_{ij} az előzetes forgalmi mátrix t_{ij} elemeinek megbízhatósági tényezője

w_a az a útszakaszon számolt keresztmetszeti forgalom megbízhatósági tényezője

Hasonló felírási módszert használ [26] is, az alábbi feltételezésekkel:

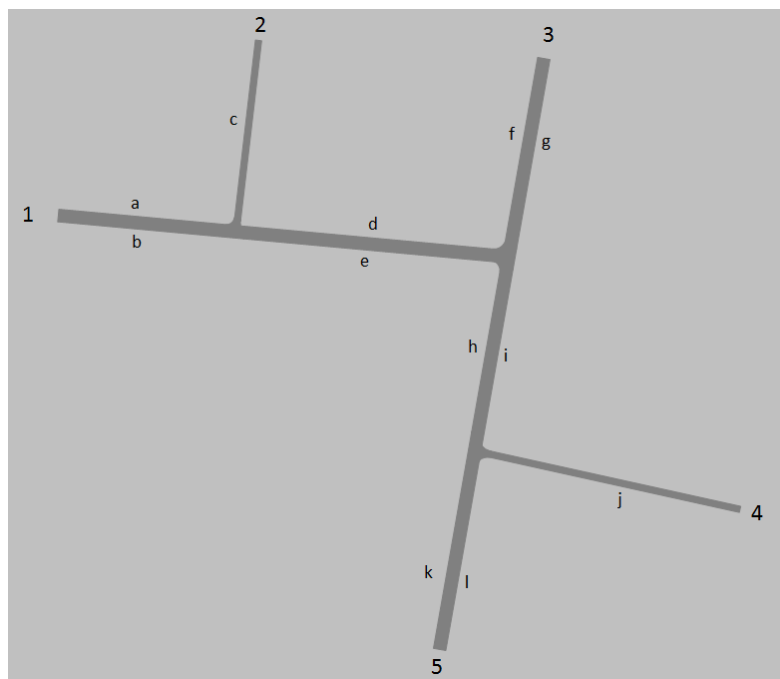
- Egy cella értéket egy útvonalra terhel rá a rendszer. (p_{ij}^a értéke 0 vagy 1)
- Zónán belüli mozgások figyelmen kívül hagyása.
- Az útszakaszok rangsorolása a hálózatban betöltött szerepük alapján történik. (Ez alapján dől el, hogy az adott szakaszon szükséges-e keresztmetszeti forgalomszámlálás.)

Az ilyen jellegű felírás esetén szem előtt kell tartani, hogy a forgalomszámlálás adataihoz és az előzetes mátrix adataihoz való közelítés általában nem valósítható meg egy időben, így egy ún. **trade-off szituáció** áll elő. [20]

A feladat megvalósítása során azzal a feltételezéssel élünk, hogy a számolt keresztmetszeti forgalmak hibától mentesek. Természetesen a modell továbbfejleszthető a hiba paraméterek beépítésével.

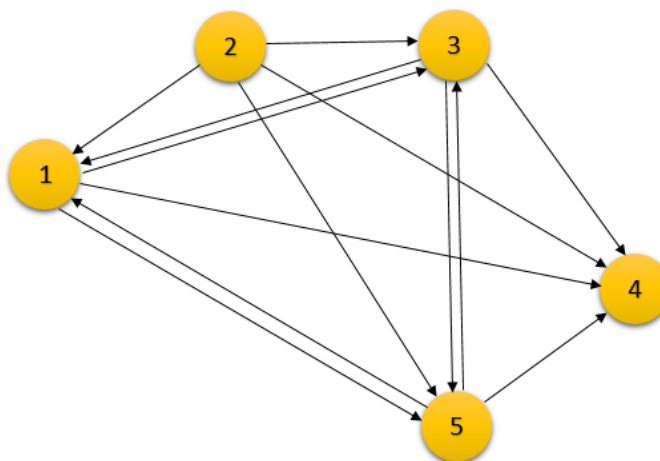
4.2. A modell tesztelése

A tesztelés során egy az alábbi ábrának megfelelő hálózaton vizsgáltam az algoritmust, mely esetében bármelyik két végpont között csak egy útvonal található, így kijelenthető, hogy a p_{ij}^a paraméter kizárólag 0 vagy 1 értéket vehet fel.



9. ábra: Teszhálózat VISSIM-ben

A hálózat 12 betűvel jelzett szakaszán végeztem keresztmetszeti méréseket, míg a hálózat végpontjai között összesen 13 honnan-hová párt azonosítottam (az egyirányúsítások következtében).



10. ábra: A teszhálózat gráfja

A hálózatot leíró p_{ij}^a elemeket tartalmazó mátrix segítségével a modell az alábbiak szerint fogalmazható meg a tesztkörnyezetre.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_d \\ V_e \\ V_f \\ V_g \\ V_h \\ V_i \\ V_j \\ V_k \\ V_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{13} \\ T_{14} \\ T_{15} \\ T_{21} \\ T_{23} \\ T_{24} \\ T_{25} \\ T_{31} \\ T_{34} \\ T_{35} \\ T_{51} \\ T_{53} \\ T_{54} \end{bmatrix}$$

A korábbi fejezetekben leírtak alapján a probléma alulhatározott, tehát egyszerű matematikai módszerekkel nem megoldható. A feladat megoldására a genetikus algoritmus alkalmazhatóságát vizsgáltam.

Szükségem volt egy előzetes mátrixra, amely az elavult, frissítendő adatokat szimbolizálja a hálózat egyes végpontjai között. Az előzetes mátrix t_{ij} értékei az alábbiak szerint kerültek felvételre.

t_{ij} [jmű/óra]	1	2	3	4	5
1			170	60	200
2	70		30	20	100
3	180			50	210
4					
5	150		190	80	

11. ábra: Előzetes mátrix értékei

A fenti táblázat értékei képezték a genetikus algoritmus kezdeti populációjának értékeit is. A populáció nagyságát 200-ra választottam, míg a generációk számát 100-ra. Korlátozó feltételek közül csak a nemnegativitást követeltem meg.

Mivel célom a feladat megoldása során az volt, hogy mért keresztmetszeti forgalomszámlálási eredmények alapján határozzam meg a keresett célforgalmi mátrixot, a VISSIM szoftverben a problémát az eredeti inverzeként kellett felépítenem. Különböző

módosításokkal létrehoztam a keresett mátrixot, majd annak ráterhelése következtében adódtak az alábbi forgalomnagyság értékek az egyes keresztmetszetekre.

v_a	[jmű/óra]
a	398
b	339
c	200
d	332
e	467
f	462
g	371
h	572
i	349
j	217
k	446
l	444

12. ábra: Forgalomszámlálás eredményei

A kiinduló adatok a következő két mátrixban kerültek összesítésre.

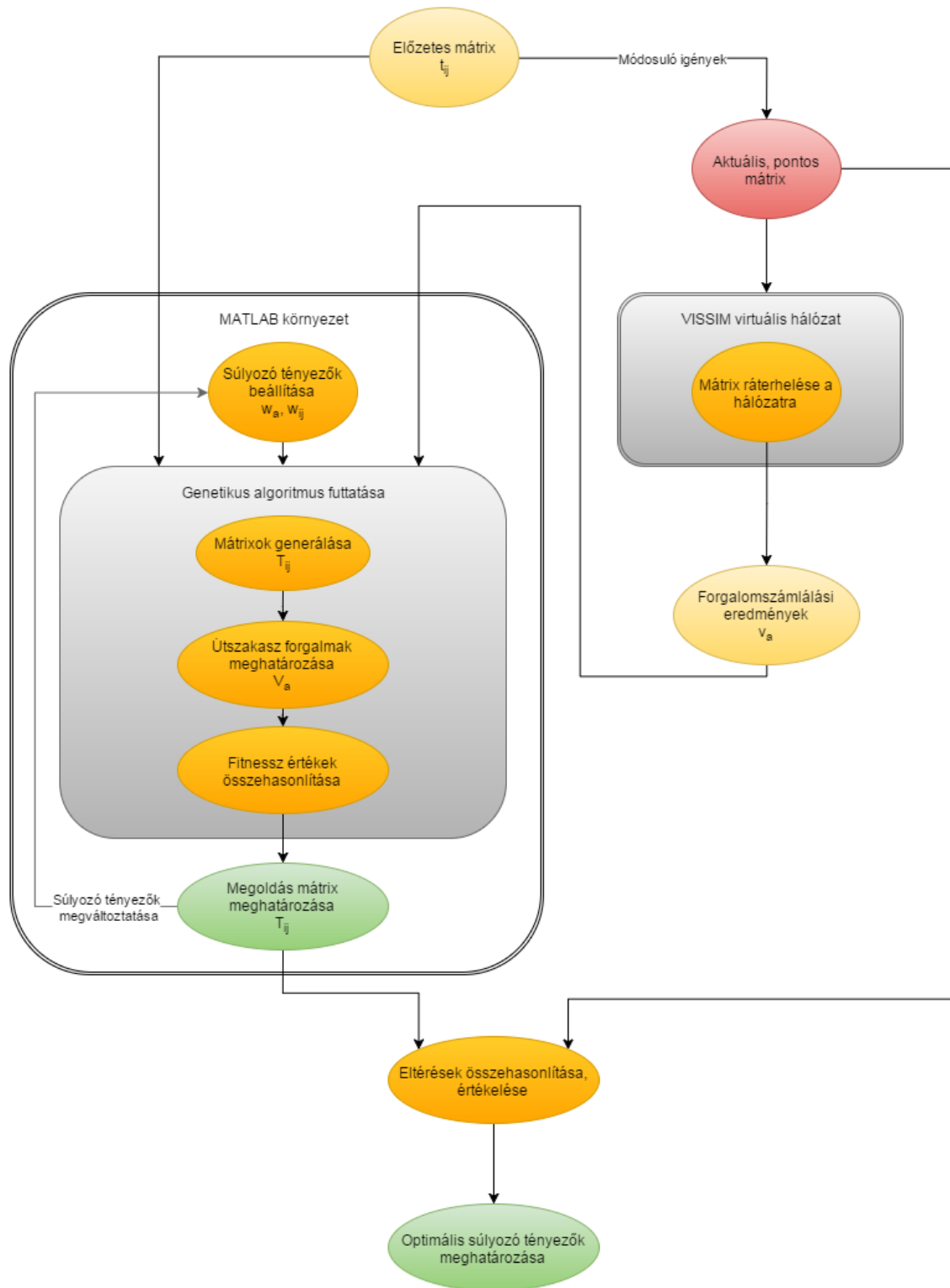
$$t_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 170 & 60 & 200 \\ 70 & 0 & 30 & 20 & 100 \\ 180 & 0 & 0 & 50 & 210 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 150 & 0 & 190 & 80 & 0 \end{bmatrix}$$

$$v_a = \begin{bmatrix} 398 \\ 339 \\ 200 \\ 332 \\ 467 \\ 462 \\ 371 \\ 572 \\ 349 \\ 217 \\ 446 \\ 444 \end{bmatrix}$$

A feladat tehát adott, a két mátrix adatainak segítségével szükséges meghatározni a számértékekhez legjobban passzoló mátrix celláinak (T_{ij}) értékeit. A feladat megoldására a fent bemutatott képletet alkalmaztam a genetikus algoritmus

tulajdonságainak beállítása során. Feladatom első részeként a fitnessz függvény két súlytényezőjét (w_{ij} és w_a) igyekeztem hangolni a minél jobb eredmény érdekében. A megvalósítás során egy **optimalizációs** és egy **hangolási** folyamatot kellett végrehajtani, mivel egy adott tényező pár értéknél a genetikus algoritmus optimalizálja a mátrix cella értékeit, a többszöri futtatás során pedig kialakul a tényezők közötti arány hangolt értéke.

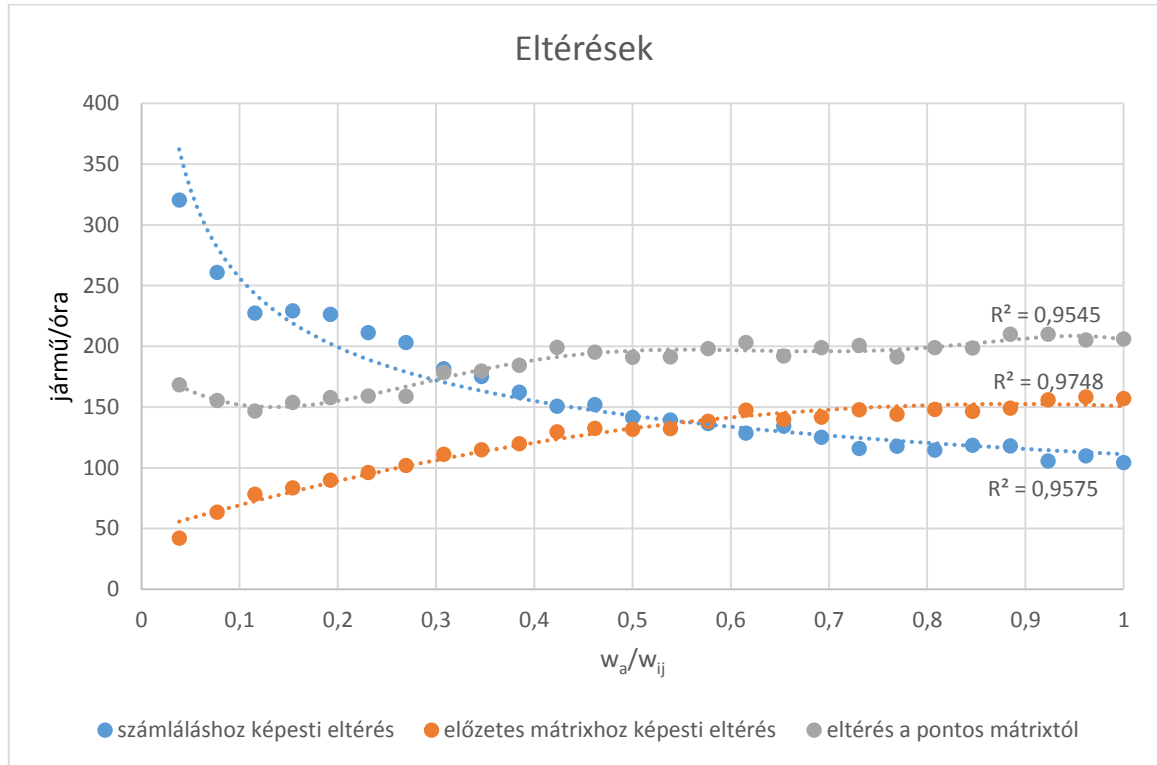
Az elvégzett feladat folyamata az alábbi ábrán követhető végig. Világossárga színnel kerültek jelölésre a modell bemenő adatai, piros színnel a gyakorlatban nem ismert, csak a validálás céljából felhasznált adatok, narancssárgával az elvégzett folyamatok, zöld színnel pedig az optimalizáció és a tényezők hangolásának lépései.



13. ábra: Az elvégzett feladatok folyamatábrája

4.3. Eredmények, következtetések

Az alábbi grafikon szemlélteti a teszt eredményeit. Az eltéréseket az egyes párok közötti eltérések abszolút értékeinek összegeként határoztam meg.



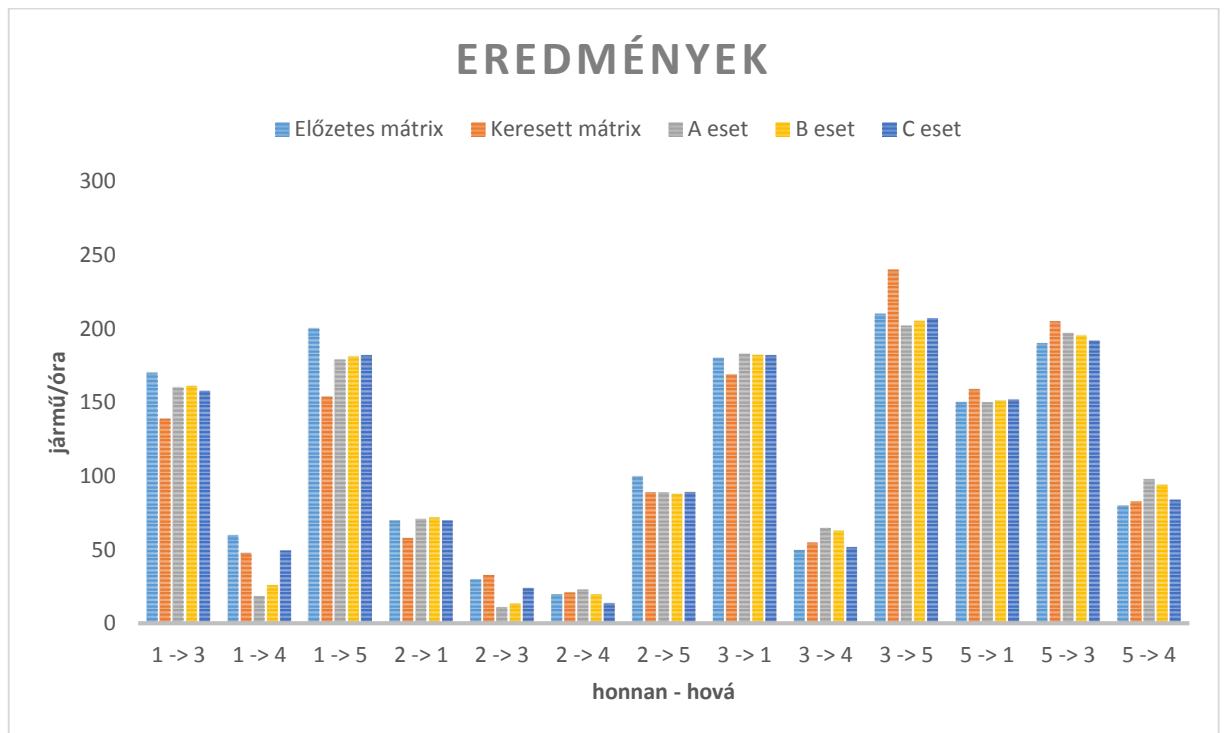
14. ábra: Eltérések a súlyozó tényezők arányai szerint

Amennyiben nem alkalmaztam volna súlyozó tényezőket, az előzetes mátrixtól való eltérés jelentősebbre alakult volna, mint a forgalomszámlálást illető eltérés, és a keresett mátrixtól való eltérés is 200 jármű felett adódik. Ahhoz, hogy a két eltérés érték megegyezzen a két súlytényező arányát 0,55 körülre érdemes választani, ám a keresett mátrixtól való eltérés minimumát ebben a pontban sem éri el a rendszer.

Láthatjuk, hogy a pontos mátrixtól (ami a VISSIM modellben korábban ráterhelésre került) való eltérés minimuma a 0,1 és 0,2 értékek közé esik, ami azt jelenti, hogy **a súlyozásnál az előzetes mátrix eltéréseit kb. 9-szer nagyobb arányban szükséges figyelembe venni, mint a forgalomszámlálás eredményeitől való eltérést.** Ez alátámasztja azt az elvet, miszerint egy adott forgalomszámlálási adathalmazhoz többféle mátrix is tartozhat, erősen figyelembe kell vennünk az előzetes mátrix struktúráját, hogy az optimális megoldás felé irányuljon a módszer.

Nézzük ezen három kiemelt eset eredményeit:

- A eset: súlyozó tényezők alkalmazása nélkül
- B eset: azonos mértékű eltérés a számlálástól és az előzetes mátrixtól
- C eset: keresett mátrixtól való eltérés minimális



15. ábra: A megoldás mátrixok forgalmi eredményei

Megfigyelhetjük, hogy a 13 darab mátrix cella értékéből 9-ben a C eset hozza a legjobb megoldást a három kiválasztott verzió közül. További 3 érték esetén (1->5, 3->5, 5->1), melyek jellemzően nagy forgalmú irányok, az algoritmus az előzetes mátrix értékéből kiindulva nem jutott el a keresett mátrix értékéig egyik esetben sem, az esetek között jelentős különbség nem érzékelhető. A C eset százalékosan jelentősen rosszabb eredményt csak a legkisebb forgalmú 2->4 relációban hozott a többi esethez képest, de az eltérés itt is mindössze 7 jármű volt. Az algoritmus viselkedésének javítását - különösen a nagyobb forgalmú irányok esetében - vizsgálhatjuk a populáció méretének kiterjesztésével vagy a generációk számának növelésével.

5. Összefoglalás

Dolgozatomban a genetikus algoritmus alkalmazhatóságát teszteltem célforgalmi mátrix meghatározására. Elsőként áttekintettem a célforgalmi adatfelvételeket, majd azokat a modelleket, melyeket célforgalmi mátrixok előállítására fejlesztettek ki, keresztmetszeti forgalomszámlálási adatokból kiindulva. Ilyen modellek többek között az általános legkisebb négyzetek módszere, az információ minimalizáló eljárás vagy a maximális valószínűség módszere. A genetikus algoritmus működési elvének általános bemutatása után megvizsgáltam az algoritmus eddigi közlekedési területen történt alkalmazásait. A jelenlegi feladat témájához legközelebb állva alkalmazták már a genetikus algoritmust autópálya le- és felhajtók forgalmainak meghatározásához, valamint forgalomszámlálási pontok számának és elhelyezésének optimalizálásához. A genetikus algoritmus további közlekedési alkalmazásainak vizsgálata elsősorban a jelzőlámpás tervezésre és a forgalmi modellek kalibrálására terjed ki.

A konkrét feladat elvégzése során felállítottam a közlekedési rendszer modelljét, és egy virtuális úthálózaton teszteltem. A modell elkészítése során néhány egyszerűsítéssel éltem, miszerint a hálózat két szélső pontja között csak egy útvonalon közlekedhetnek a járművek, valamint a forgalomszámlástól és az előzetes mátrixtól való eltérés súlyozása skalár értékekkel történt. A hálózat kialakítása biztosította az alulhatározottságot, a fitnessz függvény meghatározásával pedig kialakult az optimalizálás célja, amely a súlyozó tényezők változtatásával kívánta elérni a valósághoz legközelebb eső állapotot. Az optimalizálás és a hangolás eredményei bizonyították, hogy a megoldáshoz akkor kerülhetünk a legközelebb, ha az előzetes mátrix struktúráját érvényesítendő tényezőt 9-szer akkora válasszuk, mint a keresztmetszeti forgalomszámlálás értékeit képviselő szorzót. További javulás érhető el az eredményekben a genetikus algoritmus populációjának és futtatási idejének optimalizálásával.

6. Ábrajegyzék

1. ábra: Célforgalmi mátrix.....	4
2. ábra: Személyforgalmi felvételek típusai [5].....	7
3. ábra: Átbocsátandó járművek maximalizálásának függvénye [14]	22
4. ábra: Sorhossz minimalizálás függvénye [14]	22
5. ábra: A feladat megoldásának folyamatábrája [14]	23
6. ábra: Példa a GA-VISSIM kapcsolatra (jelzésterv optimalizáció) [15]	24
7. ábra: Példa a GA-VISSIM kapcsolatra (hálózat kalibrálás) [16]	25
8. ábra: FCD adatok alapján történő kalibrálás fitnessz függvénye [16].....	26
9. ábra: Teszthálózat VISSIM-ben.....	31
10. ábra: A teszthálózat gráfja	31
11. ábra: Előzetes mátrix értékei.....	32
12. ábra: Forgalomszámlálás eredményei.....	33
13. ábra: Az elvégzett feladatok folyamatábrája	35
14. ábra: Eltérések a súlyozó tényezők arányai szerint	36
15. ábra: A megoldás mátrixok forgalmi eredményei	37

7. Irodalomjegyzék

- [1] Maria Pilar Jiménez Gómez (2010): Traffic prediction based on license plate scanning – Observability and optimal location of traffic counters (Doctoral Thesis)
(http://www.fundacioabertis.org/pdf/traffic_prediction_premi_abertis_2010_web.pdf)
- [2] Nanne van der Zijpp (1997): Dynamic OD-Matrix Estimation from Traffic Counts and Automated Vehicle Identification data (Transportation Research Record 1607) (<http://www.modelit.nl/modelit/pdf/trb97.pdf>)
- [3] Shawn M. Turner, William L. Eisele, Robert J. Benz, Douglas J. Holdener (1998): License Plate Matching Techniques (Travel Time Data Collection Handbook, FHWA-PL-98-035)
(<https://www.fhwa.dot.gov/ohim/handbook/chap4.pdf>)
- [4] Zsuzsanna Tóth (2001): Problems of reliability and exactitude of traffic surveys' data (Periodica Polytechnica Ser. Civ. Eng. Vol. 46, No. 1, pp. 71-82 (2002)) (<http://www.pp.bme.hu/ci/article/view/621>)
- [5] Oszter Vilmos (2012): Térkapcsolati összefüggések vizsgálata célforgalmi utasszámlálási források alapján (VI. Magyar Földrajzi Konferencia, 672-678)
(<http://geography.hu/mfk2012/pdf/Oszter%20Vilmos.pdf>)
- [6] KTI Közlekedéstudományi Intézet Nonprofit Kft. (2010): Az Országos Célforgalmi Adatfelvétel lebonyolítása, a célforgalmi mátrix létrehozása – II. Adatfelvételek
(www.kti.hu/uploads/images/ocf/letoltesek/OCF_adatfelvetelek.pdf)
- [7] Malachy Carey, Chris Hendrickson, Krishnaswami Siddharthan (1981): A method for direct estimation of origin/destination trip matrices (Transportation Science, Vol. 15, No. 1) (www.cmu.edu/gdi/docs/a-method-for-direct-estimation.pdf)
- [8] Torgil Abrahamsson (1998): Estimation of Origin-Destination Matrices Using Traffic Counts – A Literature Survey (IIASA Interim report, IR-98-021)
(http://www.iiasa.ac.at/publication/more_IR-98-021.php)

- [9] Session 7.1: Traffic Counts, Origin-Destination Surveys and Other Approaches (The African Community Access Programme, 2014) (<http://afcap.org/Document%20Library/Ghana%20S7.1%20Traffic%20Counts%20and%20Surveys.pdf>)
- [10] Sharminda Bera, K. V. Krishna Rao (2011): Estimation of origin-destination matrix from traffic counts: the state of the art (European Transport n. 49 (2011): 3-23) (http://www.istiee.org/te/papers/n49/49d_berarao.pdf)
- [11] Jyoti Gupta, Nita H. Shah (2012): Origin Destination Transportation Models: Methods (Int Jr. of Mathematical Sciences & Applications, Vol. 2, No. 2, May 2012) (<http://ijmsa.yolasite.com/resources/41.%20Jyoti.pdf>)
- [12] Dr. Horváth Balázs, Dr. Koren Csaba, Dr. Prileszky István, Dr. Tóth-Szabó Zsuzsanna (2007): Közlekedéstervezés (Széchenyi István Egyetem) (<http://rs1.sze.hu/~farkasi/Kozlekedestervezes.pdf>)
- [13] Ádám Ludvig, Tamás Tettamanti (2013): Célforgalmi mátrix becslése valós idejű közúti forgalmi paraméterek alapján (IFFK 2013) (<http://kitt.uni-obuda.hu/mmaws/2013/pages/program/papers/8.pdf>)
- [14] Yan Li, Lijie Yu, Siran Tao, Kuanmin Chen (2013): Multi-Objective Optimization of Traffic Signal Timing for Oversaturated Intersection (Mathematical Problems in Engineering, Volume 2013, Article ID 182643) (<http://www.hindawi.com/journals/mpe/2013/182643/>)
- [15] B. Brian Park, J. D. Schneeberger (2003): Evaluation of traffic signal timing optimization methods using a stochastic and microscopic simulation program (Virginia Transportation Research Council, January 2003, VTRC 03-CR12) (<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.474.9202&rep=rep1&type=pdf>)
- [16] T. Tettamanti, A. Csikós, I. Varga, A. Eleőd (2015): Iterative Calibration of VISSIM Simulator Based on Genetic Algorithm (Acta Technica Jaurinensis, Vol. 8, No. 2, pp. 145-152, 2015) (<http://acta.sze.hu/index.php/acta/article/view/365>)
- [17] Ales Horvat, Aleksandar Tomic (2012): Optimization of traffic networks by using genetic algorithms (Elektrotehnicki Vestnik 79(4): 197-200, 2012) (<http://ev.fe.uni-lj.si/4-2012/Horvat.pdf>)

- [18] Gustaf Jansson (2010): Traffic Control with Standard Genetic Algorithm – A simulated optimization control of a Traffic Intersection (Master of Science Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2010) (<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/138247.pdf>)
- [19] Pengpeng Jiao, Huapu Lu (2005): Dynamic Origin-Destination Flows Estimation for Freeway Corridors Using Genetic Algorithm (Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 6, pp. 2702-2717, 2005) (http://www.easts.info/on-line/journal_06/2702.pdf)
- [20] Chi Xie, Kara M. Kockelman, S. Travis Waller (2010): A Maximum Entropy Method for Subnetwork Origin-Destination Trip Matrix Estimation (Transportation Research Record, No. 2196: 111-119, 2010) (http://www.cae.utexas.edu/prof/kockelman/public_html/TRB10ODME.pdf)
- [21] Henk J. Van Zuylen, Luis G. Willumsen (1980): The Most Likely Trip Matrix Estimated from Traffic Counts (Transportation Research B, Vol. 14B, pp. 281-293) (<https://www2.informatik.hu-berlin.de/alkox/lehre/lvws0809/verkehr/tripmatrix.pdf>)
- [22] Luka Novacko, Ljupko Simunovic, Davor Krasic (2014): Estimation of Origin-Destination Trip Matrices for Small Cities (Promet – Traffic&Transportation, Vol. 26, 2014, No. 5, 419-428) (<http://www.fpz.unizg.hr/traffic/index.php/PROMTT/article/view/1501>)
- [23] Chao Yang, Piya Chootinan, Anthony Chen (2003): Traffic Counting Location Planning Using Genetic Algorithms (Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 5, October, 2003) (<http://www.easts.info/2003journal/papers/0898.pdf>)
- [24] Shinhae Lee, Seungjae Lee, Kangwon Lim, Sooyeon Moon (2001): A Genetic Algorithm for the Estimation of Transit Origin and Destination Matrix Using Traffic Count Techniques (Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 4, No. 1, October, 2001) (<http://easts.info/on-line/journal/vol4no1/41011.pdf>)
- [25] Kylie Bryant (2000): Genetic Algorithms and the Traveling Salesman Problem (Harvey Mudd College, Department of Mathematics, December 2000)

- [\(<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.91.9167&rep=rep1&type=pdf>\)](http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.91.9167&rep=rep1&type=pdf)
- [26] Remya K P, Samson Mathew (2013): OD Matrix Estimation from Link Counts Using Artificial Neural Network (International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 4, Issue 5, May-2013) (<http://www.ijser.org/researchpaper%5COD-Matrix-Estimation-from-Link-Counts-Using-Artificial-Neural-Network.pdf>)
- [27] Cheol Oh, Stephen G. Ritchie, Jun-Seok Oh, R. Jayakrishnan (2002): Real-Time Origin-Destination (OD) Estimation via Anonymous Vehicle Tracking (UCI-ITS-TS-WP-02-19) (<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=1041283>)
- [28] Wu Zhizhou, Sun Jian, Yang Xiaoguang (2005): Calibration of Vissim for Shanghai Expressway Using Genetic Algorithm (Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference) (<http://informs-sim.org/wsc05papers/333.pdf>)
- [29] Martin L. Hazelton (2000): Estimation of origin-destination matrices from link flows on uncongested networks (Transportation Research Part B 34 (2000) 549-566) (<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261599000375>)
- [30] Raffai Tamás: Genetikus algoritmusok az optimalizálásban (Házi dolgozat) (<http://www.lelekvasz.hu/mrt/doc/GA.pdf>)

8. Mellékletek

8.1. MATLAB kód (részlet)

```
for j=1:26

    format compact
    wa=j/26;
    wij=1;
    FITNESSFCN=@(Tij) fitness_fiktiv(Tij,wa,wij);
    NVAR=13;
    Aeq=[];
    beq=[];
    tij=[170,60,200,70,30,20,100,180,50,210,150,190,80];
    lb=zeros(13,1);
    options = gaoptimset('Generations',100,'PopulationSize',200,'InitialPopulation',tij);
    tic
    [Tij,fval,exitflag,output] = ga(FITNESSFCN,NVAR,[],[],Aeq,beq,lb,[],[],[],options)
    toc

end
```