

Debreceni Egyetem

Informatika Kar

Információ Technológia Tanszék

Közlekedési forgalom modellezése,
elemzése és vizualizációja

Témavezető:

Prof. Dr. Ispány Márton
tanszékvezető, oktatási
dékánhelyettes

Szerző:

Dáné Bence Dávid
Adattudomány MSc

Debrecen, 2026

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőmnek, Prof. Dr. Ispány Márton tanár úrnak a sok segítségért, amellyel hozzájárult ennek a diplomamunkának a létrejöttéhez.

Hálával tartozom szüleimnek a rengeteg gondoskodásért és támogatásért, amely végigkísért tanulmányaim során.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	3
1.1. Aktualitás	3
1.2. Formális követelmények	4
2. Elméleti háttér	4
2.1. Forgalomáramlás modell	5
2.1.1. Makroszkopikus	5
2.1.2. Mikroszkopikus	6
2.2. Autókövető modellek	8
2.2.1. Gipps Modell	9
2.2.2. IDM - Intelligent Driver Model	10
2.2.3. Emberi faktor	13
2.3. Sáv váltási modellek	14
2.3.1. Általános döntési modell	14
2.3.2. MOBIL	15
3. Időjárás	15
4. Bottleneck és hatásai	17
4.1. Lökéshullám-elmélet	17
5. Közösségi közlekedés	18
6. A szimulációs rendszer gyakorlati megvalósítása	20
6.1. Architektúra és működés	20
6.2. Térinformatika	21
6.3. Útvonaltervezés	24
6.4. Szimulációs motor	27
6.5. Járműmodellek	29
6.6. Vizualizáció	31
7. Összefoglalás	33

1. Bevezetés

1.1. Aktualitás

A növekvő urbanizáció következményeként a városi közlekedés egy összetett és kritikus fontosságú infrastruktúrává vált. A népesség és járművek számának növekedése, a környezeti kihívások, valamint a lakosság mobilitási igényei nyomást gyakorolnak a városi úthálózatra és a közösségi közlekedés rendszereire. A valósághű szimulációs modellek és az adatalapú döntéshozatal lehetőséget nyújt különböző forgalmi, infrastrukturális és környezeti scenáriók futtatására és elemzésére, anélkül, hogy hatalmas költségek halmozódnának fel.

A városi közlekedés szimulációja kiemelten fontos, mert segítségével megérthető, magyarázható és előre jelezhető olyan jelenségek, mint a forgalmi torlódások vagy a közösségi közlekedés járműveinek késései és azok következményei. Egy jármű vagy esemény hatása nem triviális, és gyakran kihat a teljes hálózatra.

Az adatalapú megközelítés nemcsak technikai kihívás, hanem kiváló lehetőség egy rendszerszintű szemlélet kialakítására is. A városi közlekedés ugyanis nem csupán járművek mozgását jelenti, hanem összefonódik az emberek napi rutinjával, a gazdasággal, az időjárással, az eseményekkel, valamint a város tervezésének és irányításának kérdéseivel is.

Ezért egy olyan szimulációs rendszer, amely a valósághoz közelítő módon modellezi a járművek, különösen a közösségi közlekedési járművek viselkedését, késéseit, valamint a forgalmi eseményekre adott reakcióit, nemcsak tudományos szempontból érdekes, hanem valós alkalmazási lehetőségeket is kínál. Az ilyen modellek és szimulációk hozzájárulhatnak a döntéshozatal támogatásához, a várostervezés fejlesztéséhez, valamint a közlekedésirányítás optimalizálásához.

1.2. Formális követelmények

A diplomamunka célja egy adat által irányított, városi közlekedést modellező szimulációs rendszer létrehozása ami különösen hangsúlyozza a közösségi közlekedésjárművek, buszok és villamosok viselkedését, hálózati hatásait és késések terjedését. A dolgozat középponti kérdései a következők: hogyan lehet különféle forrásból (pl. OpenStreetMap, GTFS) származó adatokat egyesíteni és feldolgozni úgy, hogy azok alapként szolgálhassanak egy valóságszerű közlekedési szimulációhoz? Miként képes egy közlekedési jármű késése - akár pár perces is -, láncreakciót okozni a teljes hálózaton? Hogyan lehet ezt a hatást modellezni és vizualizálni?

A szimulációs motor alapja a diszkrét események által vezérelt időbeli történések (pl. megállások, balesetek, útlezárások). Különböző matematikai modellek kerülnek bemutatásra és alkalmazásra (autó követés, sávváltás) az egyes járművekhez, illetve véletlenszerű események generálódhatnak Markov-láncokat használva.

A program célja egy valós térképalapú vizualizációval rendelkező szimulációs eszköz, amely különböző scenáriók (pl. csúcsforgalom, ünnepnap, baleset, időjárás) hatásait tudja bemutatni. A felhasználói felület lehetővé teszi a szimuláció futtatását különböző paraméterekkel, valamint az egyes járművek viselkedésének és késéseinek nyomon követését.

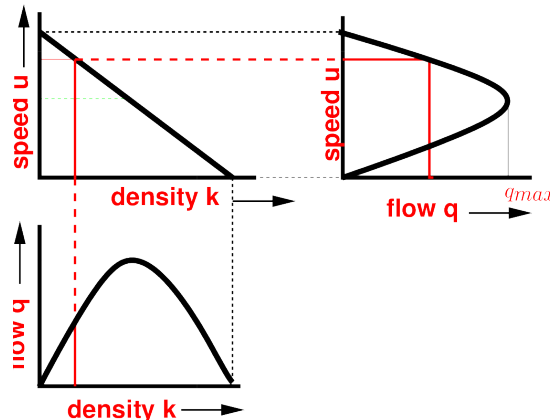
2. Elméleti háttér

A városi közlekedés egy összetett rendszer, az úthálózatokon mozgó járművek folyamatos interakciója, a közlekedési szabályok, emberi viselkedés és a környezeti hatások együttese megnehezíti a rendszer leírását és szimulálását. Ennek kezelésére szolgál a *forgalomáramlás-elmélet (traffic flow theory)*, amely különböző szinteken értelmezi és modellezi az egyes járművek mozgását.

A forgalomáramlás (q) definiálható egy adott útszakaszon áthaladó jármű-

vek számaként egységnyi idő alatt, és összefügg a járműsűrűséggel (k) és az átlagsebességgel (v):

$$q = k \cdot v$$



1. ábra. Forgalmáramlás [1]

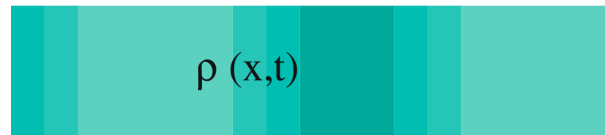
2.1. Forgalmáramlás modell

2.1.1. Makroszkopikus

A makroszkopikus modellek a forgalom áramlását a mozgásban lévő folyadékokhoz vagy gázokhoz hasonlóan írják le. A dinamikai változók lokálisan aggregált mennyiségek, mint például a forgalomsűrűség $p(x, t)$, az áramlás $Q(x, t)$, az átlagsebesség $V(x, t)$, ahol az x a hely, míg a t az időpillanat. Mivel az aggregáció lokális, ezek a mennyiségek általában térben és időben változnak, azaz dinamikus mezőknek felelnek meg. Így a makroszkopikus modellek képesek leírni az olyan kollektív jelenségeket, mint a régiók torlódása vagy forgalmi hullámok. Továbbá, a makroszkopikus modellek hasznosak,

- ha nem szükséges figyelembe venni olyan hatásokat, amelyeket makroszkopikusan nehéz leírni (pl. sávváltások, többféle vezető-jármű típus),
- ha csak makroszkopikus mennyiségek érdeklik az embert.

Egy makroszkopikus forgalom leírásban nem az egyedi járműveket írják le, hanem az egyes útszakaszok aggregált változóit. Azaz meg lehet határozni a sűrűséget, vagyis azt, hogy a járművek mennyire közel vannak egymáshoz térben, az áramlást, azaz az időegységenként egy referencia ponton áthaladó járművek számát és leírható a járművek átlagsebessége egy útszakaszon.

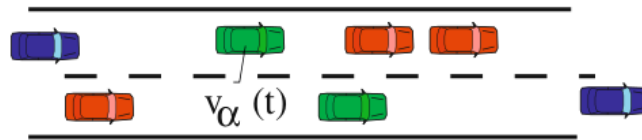


2. ábra. Makroszkopikus modell. Az különböző zöld árnyalatok a forgalom-sűrűség térbeli x és időbeli t változását szemlélteti[2].

2.1.2. Mikroszkopikus

A mikroszkopikus modellek, beleértve az autókövető modelleket, az egyéni járműveket írják, melyek együttesen alkotják a forgalom áramlását. Egy járműről teljes információt a trajektóriája ad, azaz a jármű pozíciójának minden időpillanatban történő meghatározása. A modellek a környező forgalomtól függően mutatják be az egyes vezetők reakcióját (gyorsítás, fékezés, sávváltás). Dinamikai változók a járművek pozíciói $x_\alpha(t)$, sebességei $v_\alpha(t)$ és gyorsulásai $\dot{v}_\alpha(t)$. A mikroszkopikus modellek alkalmasak a következő alkalmazásokra:

- Az egyedi járművek forgalomra gyakorolt hatásának modellezése,
- Olyan helyzetek, amelyekben a forgalom heterogenitása fontos szerepet játszik, pl. a sebességkorlátozások vagy teherautók előzési tilalmának hatásainak szimulálása,
- Különböző forgalmi résztvevők (autók, teherautók, buszok, kerékpárosok, gyalogosok stb.) közötti interakciók vizualizálása,
- Az emberi vezetési viselkedés leírása, beleértve a becslési hibákat, reakcióidőket, figyelmetlenséget és előrelátást.



3. ábra. Mikroszkopikus modell. Minden jármű egyedi entitás, a $v_\alpha(t)$ mennyiség az adott autó egyedi sebessége t időpillanatban [2].

A megfelelő modell, vagy modellek kiválasztásakor (mezoszkopikus modell, amely ötvözi a mikroszkopikus és makroszkopikus megközelítéseket) az alábbi tényezők is szerepet játszanak:

- *Heurisztikus* és *Első elveken nyugvó* modellek. A *heurisztikus modellek* matematikai megközelítést használnak, ahol az együtthatók a modellparaméterek szerepét töltik be. Ezeket az adatokat regressziós technikákkal illesztik, és nincs intuitív jelentésük. Ezzel szemben az *első elveken nyugvó modelleket* bizonyos kényszerekből vezetik le. Autókövető modellek esetében ez lehet egy olyan vezetési viselkedés, amelyet a sebességre, gyorsulásra, lassulásra, időbeli követési távolságra és minimális távolságra vonatkozó kívánt értékek határoznak meg. Ideális esetben ezen kényszerek mindegyike egy modellparaméterben tükröződik, amelynek értéke ezáltal intuitív jelentéssel bír.
- *Sztochasztikus* és *Determinisztikus* modellek. A véletlen elemek felhasználhatók a forgalomáramlás olyan aspektusainak leírására, amelyek ismeretlenek, mérhetetlenek, modellezhetetlenek, vagy „valóban” véletlenszerűek. Míg a véletlen elemeket nem tartalmazó modelleket *determinisztikus* modelleknek nevezzük, addig azokat, amelyek véletlen elemeket (sztochasztikus tagokat) tartalmaznak, *sztochasztikus* modelleknek hívjuk. A véletlenszerűség a modell különböző pontjain előfordulhat:
 - gyorsulási zaj, amely a emberi viselkedés kiszámíthatatlanságát modellezi
 - külső zaj, amelyet a bemeneti adatokhoz adnak hozzá, és az emberi érzékelési és becslési hibáinak modellezésére szolgál

- *Egysávos* és *Többsávos* modellek. Ha a forgalomáramlási modell több sávot és a köztük lévő sávváltásokat is leírja, akkor két fő komponensből áll: a longitudinális dinamikából (gyorsulási modell) és a laterális dinamikából (sávváltási modell). Egyes modellek eredendően tartalmazzák a laterális dinamikát, míg a tisztán longitudinális modellek kiegészíthetők egy megfelelő sávváltási modellel.

A motorizált forgalomáramlás mellett a fentebb tárgyalt modellkeretekbe beilleszthető a nem motorizált forgalom dinamikája is. A nem motorizált forgalom magában foglalja a gyalogos, kerékpáros és vegyes forgalmat. A járművekkel ellentétben a gyalogosok általában szabadon mozoghatnak két térdimenzióban, azaz két térbeli koordinátájuk van (x és y). A kívánt (járási) sebesség mellett minden gyalogosnak van egy kívánt iránya is. Következésképpen a kívánt sebesség vektorális mennyiség.

2.2. Autókövető modellek

Az autókövető modellek a mikroszkopikus forgalomáramlási modellek legfontosabb képviselői. Ezek egyedi vezető-jármű egységek szemszögéből írják le a forgalom dinamikáját. Szigorú értelemben az autókövető modellek csak a vezető viselkedését írják le más járművekkel való interakciók jelenlétében, míg a szabad forgalomáramlást külön modell írja le. Egy autókövető modell akkor teljes, ha képes leírni minden helyzetet, beleértve a szabad forgalomban való gyorsítást és utazósebességet, a többi jármű követését álló és nem álló helyzetekben, valamint a lassú vagy álló járművek, és a piros lámpák megközelítését. A teljes modell gyorsulásra vonatkozó feltételei:

1. A jármű mindig a kívánt sebessége felé törekszik. Minél gyorsabban megy már, annál kevésbé gyorsít, hogy elérje a célsebességét. Ha nincs más jármű előtte, akkor pontosan a kívánt sebességén fog haladni.
2. A jármű annál jobban gyorsít, minél messzebb van az előtte lévő jármű. Ha nagyon kicsi a távolság, csökkenti a sebességét, de ha senki sincs

a hatótávolságán belül, a távolság már nem befolyásolja a gyorsítását; ekkor az 1. pontban leírt módon gyorsít.

3. A jármű a legelől haladó jármű sebességéhez igazodik. Minél gyorsabban megy az elől haladó, annál jobban képes gyorsítani a hátul lévő jármű. Ha nagy a sebességkülönbség és gyorsan közeledik a vezetőhöz, akkor csökkentenie kell a gyorsulását a baleset elkerülése érdekében. Ha szabad az út, a vezető jármű sebessége nem befolyásolja a modell vezetési döntéseit.
4. A jármű álló helyzetben is megtart egy minimális távolságot az előtte lévő járműtől. Ha megállt, akkor nem gyorsít, és még akkor sem mozog hátra, ha valamilyen múltbeli esemény miatt (pl. hirtelen fékezés) a távolság kisebb lett a biztonságos minimumnál.

A modellezett cselekvésektől függően megkülönböztetünk *gyorsulási modelleket* a longitudinális mozgáshoz, *sáv váltási modelleket* a laterális mozgáshoz, és *döntési modelleket* más diszkrét választási helyzetekhez, mint például egy elsőbbségi útra való behajtás.

2.2.1. Gipps Modell

A Gipps Modell az egyik legegyszerűbb teljes, baleset-mentes modell, annak ellenére is, hogy irreális gyorsítási profilt eredményez. A balesetek megelőzése érdekében egy $v_{safe}(s, v_l)$ biztonságos sebességet vezet be, amely az elől haladó jármű sebességétől és távolságától függ. Ez következő feltételezéseken alapul:

1. A fékezési manővereket mindig konstans b lassítással hajtják végre. Nincs különbség kényelmes és maximális lassulás között.
2. Létezik egy állandó Δt reakció idő.
3. Még akkor is, ha az elől haladó jármű hirtelen teljesen lelassít, a távolságkülönbség az elől haladó járműhöz képest nem lehet kisebb egy s_0 minimális távolságnál.

Az 1. feltételezésből következik, hogy a féktávolság, amelyre az elöl haladó járműnek szüksége van egy teljes megálláshoz:

$$\Delta x_l = \frac{v_l^2}{2b}$$

A 2. feltételezésből következik, hogy a teljes megálláshoz a féktávolság mellett egy $v\Delta t$ reakciótávolságra is szükség van.

$$\Delta x = v\Delta t + \frac{v_l^2}{2b}$$

Végül a 3. feltételezés teljesül, ha az s távolságkülönbség meghaladja a szükséges s_0 minimális végső értéket a $\Delta x - \Delta x_l$ különbséggel, ami a vizsgált jármű megállási távolsága és az elöl haladó jármű féktávolsága közötti különbség:

$$s \geq s_0 + v\Delta t + \frac{v^2}{2b} - \frac{v_l^2}{2b}$$

Az a v sebesség, amelyre az egyenlőség teljesül, határozza meg a „biztonságos sebességet”:

$$v_{safe}(s, v_l) = -b\Delta t + \sqrt{b^2\Delta t^2 + v_l^2 + 2b(s - s_0)}$$

A Gipps-modell egy iterált leképezésként van definiálva, amelynek fő eleme a „biztonságos sebesség”:

$$v(t + \Delta t) = \min[v + a\Delta t, v_0, v_{safe}(s, v_l)]$$

2.2.2. IDM - Intelligent Driver Model

Az IDM is egy alap feltételezéseken nyugvó modell:

1. Teljesíti a teljes modell gyorsulásra vonatkozó feltételeit.
2. A lökhárító-lökhárító távolság az elöl haladó járműhöz képest nem ki-

sebb, mint egy „biztonsági távolság” $s_0 + vT$, ahol s_0 egy minimális (lökhárító-lökhárító) távolságkülönbség, és T az elöl haladó járműhöz viszonyított (lökhárító-lökhárító) időrés.

3. Egy intelligens fékezési stratégia szabályozza, hogyan közelítik meg a lassabb járműveket (vagy akadályokat, piros lámpákat):
 - Normál körülmények között a fékezési manőver „lágyszor”, azaz a lassulás fokozatosan növekszik egy kényelmes b értékre, és nullára csökken közvetlenül azelőtt, hogy még egy gépjárműkövetési helyzetbe érkezne, vagy teljesen megállna.
 - Kritikus helyzetben a lassulás meghaladja a kényelmes értéket, amíg a veszély el nem hárul. A fennmaradó fékezési manőver (amennyiben alkalmazható) a szokásos kényelmes b lassulással folytatódik.
4. Az átmenetek a különböző vezetési módok között (pl. a gyorsításból a gépjárműkövetési módba) simák.
5. A modellnek a lehető legtakarékosabbnak kell lennie. Minden modellparaméternek csak a vezetési viselkedés egy aspektusát szabad leírnia.

A szükséges tulajdonságokat a következő gyorsulási egyenlet valósítja meg:

$$\dot{v} = a \left[1 - \left(\frac{v}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{s^*(v, \Delta v)}{s} \right)^2 \right]$$

Az IDM gyorsulása az $\tilde{\mathbf{a}}_{mic}(s, v, \Delta v)$ formában van megadva, és két részből áll: az egyik a pillanatnyi v sebességet veti össze a v_0 kívánt sebességgel, a másik pedig a pillanatnyi s távolságot veti össze a s^* kívánt távolsággal.

A kívánt távolság

$$s^*(v, \Delta v) = s_0 + \max \left[0, vT + \frac{v\Delta v}{2\sqrt{ab}} \right]$$

egy $s_0 + vT$ egyensúlyi taggal és egy $v\Delta v/(2\sqrt{ab})$ dinamikus taggal rendelkezik, amely az intelligens fékezési stratégiát valósítja meg. A modell paraméterei bizonyos helyzetekben:

- Maximális gyorsulás (a): Álló helyzetből indulva a jármű a maximális a gyorsulással kezd. Ahogy a sebesség nő, a gyorsulás fokozatosan csökken, és nullához közelít, amikor a jármű eléri a kívánt sebességét (v_0). A δ kitevő szabályozza sebességcsökkenést.
- Biztonsági távolság: Amikor a jármű egy másik autót követ, a köztük lévő távolság megközelítőleg megegyezik a biztonsági távolsággal ($s_0 + vT$).
- Kényelmes lassulás (b): Amikor a vezető lassabb vagy megállt járművekhez közeledik, a lassulás általában nem haladja meg a b kényelmes lassulás értékét.

Az IDM kívánt távolság (s^*) képletében lévő $v\Delta v/(2\sqrt{ab})$ tag a vezető jármű megközelítéskor fellépő dinamikus viselkedést modellezi. Amikor egy álló járművet vagy piros lámpát közelítünk meg ($\Delta v = v$), a gyorsulás egyenlete a következőformát ölti:

$$\dot{v} = -a \left(\frac{s^*}{s} \right)^2 = -\frac{av^2(\Delta v)^2}{4abs^2} = -\left(\frac{v^2}{2s} \right)^2 \frac{1}{b}$$

, ahol a kinematikai lassulás (b_{kin}):

$$b_{kin} = \frac{v^2}{2s}.$$

A b_{kin} kinematikai lassulás az a minimális lassulás, amely pontosan ahhoz szükséges, hogy elkerüljük az ütközést az előttünk lévő járművel, ha az a pillanatnyi s távolságon van. Ha ezzel a b_{kin} lassulással fékezünk, a féktávolságunk pontosan megegyezik a vezető járműhöz fennálló távolsággal.

2.2.3. Emberi faktor

Az autókövető modellek bemeneti változói korlátozzák a szimuláció realitását, mert:

- Csak a közvetlenül előtte haladó járművet veszi figyelembe
- Figyelmen kívül hagyja a környezeti körülményeket, szomszédos sávban haladókat
- Nem figyel a féklámpára, irányjelzőre és dudaszóra

Ahhoz, hogy az emberi viselkedés valóságúen modellezhető legyen, a következő jellemzők kerülnek bevezetésre:

1. *Véges reakcióidő.* A reakcióidő három részből áll: mentális feldolgozási idő (észlelés, döntés), mozgási idő (pedálcseré) és a jármű technikai válaszideje. A modellezésben a reakcióidő általában konstans, ≈ 1 másodperc értéket vesz fel.
2. *Becslési hibák.* A vezetők pontatlanul becsülik meg a távolságot és az elöl haladó sebességét.
3. *Előrelátás.* A vezető figyelembe veszi a következő-legközelebbi és a távolabbi járműveket, illetve féklámpák, irányjelzők és dudák bemeneti jelként megjelennek.
4. *Kontextus.* A vezetési stílus függ a jelenlegi és a múltbeli általános forgalmi helyzettől. Például, ha a vezető egy ideig zsúfolt forgalomban haladt, az időbeli követési távolság az elöl haladó járműhöz képest megnő, és a vezető ébersége csökken. Ezzel szemben, amikor sávlezáráshoz közelít, a vezetők lazábban reagálnak a sávba betolakodó járművekre, és átmenetileg elfogadnak a szokásosnál kisebb időbeli távolságot.
5. *Együttműködés.* Az vezetők ezen aspektusa fontos a kötelező sávváltással járó helyzetekben: A vezetők kimosognak a belső sávból, vagy fékeznek (vagy gyorsítanak), hogy helyet csináljanak más vezetők számára.

2.3. Sávváltási modellek

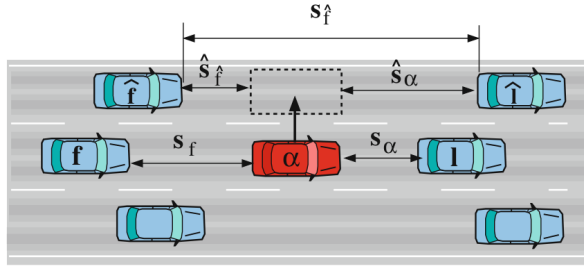
A forgalomáramlás modellezése során diszkrét választási helyzetek merülnek fel, mint például annak eldöntése, hogy biztonságos-e behajtani egy elsőbbségi útra, vagy hogy a járművezető helyes reakciója a haladás vagy a megállás-e egy forgalmi lámpához közeledve, amely hamarosan pirosra vált.

2.3.1. Általános döntési modell

Feltételezzük, hogy egy adott pillanatban a vezető választhat az alternatívák K diszkrét halmazából. A sávváltások kontextusában az alternatívák az (aktív) döntések lennének a balra vagy jobbra történő sávváltásra, és a (passzív) döntés a sávváltás elmulasztására. Amikor egy elsőbbségi útra készül behajtani, az alternatívák a beolvadás kezdeményezése, vagy a megállás és a várakozás a megfelelő résre a főúti járművek között. Feltételezzük, hogy a vezetők tisztában vannak döntéseik következményeivel, azaz képesek előre látni, minden alternatíva esetében, az összes érintett jármű sebességét és távolságát. Ez lehetővé teszi számunkra, hogy kiszámítsuk a hasznosságokat. A döntési folyamatban a vezető maximalizálja hasznosságát, feltéve, hogy a cselekvés biztonságos.

Biztonság kritérium. Egyik vezetőnek (β) sem, akit a k alternatíva választásának következményei érintenek (beleértve az α döntéshozót is), kell kritikus manővert végrehajtania a k alternatíva melletti döntés következtében. Egy manőver kritikusnak minősül, ha a fékezési lassulások meghaladják a biztonságos lassulást.

Önsztönző kritérium. Az összes biztonságos k' alternatíva közül választva, az α vezető a maximális hasznosságú opciót választja.



4. ábra. A kép az általános sávváltási döntési modell jelöléseit mutatja be, amely a hasznosság maximalizálása elvén alapul, figyelembe véve egyidejűleg a biztonsági kritériumokat. A α jármű a középső sávból próbál balra sávot váltani. A \hat{v} és \hat{s} jelölések az új, lehetséges helyzetet írják le, amely a sávváltás után jönne létre, biztosítva, hogy a manőver ne kényszerítsen senkit kritikus fékezésre, és maximális előnyt jelentsen α számára. [2].

2.3.2. MOBIL

A modell a *biztonság* és *ösztönző* kritériumok mellett, kiegészül egy *udvariasság faktorral* (p), amely figyelembe veszi a másokra rótt hátrányt.

$$\hat{a}_\alpha - a_\alpha + p \sum_{\beta \in \{\text{érintett}\}} (\hat{a}_\beta - a_\beta) > \Delta a + a_{\text{bias}}$$

- $\hat{a}_\alpha - a_\alpha$: A döntéshozó (α) saját hasznossága, a sávváltásból származó előny.
- $p \sum_{\beta \in \{\text{érintett}\}} (\hat{a}_\beta - a_\beta)$: Az érintett járművek gyorsulásában bekövetkező változások (a hátrány) udvariassági faktorral (p) súlyozva. A negatív különbség (lassulás) a többi jármű számára hátrányt jelent.
- $\Delta a + a_{\text{bias}}$: A sávváltáshoz szükséges minimális elvárható előny.

3. Időjárás

Az időjárási körülmények a bizonytalanság egyik legfőbb forrását jelenti a városi közlekedésben. Ellentétben az infrastruktúrával - amely lassan változik, az időjárás hirtelen és jelentős mértékben képes módosítani a forgalmi viszonyokat. Mind [4] és [6] kutatás azt igazolja, hogy a kedvezőtlen időjárás,

eső, hó, köd vagy szélsőséges hőmérséklet az útkapacitás és járműsebesség csökkenéséhez, valamint az úthálózat romlásához vezet. Ezzel párhuzamosan növekszik a baleseti kockázat. Városi környezetben, ahol a forgalmi igény csúcsidőszakokban gyakran meghaladja a rendelkezésre álló kapacitást, még a mérsékelt időjárási zavarok is torlódásokat okozhatnak.

A forgalomszimulációkban az időjárást általában diszkrét állapotok (tiszta idő, eső, köd, hó) segítségével reprezentálják, amelyek mindegyikéhez specifikus forgalomáramlási paraméterek tartoznak. A megfigyelések azt mutatják hogy a csapadék mérhetően csökkenti az áramlási sebességet és növeli az időbeli követési távolságot, [4] szerint a kedvezőtlen időjárási viszonyok átlagosan 18%-os növekedést okoznak a késések terén. Esetleges hóesésnél pedig, [6] megfigyelése alapján az átlagsebesség akár 40%-kal, a forgalom volumene pedig több mint 10%-kal visszaeshet.

Az időjárás elsősorban kettő mechanizmuson keresztül befolyásolja a forgalomáramlást:

1. Sebességcsökkenés: A vezetők a romló látási viszonyok és csökkenő tapadás miatt módosítják a vezetési viselkedésüket.
2. Kapacitáscsökkenés: A megnövekedett követési távolságok és az óvatosabb vezetői magatartás következménye.

[6] kimutatta, hogy sebesség-forgalom (speed-flow) összefüggés esős időben lefelé tolódik el, ami azt jelenti, hogy adott forgalmi sűrűség mellett elérhető sebesség alacsonyabb, mint száraz körülmények között. Ez a hatás fontossá válik a csúcsidőszakokban. Szoros összefüggés áll fenn az időjárási körülmények és a balesetek bekövetkezése között. [7] alapján a balesetek gyakorisága jelentősen megnő esőben és hóban a tiszta időhöz képest.

A szakirodalom alátámasztja, hogy az időjárást, mint állapotváltót be kell vonni a forgalomszimulációba, mert az befolyásolja a teljesítményt, biztonságot és megbízhatóságot. Viszont azok a modellek és rendszerek, amelyek mellőzik az időjárási hatásokat, rendszerint alulbecsülik a torlódásokat és az utazási idők változását, főleg csúcsidőszakokban [6].

4. Bottleneck és hatásai

A városi hálózatok torlódásait elsősorban *bottleneck*-ek határozzák meg. Ezek két fő csoportra bonthatók:

- Ismétlődő. Geometriai adottságok (sávszűkület, felhajtók) vagy szabályozási korlátok (jelzőlámpák) miatt alakulnak ki. Ezek napi mintázatot alkotnak a forgalmi igények tekintetében.
- Nem ismétlődő. Váratlan események, balesetek vagy műszaki hibák okozzák. Ezek helyszíne és időpontja véletlenszerű.

A balesetek jelentős mértékben csökkentik az útkapacitást: egyetlen sáv lezárása egy többsávos úton akár az áteresztőképesség több mint 50%-os csökkenésével járhat.

4.1. Lökéshullám-elmélet

A torlódások dinamikájának és a sorok térbeli kiterjedésének modellezésére a lökéshullám-elmélet van használva. Ez azt feltételezi, hogy a járművek a sebességüket pillanatszerűen változtatják meg egy határvonalon, amelyet lökéshullámnak nevezünk. Adott a forgalomáramlás alapösszefüggése:

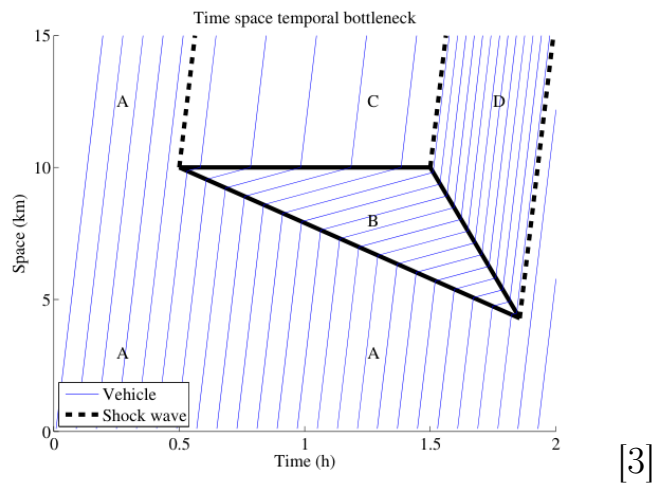
$$q = k \cdot v$$

Ahol a k a sűrűség és a v a sebesség. A két forgalmi állapot (például nem-torlódott A és torlódott B állapot) közötti lökéshullám(w) sebességét a következő képlet adja meg:

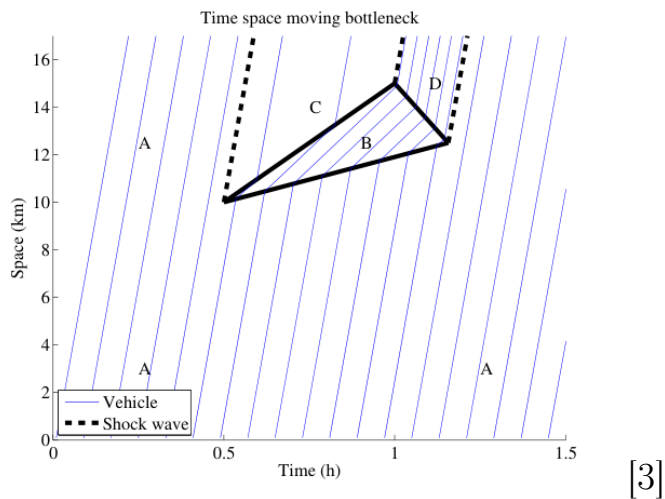
$$w = \frac{q_A - q_B}{k_A - k_B} = \frac{\Delta q}{\Delta k}$$

Ez a sebesség a lökéshullám meredekségét jelenti, ha w negatív, akkor a torlódás az áramlással szemben felfelé terjed. Az egyenlet alkalmazható mind rögzített, mind mozgó bottleneck-ek esetén is:

- Rögzített. Ide tartoznak a balesetek vagy útépítések.



- Mozgó. Lassú járművek (mezőgazdasági gépek, konvojok) okozzák. Ebben az esetben a lökéshullám sebessége megegyezik a mozgó akadály sebességével. A torlódás azért alakul ki, mert a járművek felhalmozódnak a lassú jármű mögötti területen.



5. Közösségi közlekedés

A közösségi közlekedési rendszer ugyanabban a városi ökoszisztémában üzemel, mint az egyéni járművek, ebből adódóan ki van téve a városi környezet minden bizonytalansági tényezőjének.

A rögzített útvonalhálózat, menetrendi kényszerek, a megállóhelyi utascserre folyamatok és a járművek kapacitáskorlátai miatt az egyéni járművek szimulációjától eltérő megközelítést igényel. A közösségi közlekedési járművek működése diszkrét események sorozataként írható le, ahol a legfontosabb események a megállóba érkezés, a várakozási idő és az indulás. Az utasforgalmi teher időfüggő természete miatt a várakozási idő a csúcsidőszakokban megnövekedhet. Amikor egy jármű késik, a következő megállóban több utas halmozódik fel, ami tovább növeli a várakozási időt. Ez egy öngerjesztő folyamatot indít el, amely járművek torlódásához vezet. Ekkor a késésben lévő járművet az utána következő, kevesebb utast szállító jármű beéri, és konvojban haladnak tovább, ami csökkenti a vonal kapacitását és növeli az utasok várakozási idejét.

Mind a buszok, mind a villamosok elválaszthatatlanok az egyéni gépjárműforgalomtól, hiszen ugyanazon infrastruktúrát és hálózatot használják, emiatt a közösségi közlekedés járművei szintén résztvevői a torlódásoknak, főleg ha hiányzik a kijelölt buszsáv. A szimuláció során figyelembe kell venni, hogy a buszok és villamosok jelenléte is egy faktor forgalom áramlás befolyásolásában, a gyakori megállások és a fizikai méretből adódó mögöttes torlódás miatt.

Az időjárási körülmények bár csökkentik az útkapacitást és lassul a haladási sebesség, viszont emiatt növekszik az utasforgalmi igény. A közösségi közlekedés teljesítményének javítására alkalmazható a dedikált buszsáv, jelzőlámpa prioritás vagy meghosszabbított sávok, amelyekkel kikerülhetők a feltorlódások.

6. A szimulációs rendszer gyakorlati megvalósítása

6.1. Architektúra és működés

A szimulációs rendszer létrehozásakor cél a közlekedési folyamatok mikroszkopikus modellezése, különböző scenáriók vizsgálata és a szimuláció vizuális megjelenítése. Rétegelt, hibrid szimulációs-vizualizációs struktúra biztosítja a funkcionális komponensek elkülönülését, illetve a jövőbeli bővíthetőségét. A rendszer alapelve, hogy a szimulációs állapot egyetlen helyen, a szimulációs motorban kerül kezelésre, míg a többi komponens csak olvashatja ezt az állapotot. A rendszer főbb logikai egységei:

1. *Hálózati réteg.* Ez a réteg felelős az úthálózat topológiai reprezentációjáért és az útvonaltervezésért. A közlekedési hálózat egy irányított gráf, ahol a csúcsok a kereszteződések, az élek pedig az útszakaszok. Az élek olyan attribútumokkal rendelkeznek, mint az útszakasz hossza, a megengedett sebesség és az élhez tartozó geometriai információ. A routing műveletek során az élekhez rendelt súlyok reprezentálják az útszakasz használatának költségét. Ez a költség az útszakasz bejárásához szükséges becsült idő. A hálózati réteg nem tartalmaz járműspecifikus viselkedési logikát, Amennyiben egy útszakaszon baleset történik, vagy egyéb akadály jelenik meg, akkor az adott élhez tartozó súly módosul.
2. *Ágens réteg.* Minden jármű egy önálló entitás, saját állapottal és döntési mechanizmussal. Az ágens réteg felelős ezeknek a járműveknek a reprezentációjáért is viselkedésének modellezéséért. Minden jármű rendelkezik egy aktuális pozícióval az úthálózaton, sebességgel, követendő útvonallal valamint a vezetési profilhoz tartozó paraméterekkel. Az ágens egyik legfontosabb feladata a vezető jármű azonosítása, az adott útszakaszon haladó járművek között mindig meghatározható, az a jármű amely az aktuális előtt halad. Ez az információ kerül felhasználásra az autókövető modellnél.

3. *Modellezési réteg.* Ez réteg felelős a matematikai modellek implementálásáért, amelyek a járművek döntéseit és mozgását írják le. Ide tartozik az autókövető modell, sávváltási döntési mechanizmus és a környezeti tényezőket figyelembe vevő paraméter. A viselkedési logika és a szimulációs motor független egymástól. A réteg feladatai közé tartozik még a gyorsulás kiszámolása (aktuális sebesség, követési távolság és a vezető jármű sebessége alapján).
4. *Szimulációs réteg.* A rendszer központi eleme a szimulációs motor, amely a diszkrét eseményvezérelt működést valósítja meg. A szimulációs idő nem folytonosan halad előre, hanem események sorozataként. Minden jármű egy külön szimulációs folyamat, amely rendszeres időközönként frissíti az állapotát. A frissítés során a jármű értékeli a környezetét, meghozza a szükséges döntéseket és végrehajtja azokat. A motor további feladatai a globális események kezelése, mint a balesetek aktiválása, megszüntetése és az időjárési állapotok változása.
5. *Vizualizációs réteg.* A szimuláció eredményeinek megjelenítése egy hibrid vizualizációs rendszeren keresztül történik. Egy raszter alapú háttérre épül, amely biztosítja a földrajzi kontextust. A dinamikus objektumokat pedig az OpenGL renderer jeleníti meg.
6. *Jelentési réteg.* A rendszer legutolsó komponense az eredmények kiértékelésért felelős réteg. Ez gyűjti össze a szimuláció során keletkező statisztikai adatokat, például az utazási időket, késéseket vagy torlódásokat.

6.2. Térinformatika

A szimulációs rendszer alapját a térbeli adatok biztosítják. A járművek mozgása, az útvonal tervezés és a forgalmi események modellezése mind az úthálózat topológiai és geometriai reprezentációjára épülnek. A térinformatikai adatok forrása az OpenStreetMap (OSM), de fontos kiemelni, hogy a OSM

adati elsősorban térképi megjelenítésre készülnek, nem pedig mikroszkopikus közlekedési szimulációk számára. A nyers adatok adatfeldolgozáson esnek át, azzal a céllal, hogy egy szimulációra optimalizált hálózati modell jöjjön létre. Az adatfeldolgozás folyamata:

1. az úthálózat és közlekedési objektumok letöltése,
2. adatok topológiai és geometriai normalizálása,
3. szükséges attribútumok meghatározása,
4. közösségi közlekedési megállók illesztése,
5. futásidejű hálózati modell létrehozása.

Úthálózat adatai. Az osmnx könyvtár használatával az OSM adatok és hálózati struktúrák letöltésre kerülnek, egy előre definiált, a bounding box-on belülré eső földrajzi helyre vonatkozóan. A megadott szélességi és hosszúsági koordináták használatával kontrollható a szimulációs terület és a feldolgozandó adatok mennyisége. A letöltött gráf GraphML formátumban kerül mentésre, amely már tartalmazza a gráfhoz tartozó topológiai és geometriai információkat. A buszmegállók pontszerű objektumok, melyek különböző címkékkel vannak ellátva.

Úthálózat előfeldolgozása. AZ OSM adatok WGS84, földrajzi koordináta rendszerben vannak tárolva, ahol a koordináták fokokban vannak megadva. Az előfeldolgozás az alábbi műveletek hajtódnak végre:

- csúcsok és élek azonosítása,
- geometriai koordináták vetítése metrikus térbe,
- élhossz kiszámítása,
- sebesség attribútum meghatározása,
- sávszám meghatározása,

- élek egyedi azonosítójának létrehozása.

Koordináták vetítése metrikus térbe. A szimulációs rendszerben a járművek mozgása metrikus koordináta rendszerben történik, ahol a távolságok és pozíciók méterben értendők. Ahhoz, hogy a szimulációhoz szükséges és fontos mennyiségek (útszakaszok hossza, járművek közötti táv, járművek pozíciója) meghatározhatóak legyenek, a koordinátáknak síkbeli és lineáris mértékegységeknek kell lenniük. Ehhez a Web Mercator (EPSG:3857) vetítést alkalmazza a rendszer:

$$x = R \cdot \lambda$$

$$y = R \cdot \ln \left[\tan \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \right]$$

ahol

- R a Föld sugara,
- λ a hosszúsági koordináta radiánban,
- ϕ a szélességi koordináta radiánban.

A transzformáció eredményeként a koordináták egy síkbeli térben jelennek. A vetítés lehetővé teszi

- az útszakaszok hosszának pontos kiszámítását, mivel a koordináták már pontok, így euklideszi távolságként számolhatók,
- a járművek mozgásának stabilitását, mivel a mikroszkopikus modellben a járművek pozíciója gyakran, kis léptekben változik,
- az OSM raszteres térkép tile-ok használatát, mivel az és a Google Maps is az EPSG:3857 koordináta rendszert alkalmazza [8] [9].

Útszakaszok geometriai reprezentációja. Az OSM adatokban az útszakaszok gyakran több pontból álló poligonok. Ezen geometriai információk megőrzése fontos a jármű pozíciók pontos meghatározásakor, a járművek orientációjának kiszámításakor és vizuális megjelenítéskor.

Él attribútumok meghatározása. Az egyik legfontosabb attribútum az útszakasz hossza, amely a járművek mozgásának alapja. Amennyiben az OSM adatok tartalmazzak maxspeed értéket, akkor a rendszer azt fogja használni, ellenkező esetben lakóutcák esetén alacsonyabb, míg főutak esetén magasabb sebesség kerül becslésre.

Élek egyedi azonosítója. A szimuláció során szükséges, hogy minden útszakasz egyértelműen azonosítható legyen. Ez fontos az útvonaltervezés, balesetek kezelése és járművek mozgásának követése során. Minden élhez az egyedi azonosító a gráf csúcs azonosítójából és az él indexéből áll össze (pl.: 26754864-7772641524-0).

Buszmegállók. Az OSM adatokban a megállók pontszerű objektumok, amelyek nem tartoznak egy konkrét útszakaszhoz. A megálló a legközelebb eső útszakaszhoz illesztődnek, illetve a következő adatok kerülnek elmentésre, annak érdekében, hogy a buszok helyzete egyértelműen meghatározható legyen a szimuláció során:

- a megálló koordinátái,
- a hozzá tartozó él azonosítója,
- a megálló neve és azonosítója.

A létrehozott hálózati modellt több komponens is használja. A routing algoritmusok ezt a gráfot alkalmazzák a legrövidebb út kiszámolásához, a jármű modellek az útszakaszok mentén mozognak és az élhossz alapján számolható a pozíciójuk. A balesetek egy adott élhez kapcsolódnak, mely súlyát módosítják.

6.3. Útvonaltervezés

A közlekedési szimulációk egyik alapvető komponense az útvonaltervezés, amely meghatározza, hogy a járművek milyen útvonalon közlekedjenek a há-

lőzaton belül. Ez egy dinamikus folyamat, amely figyelembe veszi a járművezetői viselkedést, a forgalmi eseményeket és a hálózat aktuális állapotát. Vagyis a mechanizmus létrehozásánál, fontos, hogy képes legyen modellezni a valós vezetői viselkedés bizonytalanságait és adaptáló döntéseit.

Legrövidebb út. A routing rendszer alapja a legrövidebb út meghatározására szolgáló algoritmus. Ezt a NetworkX könyvtár beépített algoritmusai biztosítják, amely képes súlyozott gráfban meghatározni két csúc közötti minimális költségű útvonalat. Az algoritmus bemenetei:

- a kiinduló csomópont,
- cél csomópont,
- élek súlyfüggvénye.

A számítás eredménye egy csomópontokból álló sorozat, amely reprezentálja az optimális útvonalat. Mivel a szimulációs rendszer nem csomópont, hanem él mentén dolgozik, emiatt a jármű mozgásának alapját egy éllista képezi.

Járművek útvonaltervezése. A személygépkocsik útvonaltervezése a szimuláció során többször is végrehajtásra kerülhet. A járművek kezdetben meghatározzák a kiindulási pont és cél közötti optimális útvonalat. Ez az útvonal azonban nem feltétlen kerül követésre, mivel a vezetői profiloktól függő tervezési horizontot alkalmaz a szimuláció. A tervezési horizont határozza meg, hogy a jármű egyszerre legfeljebb hány útszakaszt vesz figyelembe a döntései során, vagyis a járművezetők nem a teljes útvonalat optimalizálják, hanem szakaszolva hozzák meg a döntéseiket. A folyamat a következő lépésekből áll:

1. A jármű meghatározza a legrövidebb utat a jelenlegi pozíció és a célpont között.
2. Az útvonal első néhány éle kiválasztásra kerül a tervezési horizont alapján.

3. A jármű ezen az útvonalon halad tovább.

4. A következő csomópont elérésekor a folyamat ismétlődik.

A szimuláció három alapvető vezetési stílust, profilt különböztet meg:

- kezdő vezető,
- átlagos vezető,
- tapasztalt vezető.

Ezek a profilok több paraméterben is különböznek egymástól.

1. táblázat. Vezetői profilok paraméterei

Paraméter	Leírás	Kezd.	Átl.	Tap.
planning_horizon_edges	Útvonaltervezési horizont (élek száma)	2	5	10
wrong_turn_chance	Téves irányválasztás valószínűsége	0,22	0,08	0,02
reroute_compliance	Újratervezési hajlandóság (baleset esetén)	0,60	0,85	0,98
v0_factor	Kívánt sebesség szorzója (IDM)	0,90	1,00	1,05
headway_factor	Követési időköz szorzója (IDM)	1,20	1,00	0,92

Buszok útvonaltervezése. A közösségi közlekedési járművek útvonaltervezése eltér a személygépkocsiktól. A buszok egy előre meghatározott megálló listával rendelkeznek, amely a járat útvonalát határozza meg. A busz teljes útvonala a megállók közötti legrövidebb utak összekapcsolásával jön létre. Ez az útvonal statikusabb, mint a személygépkocsiké, mert a megállók sorrendje nem változik.

Dinamikus újratervezés. A városi közlekedés egyik fontos jellemzője, hogy a forgalmi viszony folyamatosan változnak. Balesetek és torlódások jelentősen befolyásolják az optimális útvonalakat. Amikor egy baleset történik, az

adott útszakasz súlya jelentősen megnövekszik. Ez azt jelenti, hogy a routing algoritmusok számára az adott él használata rendkívül költséges lesz. A járművek rendszeresen ellenőrzik, hogy a tervezett útvonaluk tartalmaz-e olyan útszakaszt, amelyet incidens érint. Fontos, hogy az érintett él nem kerül eltávolításra a gráfból, mindössze a routing algoritmus csak akkor választja, ha nincs más opció. Az újra tervezés azonban nem kötelező minden jármű számára, a döntést a vezetési profil befolyásolja.

Reprodukálhatóság. A rendszer minden véletlenszerű döntéshez egy seed által kontrollált véletlen szám generátort használ. Azonos paraméterek és seed esetén a szimuláció minden futtatásakor ugyanazt az eredményt adja.

6.4. Szimulációs motor

A szimulációs motor felelős a járművek mozgásáért, forgalmi események és környezeti hatások időbeli kezeléséért. A rendszer alapja egy diszkrét esemény vezérelt szimulációs modell, mellyel végre hajtható több folyamat időbeli ütemezésének és egymásra hatásának modellezése. A rendszer állapota csak meghatározott időpillanatokban, események hatására változik. Esemény lehet egy jármű mozgásának frissítése, egy busz megállóba érkezése, baleset bekövetkezése vagy útvonal újra tervezés.

A szimuláció központi eleme a szimulációs környezet. Ez azaz objektum, amely felelős a szimulációs idő kezeléséért és az események ütemezéséért. Egy globális időváltozó tart fenn, amely reprezentálja az aktuális időpillanatot. A szimuláció során minden jármű egy külön folyamat, és ezek a folyamatok futnak egymással párhuzamosan. A motor feladatai:

- járműfolyamatok létrehozása és kezelése,
- események időbeli kezelése,
- hálózati állapot frissítése,
- környezeti események kezelése,

- szimulációs állapot exportálása a vizuális réteg számára.

Szimulációs idő. A futás közben a szimulációs idő nem folyamatosan, hanem diszkrét lépésekben halad előre. A járművek állapotának frissítése egy rögzített időlépésben történik,

$$\Delta t = 0.02s$$

A szimuláció során, minden jármű folyamat a következő eseményig szünetel, majd a megadott idő elteltével újra aktiválódik. A jármű folyamat felelős a jármű teljes viselkedésének kezeléséért, beleértve a mozgást, döntéshozatalt és a környezeti interakciókat. A folyamat három fázisra bontható:

1. érzékelés,
2. tervezés,
3. végrehajtás.

Érzékelés. Az érzékelés során a jármű információkat gyűjt a környezetéről. A jármű meghatározza:

- az aktuális útszakaszt,
- a vezető jármű pozícióját,
- a két jármű közötti távolságot,
- a sebességet.

A jármű ezen kívül ellenőrzi, hogy az aktuális útszakaszt érinti-e baleset.

Tervezés. A tervezés során a jármű meghozza következő mozgáshoz szükséges döntéseket. Első lépésként a jármű ellenőrzi, hogy szükséges-e útvonal újratervezése. A következő lépésben a jármű meghatározza a mozgását befolyásoló sebesség korlátokat. Ezek származhatnak:

- az útszakasz sebesség korlátjából,

- a vezető jármű sebességéből,
- az útvonal geometriájából,
- az időjárési hatásokból.

Végrehajtás. A végrehajtás során a jármű frissíti a mozgási állapotát. Ez a gyorsulás kiszámításából, a sebesség frissítéséből és a pozíció frissítéséből áll. Amikor egy jármű eléri az aktuális útszakasz végét, egy új esemény kövekezik be: az élhatár átlépés. Ekkor a jármű elhagyja az aktuális útszakaszt, belép a következő útszakaszra és frissíti a hálózati foglaltságot. Ez az esemény fontos a vezető jármű meghatározásához és a torlódások modellezéséhez.

A közösségi közlekedési járművek működése további eseményeket vezetnek be. Amikor egy busz eléri a kijelölt buszmegállót, akkor egy várakozási esemény aktiválódik. Ilyenkor egy meghatározott ideig (amely függ a megálló utasforgalmától és az aktuális forgalmi viszonyoktól) nem mozog, ezzel reprezentálva az utas fel és le szállást.

A szimuláció során a forgalmi incidensek külön eseményként jelennek meg. A balesetek aktiválása és megszüntetése a szimulációs motor által ütemezett események.

6.5. Járműmodellek

A mikroszkopikus modellekben minden jármű külön entitás, és ezek kölcsönhatásaik alkotják a városi forgalom dinamikáját. A járműmodellek több komponensre alapulnak:

- jármű állapotának reprezentációja,
- autókövető modell,
- útvonal követése,
- vezetési profilok által meghatározott viselkedési paraméterek.

A jármű objektum tartalmazza, mindazokat az adatokat, amelyek szükségesek a jármű mozgásának és döntéseinek meghatározásához. A jármű állapota az alábbi információkból áll össze:

- az aktuális útszakasz azonosítója,
- a jármű pozíciója az útszakasz mentén,
- a jármű sebessége,
- a jármű gyorsulása,
- a tervezett útvonal,
- a járművezetői profil.

A jármű pozíciója nem globális, hanem az adott útszakasz mentén megtett távolságként kerül elmentésre. A jármű viselkedését befolyásoló autó követési modell paramétereit és a vezetési profilhoz tartozó döntési tényezőket is tartalmazza az objektum.

A szimulációban az autókövető viselkedést az Intelligent Driver Model (IDM) írja le. A modell alapelve, hogy a jármű gyorsulása a kívánt sebességtől és a követési távolságtól függ. Ha a jármű előtt nincs akadály, akkor az fokozatosan gyorsít a kívánt sebesség irányába. Ha azonban egy jármű található előtte, akkor a modell figyelembe veszi a követési távolságot. A gyorsulás számítása során az IDM törekszik egyensúlyt tartani a sebességnövelési törekvés és a biztonságos követési távolság fenntartása közt.

A korábban említett vezetési profilok egyik fontos viselkedési eleme a téves irányválasztás. Egy valószínűségi paraméter segítségével bizonyos esetekben a jármű eltérhet az optimális útvonaltól, és egy másik irányt választ. Ha a jármű útvonalán baleset, vagy torlódás jelenik meg, akkor dönthet arról, hogy új útvonalat keres.

A járműmodellek paramétereit az időjárási körülmények hatására módosulhatnak. Esős vagy havas időben a követési távolság megnövekedhet, és a járművek lassabban gyorsíthatnak.

6.6. Vizualizáció

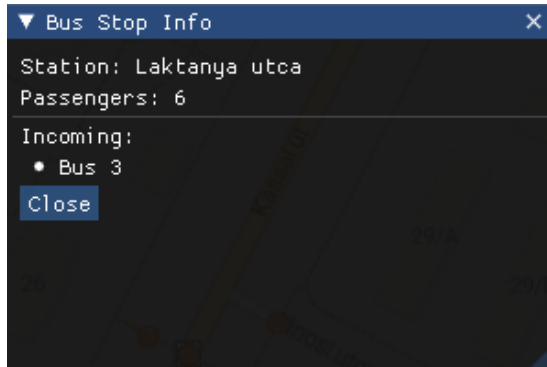
A valós idejű vizualizáció lehetővé teszi a szimuláció követését és az eredmények elemzését. A környezet megjeleníti a járműveket és azok mozgását, a buszmegállókat, útvonalakat és az előforduló forgalmi eseményeket. A megjelenítés egy adott sorrendben történik, annak érdekében, hogy minden elem jól látható legyen. A sorrend:

1. statikus térkép mint háttér,
2. járművek,
3. közlekedési megállók,
4. forgalmi incidensek,
5. útvonalak
6. felhasználói felület.

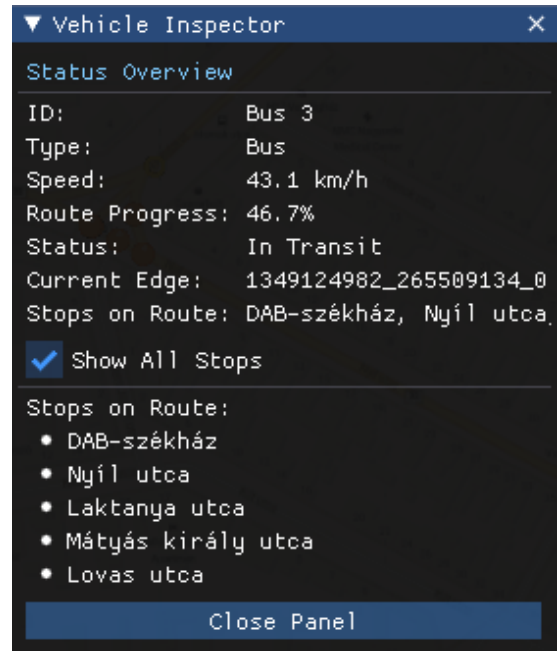
Ezt követve biztosított, hogy a dinamikus elemek ne vesszenek el a háttérben.

Járművek megjelenítése nem pontokként történik, hanem egy ikon használatával, amely a jármű helyzete mellett a haladási irányt is reprezentálja. Annak érdekében, hogy a mozgás folyamatosan legyen, a jármű előző és aktuális (útszakaszon mért) pozíciói között interpoláció történik.

Kiválasztott jármű esetén a jármű teljes útvonala kirajzolódik, ha forgalmi eseménybe ütközik, akkor nem csak az érintett útszakasz kerül vizualizálásra, de a jármű újra tervezett útvonala is. Megálló kiválasztásával megtudható az adott megálló neve, az ott várakozó utasok száma és az azon buszjáratok száma, amelyek érintik a megállót. Ugyanígy a buszok kijelölésekor megtudható a járat száma, jelenlegi státusza (tranzit, vagy várakozás), sebessége és az útvonalat alkotó buszmegállók.



(a) Buszmegálló információ.



(b) Busz információi.

A rendszer felülete tartalmazza a szimuláció indítását, különböző scenárió választását és saját beállítását. A rendszer képes headless, azaz grafikus megjelenítés nélkül is futni. Ekkor a szimuláció végeztével egy jelentés készül, amely tartalmazza a következő információkat:

- scenárió neve,
- futási idő
- seed mód (fix, vagy random)
- össze ágens száma (autók és buszok)
- bekövetkezett balesetek száma
- buszmegálló események
- átlagos, medián, minimum, maximum megállási idő (dwell time)
- P50, P75, P90, P95 megállási idő percentilisek
- átlagos és késés

- járművet érintő balesetek száma
- időjárási állapot

Az alábbi linken megtekinthető egy példa jelentés.

https://github.com/danebencedavid/Data-Science-MSc-Thesis/blob/main/docs/example_report.pdf

7. Összefoglalás

8. Irodalomjegyzék

Hivatkozások

- [1] Mathew, T. V. *Fundamental Relation of Traffic Flow*. NPTEL, Indian Institute of Technology Bombay.
- [2] Treiber, M. and Kesting, A. (2013). *Traffic Flow Dynamics: Data, Models and Simulation*. Springer-Verlag, Berlin.
- [3] Knoop, V. L. (2018). *Traffic Flow Theory: An Introduction with Exercises*. TU Delft Open.
- [4] Chen, C., Zhao, X., Liu, H., Ren, G., Zhang, Y., and Liu, X. (2019). Assessing the influence of adverse weather on traffic flow characteristics using a driving simulator and VISSIM. *Sustainability*, 11(3), 830.
- [5] Rakha, H., Farzaneh, M., Arafeh, M., and Sterzin, E. (2012). Inclement weather impacts on freeway traffic stream behavior. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 1(1), 25–42.
- [6] Becker, N., Gerike, R., and Axhausen, K. W. (2022). Modeling hourly weather-related road traffic variations for federal roads in Germany. *European Transport Research Review*, 14(1).

- [7] Qiu, L., Nixon, W. A. (2008). Effects of Adverse Weather on Traffic Crashes: Systematic Review and Meta-Analysis. *Transportation Research Record*, 2055, 139–146.
- [8] Google. *Map and Tile Coordinates*. Elérhető:
<https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/coordinates>
- [9] OpenStreetMap. *Web Mercator*. Elérhető:
https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Web_Mercator#:~:text=EPSG:3857%20is%20a%20Spherical,as%20Google%20and%20later%20OpenStreetMap.