Ágens-alapú modellek a térinformatikában

Wirth Ervin

PhD Értekezés

Budapest, 2017

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Vásárhelyi Pál Építőmérnöki és Földtudományi Doktori Iskola

Témavezető:

Dr. Szabó György

Elsősorban szeretném megköszönni Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vásárhelyi Pál Építőmérnöki és Földtudományi Doktori Iskolájának és kutatóhelyemnek a BME Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék kollektívájának a kutató munkámhoz nyújtott segítséget, külön megköszönve témavezetőm Dr. Szabó György támogatását.

Illetve szeretném megköszönni bátyám és szüleim támogatását.

Előszó

Az értekezés új kutatási eredményeket, modelleket mutat be a térinformatika és az ágens-alapú modellezés integrálásával létrehozott aktívan fejlődő, új területen.

A mű olyan ágens-alapú modellekkel foglalkozik, amelyek közös jellemzője, hogy szereplőik, az ágensek időben változó térbeli pozícióval rendelkeznek. Következésképp az ágensmodellek alkalmasak a térben és időben változó dolgok, jelenségek leírására. Így esett a választásom erre a korunkban aktívan fejlődő területre, amelyben az elméleti áttekintésen túl új és újszerű ágensmodelleket is bemutatok.

A mű szerkezeti felépítésének első részét a téma szakirodalmi bemutatása adja, a további fejezetek egyedi prototípus modellek fejlesztését és kiértékelését tartalmazzák. Az esettanulmányok kidolgozása a kapcsolódó szakterületek áttekintésével történt, az elsőnek a témája a tájdiverzitás, melynek mérésére egy alternatív ágensmodell került kidolgozásra. A második esettanulmány az evakuáció szimulációban mutat be egy újszerű ágens-alapú modellt.

Az értekezés célkitűzései:

- Az ágens-alapú modellezési módszertan bemutatása
- Ágens-alapú prototípus modell készítése a tájdiverzitás jelenség komplex mérésére
- A tájdiverzitást mérő ágensmodell felhasználása
- Újszerű ágens-alapú prototípus modell készítése az evakuáció szimuláció témakörében
- Olyan ágensmodell készítése, amely megragadja az emberi mozgás természetes alapelemét, a lépést
- Olyan szofisztikált modell készítése, amely feloldja a celluláris modellek térbeli korlátait
- Egy általánosan alkalmazható, könnyen testreszabható evakuációs ágensmodell kifejlesztése
- Olyan ágensmodell készítése, amely képes valós idejű szimulációs eredményeket is adni

Tartalom

Előszó 2

1 Bevezetés 6

1.1 Komplex rendszer 6

1.2 Ágens-alapú modellek 7

1.2.1 Alkalmazási területek 13

1.2.2 Kapcsolat a sejtautomatával 14

1.2.3 Térinformatikai vonatkozás 16

1.2.4 Szoftverkörnyezetek 18

1.2.5 Vektor-raszter 19

2 Tájdiverzitás 21

2.1 Véletlen bolyongó ágensmodell 23

2.2 Felderítő ágensmodell 27

2.2.1 A módszer bemutatása 29

2.2.2 A módszer alkalmazása 32

2.2.3 Paraméterek vizsgálata 34

2.2.4 Egy konkrét mintaterület kiértékelése 36

3 Evakuáció szimuláció 42

3.1 Sejtautomata modellek 46

3.2 Közösségi erőmodell 47

3.3 Ágens-alapú modellek 48

3.4 Navigáció 49

3.5 Potenciálfelület ... 51

3.6 Implementáció ... 55

3.6.1 Az evakuáló individuum térbeli leírása ... 55

3.6.2 Az evakuációs tér reprezentációja ... 55

3.6.3 Navigáció megoldása ... 57

4 Térbeli lépésmodell ... 59

4.1 A mozgás matematikai leírása ... 61

4.2 Az SSM modell jellemzői ... 65

4.3 A módszer alkalmazása ... 66

4.3.1 Pánik mérése ... 73

4.3.2 Térszervezési alternatívák ... 74

4.3.3 Keveredés vizsgálata ... 76

4.4 Valós idejű verzió ... 82

4.4.1 Paraméterek vizsgálata ... 88

5 Összefoglaló ... 91

6 Irodalomjegyzék ... 94

7 Függelék ... 105

7.1 Ágens-alapú modell definiálása ... 105

1 Bevezetés

Ebben a fejezetben bemutatom a komplex rendszerek leírására alkalmas ágens-alapú modellezést. Írok a módszertan tulajdonságairól, előnyeiről, a használható szoftverekről, alkalmazási területekről, a térinformatikai kiterjesztéséről valamint a sejtautomaták és ágens-alapú modellek kapcsolatáról.

1.1 Komplex rendszer

A „komplex rendszer” fogalom alatt olyan rendszereket értünk, amelyekben az alkotóelemek nagy száma és a közöttük lévő kölcsönhatások révén a rendszer viselkedése az egyes egységekétől lényegesen eltérő sajátosságokat mutat. A komplex rendszerek esetében a kölcsönhatások részleteiről gyakran beható ismeretekkel rendelkezünk, de ez nem vezet a rendszer holisztikus megértéséhez (Kertész és Vicsek, 2006). A rendszer, modellezés és szimuláció kifejezések gyakran együtt fordulnak elő, abból kifolyólag, hogy szorosan összefűződnek. Neil Johnson szerint nincs egyértelmű definíció a komplexitásra, ő egy új definíciót vezet be 'komplexitás tudomány' néven, amely az objektumok interakciójából kialakuló jelenségeket tanulmányozza (Neil, 2009). Sok szerző úgy véli, hogy komplexitáshoz maguknak a komponenseknek is komplexnek kell lenniük, ami különösen igaz a szociális rendszerek szereplőire (Gilbert és Troitzsch, 1999). Ennek ellenére, a modellezés révén számos rendszert mégis nagyon egyszerű szabályokat követő szereplőkre, ágensekre tudunk lebontani (Macy és Willer, 2002). A komplex rendszerek fő tulajdonsága, hogy nem egyetlen komponens irányítja a rendszert (Siegfried, 2014). Azt, hogy egyszerű komponensekből milyen bonyolult mozgási mintákat tudunk alkotni Craig Reynolds mutatta be a mesterséges madaraival (1. ábra), amelyek három egyszerű szabályt követnek (Reynolds, 1987):

- különválás: távolodjunk el a szomszédoktól, ha túl közel kerülünk hozzájuk;
- kohézió: kerüljünk átlagos távolságra a szomszédainktól;
- irányultság: kerüljünk a szomszédokhoz képest átlagos helyzetbe (Russell és Norvig, 2005).

1. ábra: Madár ágensek (boidok) a háromdimenziós térben (Reynolds, 1987)

1.2 Ágens-alapú modellek

A modell a valóság egy leegyszerűsített reprezentációja. Egy rendszer olyan szubjektív dekompozíciója, amelyben annak részeit valamiféle szempontrendszer alapján összevonjuk, megtartjuk illetve elhagyjuk. A modellt az elemei és az esetlegesen köztük fennálló kapcsolatok alkotják.

Az ágens-alapú modellezés számos tudományterülettel kapcsolatos, pl.: komplexitás tudomány, rendszer tudomány, dinamikus rendszerek, számítástudomány, vezetéstudomány, szociális tudományok. Történelmének gyökerei a komplex adaptív rendszerekhez fűződnek, melynek alapja, hogy "minden rendszer alacsony szinten keletkezik", ellentétben a Rendszerdinamika fentről-lefelé logikájával (Macal és North, 2006).

Különféle kifejezések, rövidítések használatosak az ágens-alapú modellezésre, közülük az interneten a legelterjedtebb az ABM (Agent-Based Modeling) kifejezés (trends.google.com, 2017). Továbbá léteznek még egyéb rövidítések: ABS (Agent-Based System), IBM (Individual-Based Modeling), ABMS (Agent-Based Modeling and Simulation), ABCM (Agent-Based Computational Modelling), ABSS (Agent-Based Social Simulation) elnevezések (Siegfried, 2014; Macal és North, 2006; Castle és Crooks, 2006). Egyéb kapcsolódó rövidítések: MAS (Multi-Agent Simulations/System), CAS (Complex Adaptive System), DES (Discrete Event Simulation).

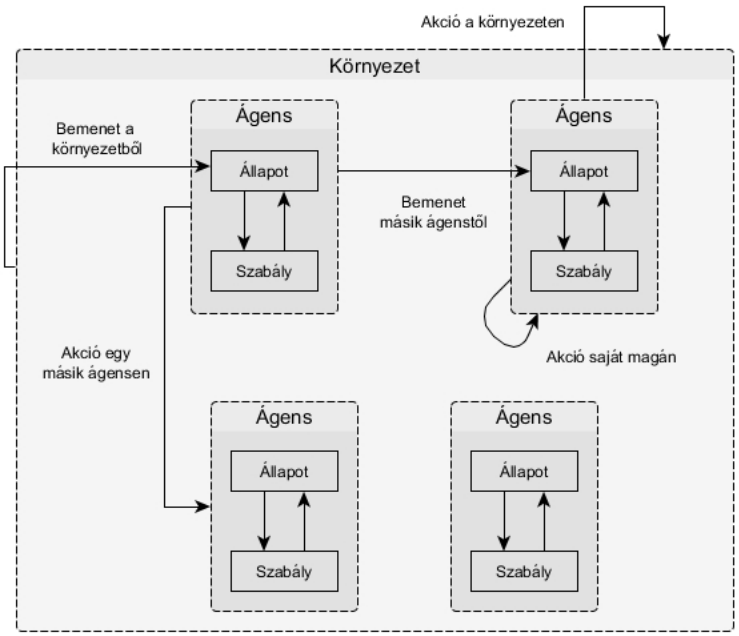
Az ágenseknek különféle elnevezéseik léteznek a szakirodalomban: racionális ágens, intelligens ágens, tanuló ágens, logikai ágens, reflexszerű ágens, célorientált ágens, hasznosságorientált ágens (Russell és Norvig, 2005).

Az ágens-alapú modellezésben a rendszert a modellezés során önálló döntéshozó képességgel rendelkező entitásokra bontjuk szét, ezeket az entitásokat hívjuk ágenseknek (Macal és North, 2006; Bonabeau, 2002). Az önálló döntéshozó képesség azt igényli, hogy az ágenseknek a modellben – a passzivitás helyett – aktív szerepük legyen (Macal és North, 2006). Ezek az önálló entitások lehetnek akár szoftverek, személyek, természeti elemek. Általánosságban a következő jellemzőkkel bírnak (Longley, De Smith és Goodchild, 2015; Siegfried, 2014; Castle és Crooks, 2006; Macal és North, 2006; Russel és Norvig, 2005; Macy és Willer, 2002):

- Az ágens azonosítható, önálló - autonóm egység, tulajdonságokkal rendelkezik.
- Aktív komponens, tulajdonságaihoz kapcsolódó függvényekkel (viselkedéssel, szabályokkal) képes lehet:
    - saját térbeli pozícióját változtatni a modelltérben – mobilitás;
    - a kommunikációra, az adatgyűjtésre, kollektív viselkedésre;

- válaszolni az őt ért ingerekre (környezet, többi ágens) – interaktív, reaktív;
- céljai elérésére, ezek általában valamilyen optimumkeresésben nyilvánulnak meg – interaktív, proaktív;
- a tanulásra, tud alkalmazkodni a környezetéhez. Ehhez szükséges lehet, hogy legyen memóriája, és újabb szabályokkal módosítani tudja régi szabályait – flexibilis, adaptív.

A kapcsolatok különféle formákban definiálhatók, lehet ez egyszerű reflexalapú reakció (külső ingerre, pl. egy másik ágens hatására) vagy cél-orientált (folyamatosan keresnek egy célt).



2. ábra: Az ágens-alapú modellek struktúrája van Dam és munkatársai nyomán (van Dam, Nikolic, és Lukszo, 2013)

Az adaptáció a modell struktúrájában létrejött változásokat jelenti, amik a rendszerből levont tapasztalatokra épülnek (Holland, 1995). Az adaptáció nem szükséges, inkább opcionális része az ágensmodellnek.

1. táblázat: Adaptáció és tanulás (Holland, 1995)

Rendszer	**Változási időszak**
Központi idegrendszer	Másodpercektől órákig
Immunrendszer	Óráktól napokig
Üzleti cég	Hónapoktól évekig
Fajok	Napoktól századokig
Ökoszisztéma	Évektől évezredekig

Az ágensek viselkedése a szimulációban ütemezhető szinkronizáltan (minden ágens végrehajtja akcióit valamilyen diszkrét időintervallummal), vagy aszinkron módon (akciók más ágensek hatására, vagy referencia időhöz képest) (Castle és Crooks, 2006) . Az idő fogalma explicit módon jelentkezik az ágens-alapú modellekben, az ágensek valamennyi döntése bizonyos időpontokhoz köthető. A szimulációs időegység dimenziója teljesen eltérő lehet az ágensmodellek karakterisztikájának függvényében. Pl. egy áruszállító kamionok mozgását figyelő rendszer esetében az időintervallum sokkal kisebb (pl. 1 óra), mint egy földhasználatot modellező közgazdasági modell esetében (pl. 1 év) (Johnston, 2013).

Az ágens-alapú megközelítés legfontosabb előnyei a következők (Crooks és Heppenstall, 2012; Castle és Crooks, 2006; Bonabeau, 2002):

- Jól megragadja a kialakuló jelenséget.
- Természetes környezetet biztosít a rendszerek tanulmányozásához.
- Flexibilis, különösképpen a térmodellek fejlesztésénél.

Az ágens-alapú modellezés a modellt sokkal közelebb helyezi a valósághoz, mint a többi modellezési módszertan. Például sokkal természetesebb leírni a vásárlók mozgását egy bevásárlóközpontban, ahelyett, mint előállni egy egyenlettel, ami a vásárlósűrűségek dinamikáját irányítja. Mivel a sűrűségegyenletek a vásárlási szokásokból adódnak, az ágens-alapú megközelítés lehetőséget ad a modellezőnek, hogy tanulmányozza az aggregált tulajdonságokat, akár egyenleteket vezessen le (Castle és Crooks, 2006; Bonabeau, 2002).

A szimuláció során kialakuló jelenségben a szisztematikus, makroszkopikus minták, alulról-felfelé, a lokális interakciókból épülnek fel (Castle és Crooks, 2006; Epstein és Axtell, 1996). Ezt a jelenséget hívjuk önszerveződésnek (Kaufmann, 1995). Az ágens-alapú modellezés révén lehetőségünk nyílik a jelenségek kauzalitásának meghatározására, a szimulációk során felderíthető, hogy melyik jelenség váltja ki a másikat (Johnston, 2013). A szimulációs modellek paraméterterének kiértékelésével a jelenségek különféle szcenárióit imitálhatjuk.

A szociális tudományok területén gyakori a humán ágensek használata, amelyek természetüknél fogva irracionális viselkedést, szubjektív döntéseket és komplex pszichológiát rejtenek magukban. Más szavakkal 'szoft', puha faktorokat tartalmaznak, amiket nehéz mennyiségileg leírni, kalibrálni, és megerősíteni. Ebből kifolyólag problémák adódhatnak a szimulációs eredmények interpretálásában, de a korlátok ellenére még mindig igaz, hogy az ágens-alapú modellezés az egyetlen, ami képes kezelni az ilyen helyzeteket (Bonabeau, 2002).

2. táblázat: Az ágens-alapú módszertan modellezési robusztussága (Shardlow, 2017)

	Egyszerű	Folytonos idő	Folytonos állapot tér	Lineáris dinamika	Nemlineáris dinamika	Térbeli interakció	Diszkrét idő	Diszkrét állapot tér	Helyi interakciók	Sztochasztikus	Individuális szint	Átlagtér
Lineáris regresszió	✓	✓	✓	✓			✓	✓				✓
Kevert modellek	✓	✓	✓	✓			✓	✓				✓
Közönséges és Partikuláris Differenciálegyenletek		✓	✓	✓	✓	✓						✓
Sztochasztikus Differenciálegyenletek		✓	✓	✓	✓					✓		
Sztochasztikus Differenciaegyenletek			✓	✓	✓		✓	✓		✓	✓	
Kolmogorov egyenletek		✓	✓	✓	✓			✓		✓	✓	
Ágens-alapú modellezés		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Gépi mély tanulás		✓	✓	✓	✓		✓	✓				
Probabilisztikus programozás	✓	✓	✓	✓	✓							

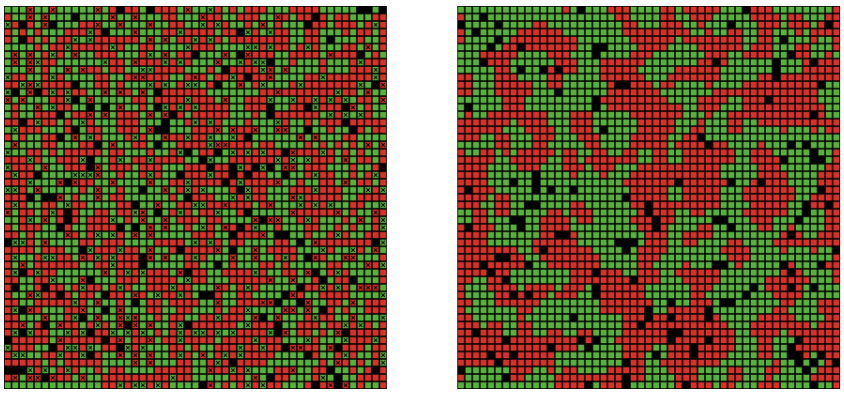
North és Macal szerint az ágens-alapú modellezés és szimuláció (ABMS: Agent-based Modelling and Simulation) paradigma a modellezésben hasonló hatással volt, mint anno a relációs adatbázisok feltalálása (Macal és North, 2006).

Az ágensmodell készítése egy iteratív folyamat (Függelék 8.1: Ágens-alapú modell definiálása). Először meg kell határozni a modell célját, majd el kell készíteni az ágenseket, fel kell őket ruházni tulajdonságokkal és akciókkal. Ha a szimuláció során a virtuális ágensek tevékenysége nem hasonlít a megfigyelt jelenségre, akkor át kell gondolni, hogy korrektül lettek-e definiálva az ágensek – megfelelő attribútumokkal és akciókkal ruháztuk-e fel őket. A megfelelő összkép elérése után át lehet térni a modell verifikálására és validálásra (Johnston, 2013). A modell verifikációjára és validációjára különösképpen akkor van szükség, ha a modelleket el szeretnénk fogadtatni, és döntéstámogatásra szeretnénk használni az üzleti világban. A verifikáció biztosítja a modell használhatóságát, a validáció pedig tanúsítja, hogy a

modell megfelelően ragadta meg a problémát, és pontos eredményeket ad a használata (North és Macal, 2007).

1.2.1 Alkalmazási területek

Az ágens-alapú modellek különösen népszerűek a informatikai közösségekben (O'Sullivan és Mordechai, 2000). Az első ágens-alapú modellt Thomas Schelling amerikai közgazdász 1971-ben alkotta meg, mellyel bebizonyította azt az elméletét, hogy a szegregáció a más etnikumokhoz tartozók iránti viszonylagos tolerancia, alacsony szegregálódási szándék mellett is kialakul (Schelling, 1971, 1978).



3. ábra: Schelling szegregációs modellje:
kezdeti állapotban; egyensúlyi állapotban

A számítástechnikai folyamatos fejlődés lehetővé tette, hogy az ágens-alapú alkalmazások minél több területen elterjedjenek (Macal és North, 2006). Ágens-alapú applikációkkal találkozhatunk a tőzsdén (LeBaron, 2002), járványok terjedésében (Huang, Sun, Hsieh és Lin, 2004), az ökológiában (Grimm és mtsai, 2005), tájdiverzitásban (Wirth, Szabó és Czinkóczky, 2016), ősi civilizációk vizsgálatában (Kohler, Gumerman, és Reynolds, 2005), várostervezésben (Batty, 2007; Bura, Guérin-Pace, Mathian, Pumain, és Sanders, 1996), közgazdaságban (Farmer és Foley, 2009; Tesfatsion, 2002), mezőgazdaságban (Berger, 2001), csoportok mozgásának szimulációjában (Crooks és mtsai, 2015; Bonabeau, 2002), és ezeken kívül még számos területen.

3. táblázat: Ágens-alapú modellezés felhasználási területei (Macal és North, 2006)

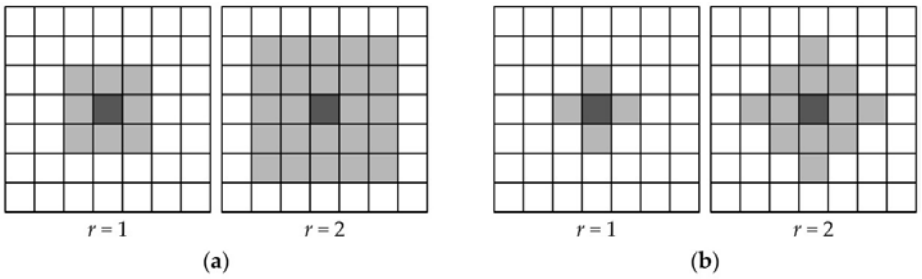
Üzleti és szervezeti • Gyártási műveletek • Ellátási láncok • Fogyasztói piac • Biztosítási ágazat Közgazdaság • Mesterséges pénzügyi piac • Kereskedelmi hálózatok Infrastruktúra • Elektronikus árampiac • Szállítás • Hidrogén-infrastruktúra Sokaságok • Gyalogosok mozgása • Evakuáció modellezés	Társadalom és Kultúra • Ősi civilizációk • Civil elégedetlenség • Terrorizmust befolyásoló társadalmi tényezők • Szervezeti hálózatok Katonai • Parancs és ellenőrzés • Nukleáris erőművek védelme Biológia • Népességdinamika • Ökológiai hálózatok • Állatcsoportok viselkedése • Sejtek viselkedése

1.2.2 Kapcsolat a sejtautomatával

Longley és munkatársai az ágens-alapú modellezést a geoszimuláció témakörbe sorolják, ahová a sejtautomata (CA: Cellular Automata) modellek is tartoznak (Longley, De Smith, és Goodchild, 2015). A geoszimuláció alatt kizárólag a térbeli problémákhoz kapcsolódó mikroszintű szimulációs eszközök alkalmazását értjük (Benenson és Torrens, 2013).

A sejtautomata egy olyan diszkrét, mikroszkopikus modell és egyben dinamikus rendszer, amely egyszerű szabályaival képes a komplex önszerveződő jelenségek megragadására (Anders és Kretz, 2012; Blue és Adler, 1999; Wolfram, 1984).

A sejtautomata alapját egyfajta térkitöltés, tesszeláció adja. A háló elemei a sejtek, amelyeknek különféle diszkrét állapotaik lehetnek. A szimuláció során a sejtek (cellák) változtatják állapotukat, ez a változás a saját és a szomszédos sejtek korábbi állapotának függvénye.



4. ábra: Szimmetrikus szomszédsági viszonyok sejtautomata esetén:
(a) Moore-féle szomszédság (b) Neumann-féle szomszédság
(Evsutin, Shelupanov, Meshcheryakov, Bondarenko és Rashchupkina, 2016)

A tudományos életben 1970 körül jelent meg az első kétdimenziós sejtautomata, az Életjáték (Game of Life). Az Életjátékot John Conway, a Cambridge Egyetem matematikusa találta ki (Gardner, 1970). A modellben a "játékos" szerepe mindössze annyi, hogy megad egy kezdeti alakot, majd nyomon követi annak változásait.

Az ágens-alapú modellezés és a sejtautomaták módszertana kombinálható egymással, pl. egy farmer közösség tevékenységében, ahol a személyek cselekményei hatással vannak a térbeli környezetükre (Mena, Walsh, Frizelle, Xiaozheng és Malanson, 2011).

A sejtautomaták és ágensmodellek lényegi különbsége a modellek korlátosságában jelentkezik. A sejtautomata elemeinek száma véges, a cellák térbeli helye statikus és diszkrét, a dinamizmus az állapotok sejtközi vándorolásában jelentkezik. Ellenben az ágens-alapú modellekben az ágensek diszkrét vagy folytonos helyüket képesek változtatni, nincsenek térbeli és számosságbeli korlátaik (pl. képesek osztódni). Egy sejtautomatát könnyen felfoghatunk egy olyan ágensmodellnek, amelyben az ágenseket a modelltérben valamiféle tesszelációt képezve osztjuk szét, azzal korlátozással, hogy képtelenek a mozgásra.

Például evakuáció szimuláció témakörben vannak olyan ágens-alapú modellek, amelyek nagyon hasonlítanak a sejtautomatákra, de azok mégis ágens-alapú szemléletben születtek, csak nagyon minimális ágens jellegű tulajdonsággal (pl. látás) bírnak. Ilyen pl. Crooks és munkatársainak ágensmodellje (Crooks és mtsai, 2015), amely sejtnyi méretű, mozgásukban sejt-alapú szomszédságot használó ágenseket tartalmaz.

Kirchner és Schadschneider mára nagy idézettséggel rendelkező evakuációs modelljüket, mint sejtautomata modell publikálták (Kirchner és Schadschneider, 2002). Ebben egy részecske – mint evakuáló entitás – mozog egy rácshálón sejtalapú topológiát követve az időben változó potenciál sejtmezőn.

A modell típusának eldöntésében a következő szempontokat vehetjük figyelembe:

- Mi változik a modellben, a sejt állapota vagy az ágens cselekszik? (mozgás, várakozás)
- A vizsgált entitás egy sejtnyi méretű-e?
- A szimuláció során az akciók sejt-alapú topológiával történnek-e? Mik a szomszédsági viszonyok? (Moore, Neumann)
- Használunk-e olyan akciót, ami túlmutat a sejt-alapú topológián? (pl. látás)
- Sejtautomataként vagy ágens-alapú modellként egyszerűbb elkészíteni a modellt?

1.2.3 Térinformatikai vonatkozás

A térbeli szimulációk kihasználják az ágens-alapú modellezés nyújtotta előnyöket. Pontosabban azt, hogy egy ágens-alapú modell bármilyen léptékű rendszerben definiálható (pl.: várostervezésben, úthálózatoknál). A szomszédsági viszonyok kezelése is szerteágazó, az ágensek interakciói könnyen irányíthatók a térben, hálózatokkal, vagy a szerkezeti elemek kombinációival (Castle és Crooks, 2006).

Az ágensek térbeli kapcsolatai a következőképp alakulhatnak:

- **Tér - Ágens**: Az ágensek saját mozgása a környezetükben található térbeli elemek attribútumai alapján – pl.: annak a legelőnek a felkutatása, ahol sok a fű; a domborzat legmeredekebb lejtején lecsorogni.
- **Ágens - Ágens**: Az ágensek térbeli döntései a környezetükben lévő ágensek hatására is bekövetkezhetnek – pl. egy bevásárlóközpontban eldördülő lövés esetén szétszaladnak, és fedezéket, vagy kijáratot keresnek (Johnston, 2013).
- **Ágens - Tér**: Az ágensek átrendezhetik egy terület térbeli szerkezetét – pl.: lelegelhetik a füvet; elfogyaszthatják a vizet; bozonokat hagyhatnak hátra mozgásuk során.

Az ágensek viselkedése sokszor komplex térbeli elemzésekből levezetett információ hatására változik meg. Például az áradások időbeli lefolyása egy térbeli modellező környezetben kivitelezhető, amihez hozzá kapcsolható az ágensek jelenségre történő reaktív, vagy proaktív viselkedése. Ekkor a térinformatika és az ágens-alapú modellezés eszköztárai összegződnek, előnyeik jól ötvözhetők.

A térinformatikai eszközök integrálásával az ágens-alapú modellek gyakorlati alkalmazhatósága jelentősen növelhető (Johnston, 2013), mivel:

- számos téradat áll rendelkezésre;
- a térinformatika hatékony eszközöket biztosít a téradatok kezelésére, megjelenítésére;
- komplex térbeli elemzések, térbeli modellek használhatók.

Az ágens-alapú modellezés felhasználásával felfedezhetjük a kapcsolatot a megfigyelt térbeli minták és az őket kiváltó folyamatok között (Parker, Manson, Janssen, Hoffmann és Deadman, 2003).

Az ágens-alapú modellezés dinamikus természete megnehezíti a térinformatikai rendszerekkel történő integrációt, ugyanis ott a térbeli reprezentációra való fókuszálás az időbeli reprezentáció rovására megy (Peuquet, 2002).

A különböző felhasználói körökben még mindig megvan a statikus igény a térkép-alapú szemléletre. Az ágens-alapú modellezés és a térinformatika integrációja fokozni fogja az igényt a térinformatikai rendszerek időkezelésére.

1.2.4 Szoftverkörnyezetek

Az ágens-alapú modellező környezet és a térinformatikai rendszerek integrációja történhet GIS-centrikusan és ABM-centrikusan, vagy létrehozható egy köztes szoftver (middleware), amelyik kapcsolatot teremt egy ágens modellező környezet és egy térinformatikai szoftver között (Brown, Riolo, Robinson, North és Rand, 2005). Ilyen megoldás például az AgentAnalyst, amelyik a Repast (ABM) és az ArcGIS (GIS) kereskedelmi szoftverek között teremt kapcsolatot (Johnston, 2013). A Repast egy térinformatikai szabadszoftverrel az OpenMap-pel is összeköthető.

Ettől függetlenül az ABM-centrikusság a jellemző. Az ágens-alapú modellező környezeteknél figyelhető meg, hogy különféle csomagokkal alkalmassá teszik őket a téradatok importálására, térinformatikai függvények futtatására. Ilyen például a NetLogo vagy a Swarm (Minar, Burkhart, Langton és Askenazi, 1996).

A népszerűbb térinformatikai szoftverek oldaláról például a GRASS csupán egy egyelőre üres r.agent funkcióval rendelkezik, a QGIS nem rendelkezik ágens-alapú kiegészítővel, viszont az ArcGIS igen.

A Swarm volt az első ágens-alapú modellező környezet, 1994-ben a Santa Fe Institute-ban kezdték fejleszteni objektív-C nyelven. A Swarmhoz nem definiáltak explicit kapcsolatot a térinformatikai szoftverekkel, hanem képessé tették a téradatok különféle módon történő beolvasására.

4. táblázat: Ágens-alapú modellező környezetek térinformatikai támogatása (Longley és mtsai, 2015; Castle és Crooks, 2006)

Szoftver neve	**Készítés éve**	**Utolsó stabil kiadás**	**Publikációk száma (2016/17)**	**Licensz**	**GIS kapcsolat**
Swarm	1997	Swarm 2.2 (2005)	n.a.	Szabad	Kenge GIS raszter könyvtár (nem elérhető)
Repast	2000	Repast Simphony 2.4.0 (2016)	2/0	Szabad	AgentAnalyst middlewaren keresztül
MASON	2003	MASON 19 (2015)	n.a.	Szabad	GeoMason (Java Topology Suite)
NetLogo	1999	NetLogo 6.0.1 (2017)	73/51	Szabad	GIS kiegészítő csomag
JADE	2000	JADE 4.4 (2015)	0/0	Szabad	Nincs
GAMA	2007	GAMA 1.6.1 (2014)	n.a.	Szabad	GIS plugin
Ascape	1998	Ascape 5.6.0 (2010)	0/0	Szabad	Nincs
AnyLogic	2000	AnyLogic 8.1 Professional (2017)	6/2[1]	Kereskedelmi	Shapefile támogatás, Csempe térképek (OSM)

1.2.5 Vektor-raszter

Az ágens-alapú modellező környezetek a tér leírására általában diszkrét tesszelációs modellt használnak, az ágensek viszont a térben lehetnek folytonosak. Az ágens-alapú modellezés térbeli interakcióinak dinamikus természete elméletileg jobban kapcsolódna a térinformatikai vektormodellekhez, illetve Hagerstrand és Miller idő-térinformatikájához, azonban a gyakorlat mégsem ebbe az irányba fejlődik (Miller, 2005). Az ágensek térbeli környezeteként (továbbiakban ágensek világa) továbbra is a diszkrét tesszelációs modellek használatosak, ugyanis teljes térbeli lefedettséget biztosítanak, valamint diszkrét felbontásukból adódóan kezelhetőbbek.

[1] Becslés az AnyLogic hivatalos oldalára felvitt, publikációs dátum szerint nem rendezett publikációk alapján

A vektoros modelleket (felületek, vonalak, pontok) alkalmazó ágens világ csak akkor lehet működőképes, ha az ágensek úgymond csak olvasó kölcsönhatásban vannak a világgal, nem tudják annak térbeli struktúráját megváltoztatni. Ellenkező esetben a vektoros felületeket folyamatosan kisebb poligondarabokra kellene metszeni, ahol az ágens módosította a tér szövetét. Ez a folyamat egy komplex és kezelhetetlen forgácspoligon-halmazhoz vezetne.

A vektor modell világok alkalmazására akkor kerülhet sor, amikor kizárólag azok attribútumait változtatjuk. Például egy területi egységeket (megyéket) tartalmazó modellben a fertőzöttség függvényében színezzük ki a vektor poligonokat, esetleg szabályaik alapján azokban változást idézünk elő, amire az ágensek szintén reagálhatnak.

2 Tájdiverzitás

Ebben a fejezetben a tájdiverzitás – mint komplex jelenség – mérésével foglalkozom. A hagyományos statisztikai módszerek mellett alternatív, ágens-alapú modelleket mutatok be. A *véletlen bolyongó ágensmodellel* az osztályozott térmodellek objektumainak kerületét, határvonalainak hosszát; a *felderítő ágensmodellel* a térmodellek – világok – diverzitását becsülöm meg.

Egy táj térbeli struktúrája annak kompozíciójából és konfigurációjából ered. A kompozíció a tájegységen előforduló különféle tájelemekre, felszínborításokra vonatkozik, míg a konfiguráció azok egymásra gyakorolt hatásával kapcsolatos (McGarigal és Marks, 1995). A táj mérésére számos olyan kvantitatív módszer létezik, amely a tájegység (terület) dekompozíciójára épül. Ilyen mérőszám például a felszínborítási osztályok területe, a felszínborítási osztályok és az összterület hányadosa, a tájfoltok száma, foltsűrűség, legnagyobb folt területéknek aránya az osztályterülethez viszonyítva, felszínborítási osztály összkerülete, élsűrűség, alaki index, kerület és terület aránya, a tájfoltokat befoglaló legkisebb körök sugarának átlaga, magterület, effektív hálóméret és a felosztottsági index (Szabó, 2010). Ezeknek a tájmetriai-tájanalitikai mutatóknak a kidolgozása a raszteres téradatmodellhez illeszkedik, az indexek értékei könnyen kiszámolhatók pl. a FRAGSTATS szoftverrel, vagy a QGIS térinformatikai szabadszoftver LeCoS kiegészítőjével (Jung, 2016).

Továbbá egyéb mutatók is léteznek a celluláris modelltér – melynek szakirodalmi elnevezése világ – diverzitásának mérésére, ilyen például a Simpson index vagy a Moran index.

A Simpson index az egyedek (fajok, felszínborítások) koncentrációjának fokát méri, ha az egyedek eltérő osztályokba tartoznak (Simpson, 1949). Az index nem foglalkozik a cellák és foltok térbeli eloszlásával, csupán a felszínborítás osztályok, illetve a hozzájuk tartozó elemek számosságával:

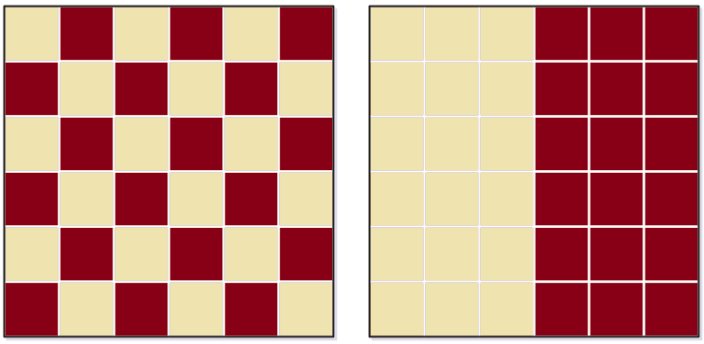
$$\lambda = \sum_{i=1}^{R} p_i^2, \tag{1}$$

ahol R az osztályok száma, p_i pedig az egyes osztályok gyakorisága az adathalmazban.

A Moran index a területi autokorrelációt, az elemek térbeli inhomogenitását, szétszórtságát méri (Moran, 1950):

$$I = \frac{N}{W} \frac{\sum_i \sum_j w_{ij}(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}, \tag{2}$$

ahol N az i és j indexekkel rendelkező térbeli egységek száma, x a vizsgált objektum osztály (pl. felszínborítás), és a w_{ij} súlyok összege adja a W értéket. Az indikátor szintén nem foglalkozik a foltok méretével, jellegével, eloszlásával, csupán a felszínborítás egységek szétszórtságával.



5. ábra: A Moran index minimuma és maximuma.
A bal képen $I = -1$, a jobb képen $I = 1$

Az 5. ábrán látható, hogy a Moran – diverzitást mérő – index egy olyan sakktábla 'tájon' ad optimumot, ahol két osztály szabályosan váltakozik. Összességében ez a 'táj' akár monotonnak is mondható, mivel valamennyi tájelem mérete, kerülete, alakja azonos.

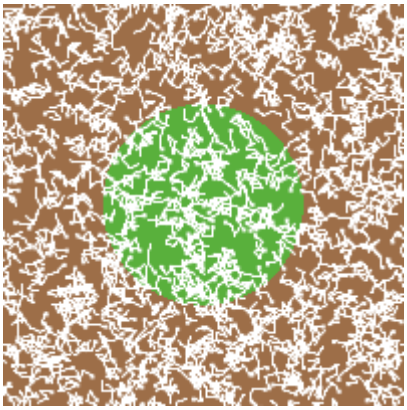
Ezeket az indexeket csoportosan érdemes vizsgálni, hogy átfogó képet kapjunk a tájról. Célunk egy olyan modell felállítása volt, ami igyekszik a jelenséget és a vizsgált világot, tájrészletet összetettségében minősíteni.

2.1 Véletlen bolyongó ágensmodell

Az ágenseket először a felszínborítás foltok kerületének illetve határvonalaik hosszának számításához alkalmaztuk, ami jó kiinduló alap volt a későbbi *felderítő ágensmodell* kifejlesztéséhez. A kifejlesztett modellben az ágensek véletlenszerűen vándorolnak és egy közös gyűjtőbe regisztrálják, mérik a felszínborítás változásokat a talpuk alatt (Wirth, 2015; Wirth, Czinkóczky és Szabó, 2015; Wirth, Szabó és Czinkóczky, 2016b). A modell implementációját egy bemutató példán is illusztráltam, ahol a felszínborítás áthatolások alapján a pi (3.14) értékét becsültem (Wirth, 2015).

6. ábra: A bal képen a kör alakú ($\theta = 1$), a jobb képen a négyzetes ($\theta = 2$) erdő látható, körülöttük szántóföldde (Wirth, 2015)

A bolyongó ágenseket véletlenszerűen elosztva helyezzük le a két tájra, és egy adott szimulációs ideig futtatjuk vándorlásukat.



7. ábra: Ezer véletlenszerűen bolyongó ágens 3 lépése

Az ágensek (i) modelltérbeli pozícióját t időpontban a p függvény adja meg:

$$\begin{aligned} p(i,t) &= \{x,y\} \\ p\colon \mathbb{Z}^2 &\to \mathbb{R}^2. \end{aligned} \tag{3}$$

Az ágensek minden szimulációs időegység alatt lépnek egyet. A mozgás során véletlenszerűen forgolódnak, forgásaikhoz egyenletes eloszlást használtam a 0-360 fokos intervallumon:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= x(t) + q\ cos\alpha \\ y(t+1) &= y(t) + q\ sin\alpha \\ \alpha(t+1) &= \alpha(t) + unif(0{,}360), \end{aligned} \tag{4}$$

ahol a q az ágensek konstans lépésméretére vonatkozik. A véletlenszerű mintavételezés egyenletességét úgy biztosítottam, hogy a vizsgált világot az élei mentén toroid topológiájú periodikus határfeltételekkel összefűztem. Így a világ északi szélén kilépő ágens a déli-, a keleti szélen kilépő pedig a nyugati szélen tér vissza.

A világokat alkotó felszínborítás cellák két különböző osztályba tartoznak:

$$\begin{aligned} L &= \{szántó, erdő\} \\ l &\in L. \end{aligned} \tag{5}$$

Minden egyes világhoz tartozik egy raszterfüggvény, ami felszínborítás osztályokat rendel a koordinátákhoz:

$$c(\theta, \{x, y\}) = l$$
$$c\colon \mathbb{R}^3 \to L. \tag{6}$$

Az ágensek mozgásuk során határátlépéskor hozzáadnak egy értéket a közös gyűjtőhöz:

$$s(\theta, i, t) = \begin{cases} 1, & \textit{ha } c\big(\theta, p(i, t+1)\big) \neq c\big(\theta, p(i, t)\big) \\ 0, & \textit{ha } c\big(\theta, p(i, t+1)\big) = c\big(\theta, p(i, t)\big) \end{cases}$$
$$s\colon \mathbb{Z}^3 \to \{0, 1\}, \tag{7}$$

A szimuláció ideje alatt egy közös Monte Carlo integrálba (Metropolis, 1987) gyűjtjük a határátlépések számát:

$$P(\theta, a, d, q) = \sum_{i=1}^{a} \sum_{t=0}^{d} s(\theta, i, t)$$
$$P\colon \mathbb{R}^4 \to \mathbb{Z}. \tag{8}$$

A P függvény eredménye végül egy potenciál érték, ami az elemzett világ határvonalainak változatosságát írja le. A függvény a változója a vándorló ágensek számára, a d pedig a szimuláció hosszára vonatkozik.

A vándorló ágensek lépésmérete konstans nagyságú, változtatható a szimulációk során. Az ágensek a következő tulajdonságokkal bírnak:

- azonosító;
- irány;
- pozíció (x, y);
- rövid távú memória.

A szimulációk során a négyzetes illetve kör alakú erdőt tartalmazó világokra kiszámítottam a potenciál értékeket a (8) egyenlet alapján:

$$P(1{,}1000{,}100) = \sum_{i=1}^{1000} \sum_{t=0}^{100} s(1, i, t). \tag{9}$$

A szimulációkat az egyes világokon 50-szer hajtottam végre, majd az átlagot képeztem:

$$\frac{\sum_{n=1}^{50} P(1{,}1000{,}100{,}10)}{50} = 2491.74, \tag{10}$$

$$\frac{\sum_{n=1}^{50} P(2{,}1000{,}100{,}10)}{50} = 3166.18. \tag{11}$$

A két eltérő világra kapott értékek hányadosának képzésével megbecsülhető a pi értéke:

$$\frac{2r\pi}{8r} = \frac{\overline{P(1{,}1000{,}100{,}10)}}{\overline{\overline{P(2{,}1000{,}100{,}10)}}} \tag{12}$$

$$\pi \approx 3.14794.$$

1. Tézis

A kifejlesztett *véletlen bolyongó ágensek* rövid távú memóriájuk révén kizárólagosan csak az utoljára észlelt objektumosztályra emlékeznek. Emlékezetük új objektumosztállyal történő frissítéseit Monte-Carlo integrálba gyűjtve, egy referenciaelemmel végzett összehasonlítás segítségével megbecsülhetjük a vizsgált terület objektumainak kerületét, vagy határvonalainak hosszát.

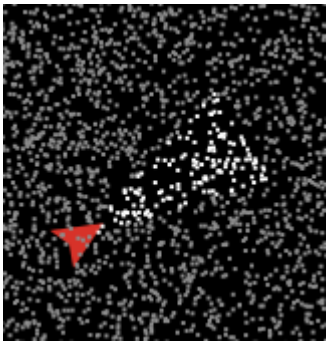
Tézispontot alátámasztó publikációk:

Wirth, E., Czinkóczky, A., és Szabó, Gy. (2015). Biodiversity estimation by agent logic. Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában: Térinfomatikai Konferencia és Szakkiállítás VI. Debrecen: Debreceni Egyetem.

Wirth, E., Szabó, Gy., és Czinkóczky, A. (2016b). Measure landscape diversity with logical scout agents. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences .

2.2 Felderítő ágensmodell

A *véletlen bolyongó ágensmodell* továbbfejlesztéséből készült el a *felderítő ágensmodell*, amely egy komplexebb mérőszámmal jellemzi a vizsgált tájegységeket. Az ágenseket egy plusz tulajdonsággal, a memóriával illetve egy új tevékenységgel, a látással ruháztuk fel (Wirth, Szabó és Czinkóczky, 2016a).



8. ábra: Egy ágens a kúp egy adott nyílásszögével, és sugarával lát (Wirth, Szabó és Czinkóczky, 2016a)

Így képesek csak azoknak a területeknek a begyűjtésére, amiket korábban még nem láttak. E tulajdonságuk által a táj felderíthető, a különféle felszínborítások számossága és eloszlása leképződik az eredményben. Az ágensek a következő tulajdonságokkal bírnak:

- azonosító;
- irány;
- pozíció (x, y);
- hosszú távú memória.

Az ágensek értelemszerűen a memóriájukba azokat a felszínborítás osztályokat regisztrálják, amiket már láttak. Céljuk, hogy olyan objektumok felé haladjanak, amelyek osztálya még nem szerepel a memóriájukban (Wirth, Szabó és Czinkóczky, 2016a). A memória feltöltéséhez korábban felvázolt matematikai rész néhány további egyenlettel egészül ki.

A szimulációs felderítés során az ágens regisztrálja a bejárt pályát, és egy sorozatba tárolja a megfigyelt felszínborítás osztályokat:

$$(l_t^{\theta,i})_{t=0}^{d}\ , \qquad l_t^{\theta,i} = c\big(\theta, p(i,t)\big), \tag{13}$$

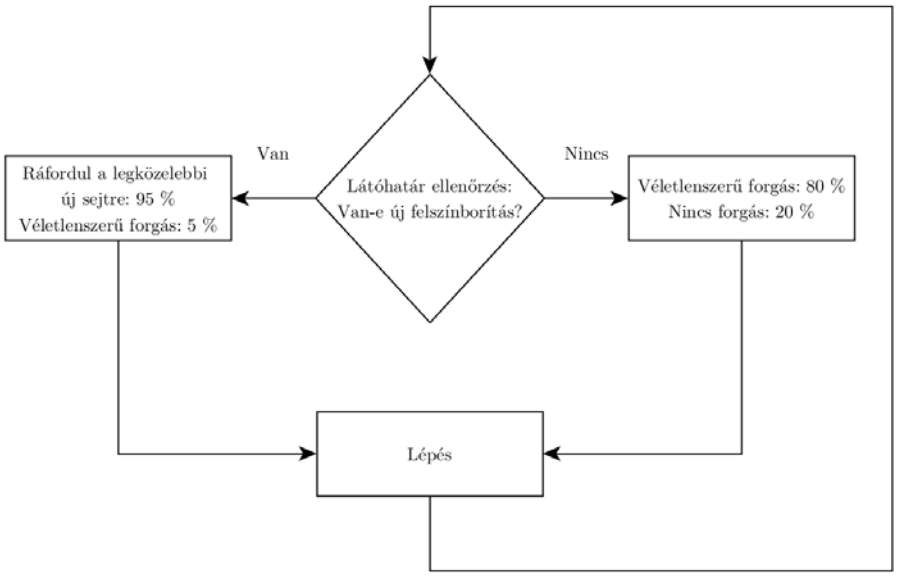
ahol d a szimuláció hosszát jelenti. Továbbá az ágens rendelkezik egy pályafüggő memória halmazzal:

$$M(\theta, i, d) = \ \big\{\ l \in L \ \big|\ (l_t^{\theta,i})_{t=0}^{d}\big\}. \tag{14}$$

Az ágens haladása során lehetőségünk van egy sztochasztikus zaj ráültetésére az ágens mozgására. A felderítő alapértelmezésben 95 %-os valószínűséggel fordul a legközelebbi új felszínborítás cella felé, ami általában egy fixált irányban nyilvánul meg. A maradék 5 %-os valószínűséggel véletlenszerű fordulatokat tesz. A sztochasztikus rész beépítésének az volt az oka, hogy az esetleges perifériкus új felszínborításokat is észrevegye az ágens; legyen egyfajta billegés a mozgásában.

Amennyiben az ágens nem lát újabb felszínborításokat, a forgás lesz a domináns tevékenység, ekkor alapértelmezetten 80 %-os valószínűséggel forog; és 20 %-ban nem forog, hanem tartja a korábbi irányt.

Az előbbi (95-5 %) tevékenység az ágens felderítésérére vonatkozik. Az utóbbi (80 - 20 %) értékekkel a keresési tevékenységet tudjuk testreszabni.



9. ábra: A mozgást vezérlő logika modellje

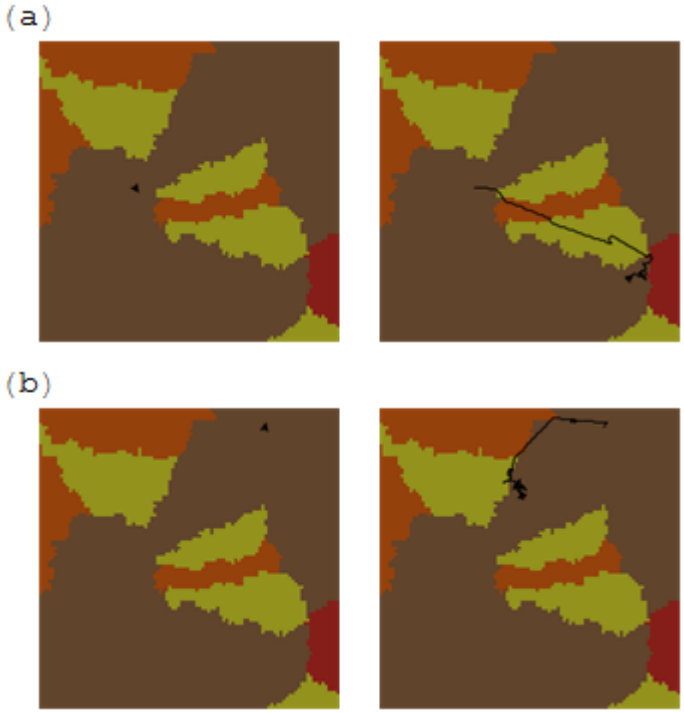
A *felderítő ágensmodellben* a *véletlen bolyongó ágensmodell* s függvénye a következőképp módosul:

$$s(\theta, i, t) = \begin{cases} 1, & ha\ c\big(\theta, p(i, t+1)\big) \notin M(\theta, i, t) \\ 0, & ha\ c\big(\theta, p(i, t+1)\big) \in M(\theta, i, t) \end{cases} \qquad (15)$$
$$s\colon \mathbb{Z}^3 \to \{0, 1\}.$$

Az összegző függvények ebben az esetben is megegyeznek a korábbi (8) képlettel. Végeredményben a kapott potenciálérték függ a lépésmérettől, a szimuláció időtartamától, az ágensek számától, és a világ összetettségétől.

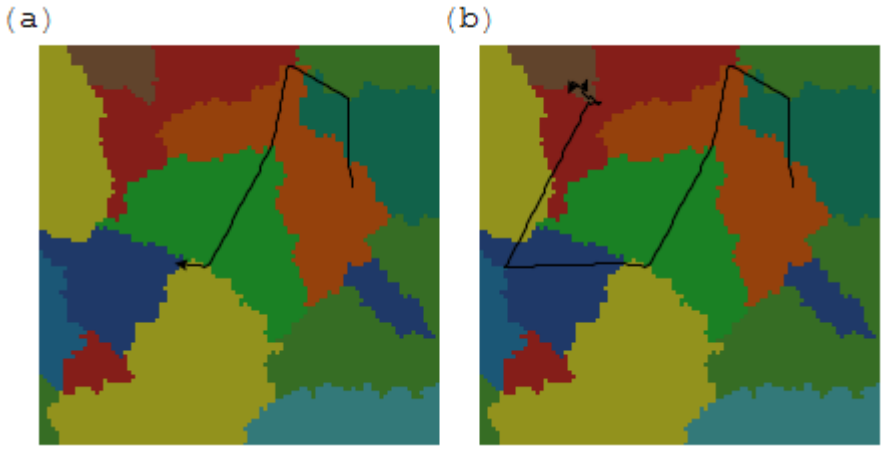
2.2.1 A módszer bemutatása

A bemutatás során véletlenszerűen generált világokat használok. A véletlen világ elkészítéséhez bizonyos számú, különféle osztályú magokat szórok el, amiket utána elterjesztek a világ lefedésére.



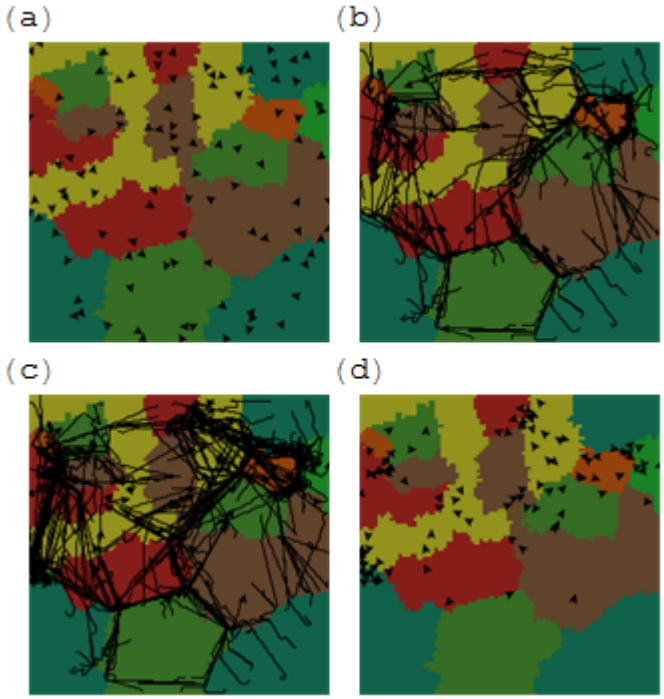
10. ábra: Két bemutató példa 5 %-os haladási zajjal, és 20 %-os keresési zajjal. Látás 50 cella, 120 fokos nyílásszög. A világokban 4-féle felszínborítás található

A 10. ábra első sorában (a) az ágens három potenciálértéket gyűjtött, azaz valamennyi felszínborítás osztályt elérte (a kezdeti felszínborítás nem számít bele a potenciálgyűjtésbe). A második esetben (b) csak két új felszínborítást tudott begyűjteni. A haladási zaj látható az első sor jobb oldali ábráján, ahol az ágens mozgása egy kisebb – majdnem – hurkot rajzolt a sárga legelőn. A keresési zaj mindkét ábrán (a, b) gubancolódás képében látható. Bár a példa második sorában még volt fel nem fedezett felszínborítás, de az ágens azt nem látta, mivel túl messze volt. A forgolódás megszüntethető lett volna a látóhatár növelésével (az ábrán 50 cella távolság), vagy kisebb keresési zajjal. Kisebb keresési zaj választása esetén a gubancolódás nagyobb területen történik, a forgások nem olyan gyakoriak.



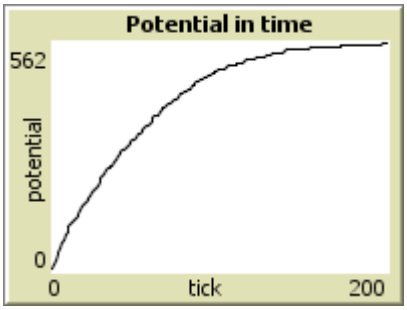
11. ábra: Felderítő ágens sztochasztikus haladási zaj nélkül (0 %)
10 felszínborításos világ esetén. Száz (a), illetve kétszáz (b) lépés után

A 11. ábrán jól látható, hogy az ágens haladásában nincsenek hurkok, nincs bizonytalanság az ágens mozgásában, egészen addig, amíg van új felszínborítás osztály.



12. ábra: Egy bemutató példa 100 felderítő ágenssel:
kezdeti állapot (a), 50 szimulációs időegység után (b),
100 lépés után (c), desztinációk a pályák eltávolítását követően (d)

Száz ágens esetén jobban feltérképezhető a terület karakterisztikája. A mintákban jól látható, hogy az ágensek milyen pályán haladtak keresztül. Jellemzően a felszínborítások határain vándoroltak, illetve bizonyos helyeken átgázoltak azokon. Jól látható, hogy a legnagyobb csomósodások a jobb felső sarokhoz közel (narancssárga terület), illetve a bal oldali felső területeken alakultak ki. Az ágensek felfedezés utáni eloszlása (d) a felszínborítások eloszlásából következik. A felfedezők inkább arrafelé orientálódnak, amerre többféle felszínborítás található.



13. ábra: A szimuláció során látható, hogy 100 szimulációs egységet követően – ami a világ egy oldalhosszának bejárásához elegendő – csillapodott az ágensek potenciálgyűjtése

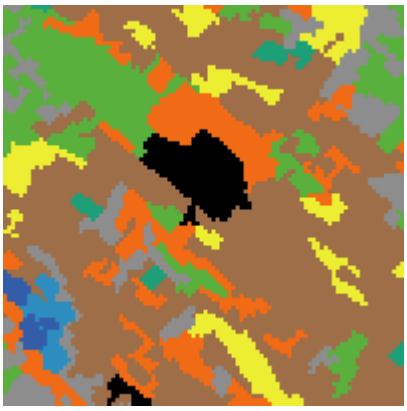
2.2.2 A módszer alkalmazása

A *felderítő ágensmodellt* a CORINE Land Cover (továbbiakban CLC) felszínborítottsági téradatbázison (Bossard, Feranec és Otahel, 2000) teszteltük (Wirth, Szabó és Czinkóczky, 2016a).

A módszer kidolgozásának és alkalmazásának partikuláris célja az volt, hogy kimutassuk az Alföld azon területeit, ahol szükséges lehet a heterogenitás megőrzése érdekében teendő beavatkozás, az intervenció. A módszer alkalmazásával, egyben el is végeztük a módszer tesztelését és validálását.

Az alkalmazás során a CLC 2012-ben kiadott 100 méteres térbeli felbontású raszter téradatbázist használtuk. A tematikus tartalmat a nomenklatúra 2. szintjén használtuk (szántó, legelő, erdő, lakott övezet, stb.). Az egész Magyarországot lefedő rétegből 10 x 10 kilométeres világokat mintavételeztünk (100 x 100 cella).

A kivágott raszterrészletek az ágens modellező környezetben 100 x 100 cellás világokként reprezentálódtak, ahol 1 cella egy 1 hektáros területnek felel meg.



14. ábra: Az ágens modellező környezetbe betöltött világ.
A középső fekete folt Kerekegyháza település (Kecskemét közelében)

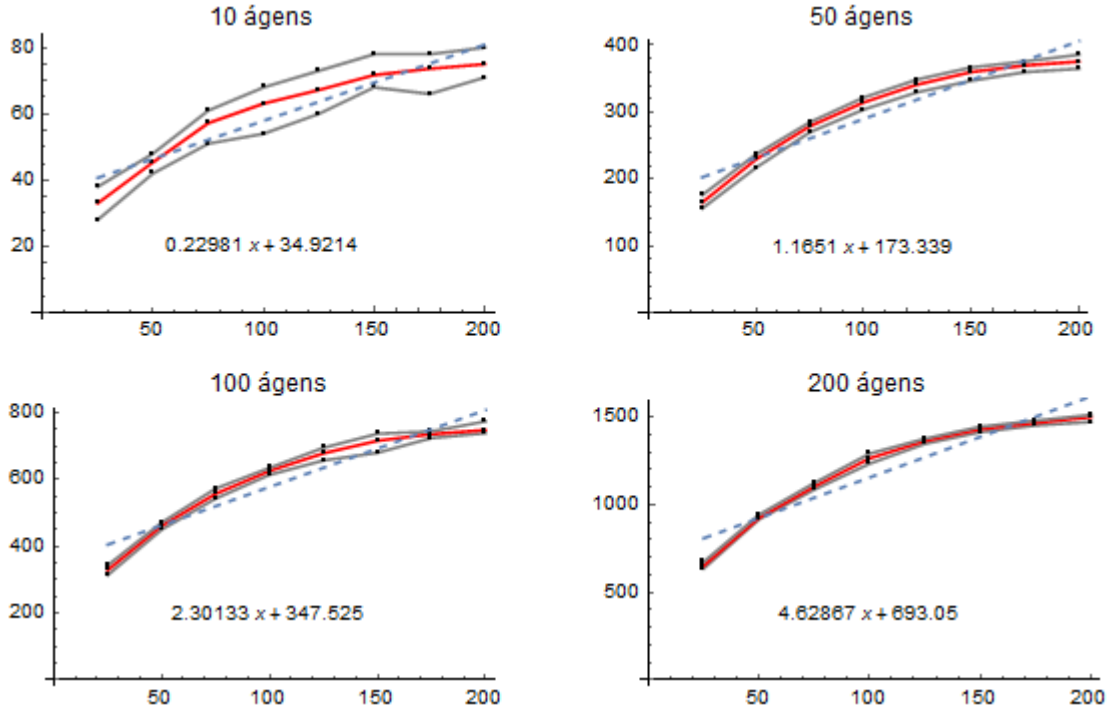
A 100 km^2-es világmérettel a jelenséget mezo-léptéken értelmeztük, ugyanis nagyon kis, illetve nagy területű világok mintavételezésével a jelenség eltűnne.

5. táblázat: A felszínborítások megoszlása a 14. ábrán bemutatott világban

Felszínborítás osztály	**Cellák száma**
Szántóföld	4676
Erdő	1415
Vegyes mezőgazdasági területek	1319
Cserjés és/vagy lágyszárú növényzet	1005
Legelő	786
Lakott terület	419
Szárazföldi vizenyős területek	144
Állandó növényi kultúrák (szőlő, gyümölcsös)	137
Kontinentális vizek	99

2.2.3 Paraméterek vizsgálata

Ebben a fejezetben megvizsgálom, hogy az ágensek száma és a szimuláció hossza milyen hatással vannak a potenciálra. Pontosabban azt, hogy különféle paraméter-beállítások esetén milyen szórások várhatók az eredményben. Ez a vizsgálat is a módszernek egyfajta validációját biztosítja. A vizsgálat nem teljes körű, a látószög nagyságával, a lépés méretével, a zajok hatásával az értekezés nem foglalkozik.

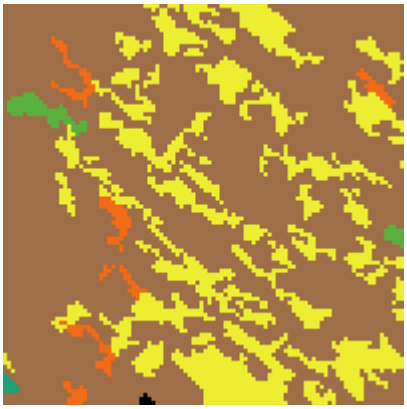


15. ábra: A szimulációt megvizsgáltam a bemutatott világon különböző felderítő ágenslétszámokkal. A függőleges tengely a potenciált, a vízszintes tengely a szimuláció időtartamát mutatja időegység dimenzióban. Mindegyik paraméter-beállítással 10 szimuláció történt, és azok statisztikai bemutatása is megtörtént. A piros vonal a szimulációs eredmények átlagát mutatja, a szürke vonalak a 95 %-os konfidencia intervallum határait mutatják (2.5 % alsó határ, 97,5 % felső határ). A regressziós egyenesek kék szaggatott vonallal lettek megjelenítve

A 15. ábrán látható, hogy a módszer precíz, a szimulációk 10-es mintáját képezve azokban nem jelentkeztek jelentős relatív szórások. Kevesebb ágens létszám mellett jelentősebb a szimulációs eredmények varianciája. 50 ágens esetén már látványosan csökken az eredmények relatív hibája, ami a terület részletesebb átkutatásából

adódhat. 10 ágens esetén jelentősebb eltérések adódhat az ágensek kezdeti pozíciójából és helyzetéből. A regressziós egyenesek meredekség értékei alátámasztják azt a várt alapfeltevést, hogy az ágensek számával lineárisan növekszik a potenciálgyűjtés sebessége (10-50-100-200; 0.23-1.17-2.30-4.63).

A módszer validálásához szükséges azt is bemutatni, hogy egy lényegesen eltérő világban a szimulációs eredmények is eltérnek-e. Ehhez egy kevésbé sokszínű világot használtam.

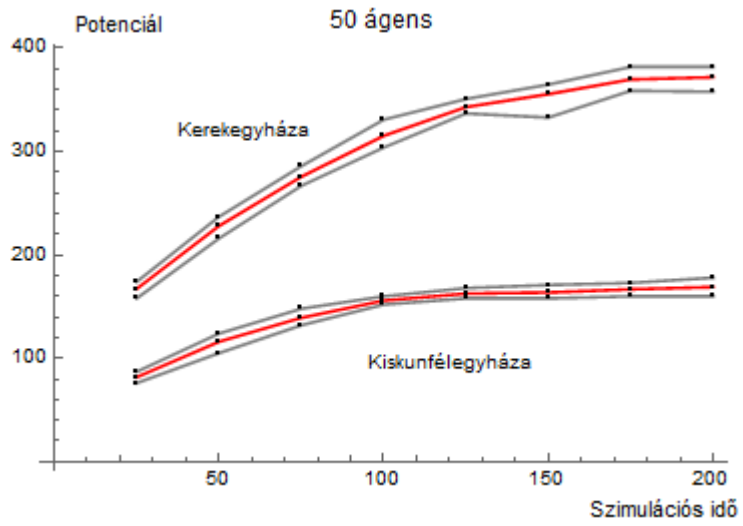


16. ábra: A kevésbé heterogén világ Kiskunfélegyházától északra található, jellemzően legelő és szántóföld borítja

6. táblázat: A felszínborítások eloszlása vizsgált területen

Felszínborítás osztály	**Cellák száma**
Szántóföld	7266
Legelő	2391
Vegyes mezőgazdasági területek	217
Erdő	104
Állandó növényi kultúrák (szőlő, gyümölcsös)	14
Lakott terület	8

Látható, hogy a felszínborítási osztályok eloszlása jelentősen eltér a korábban bemutatott terület eloszlásától. Kevesebb féle felszínborítás, kevesebb cellaszámmal és foltszámmal található.



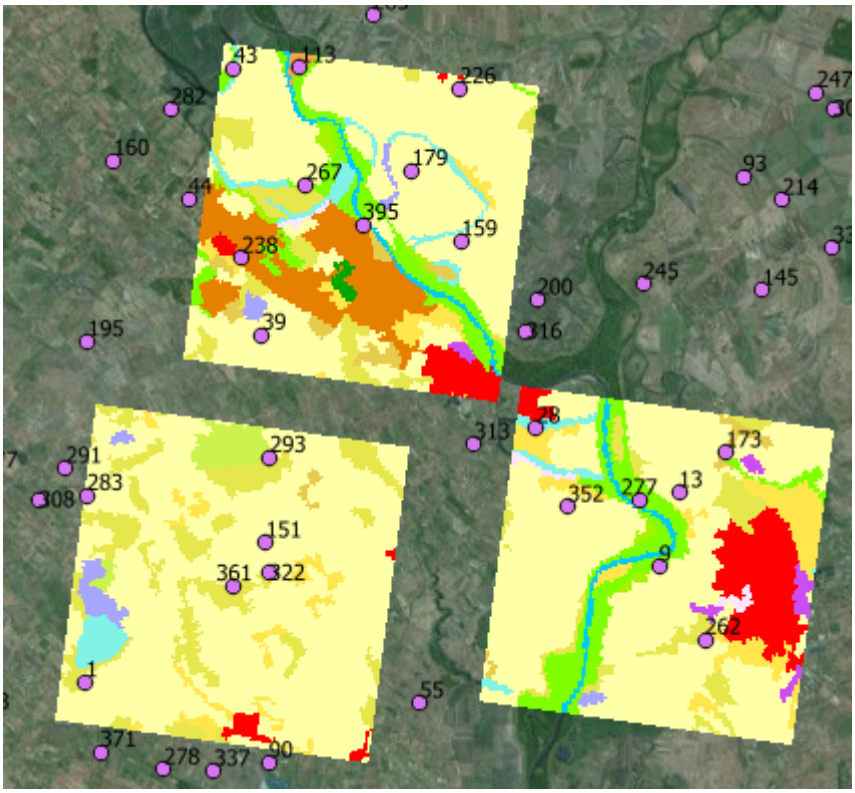
17. ábra: Szimuláció 50 felderítő ágenssel két eltérő világon

A 17. ábrán jól látható, hogy jelentős eltérések keletkeztek a módszerrel meghatározott potenciál értékekben. Megfigyelhető, hogy a kevésbé változatos világ esetén 100 szimulációs lépés után már nem releváns a potenciálgyűjtés. Ennek oka abból adódik, hogy bár még található az ágensek számára új felszínborítás a világban, de azokat nem látják, tehát gyenge a kapcsolat az egyes felszínborítás osztályok között. Megfigyelhető az is, hogy a nagyobb potenciállal rendelkező világ esetén nagyobb szórás keletkezik az eredményekben.

2.2.4 Egy konkrét mintaterület kiértékelése

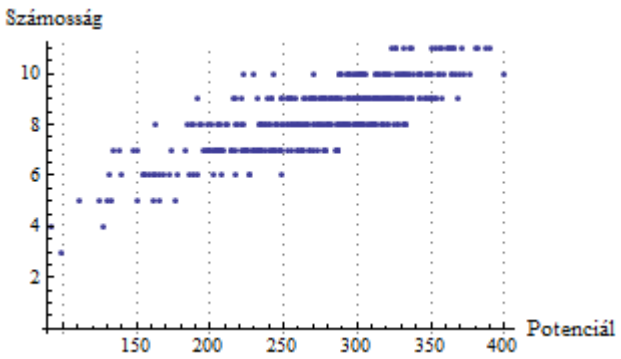
Az alkalmazás során megtörtént egy terület, az Alföld Duna-Tisza közi részére vonatkozó (közel 7000 km^2) tájdiverzitás potenciálok megállapítása (Wirth, Szabó és Czinkóczky, 2016a). A mérésekből egy potenciáltérképet készítettünk, ami alapja lehet számos beavatkozásnak. A teljes vizsgálati terület lefedéséhez 70 db 10 x 10 km-es világ (csempe) lenne szükséges, 50 %-os átfedés esetén ez 280 világot jelent.

A szabályos mintavételezési hibák elkerülése céljából véletlenszerűen vágtunk ki 400 világot a CLC raszterből.



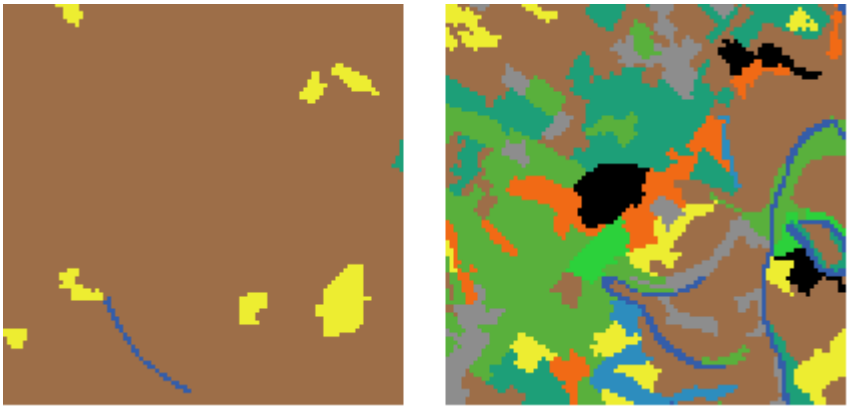
18. ábra: A véletlen mintavételezéssel előállított munkaterület részlete
Megjelenítve a 361, 395 és 9 azonosítóval rendelkező világok

Valamennyi világnak megtörtént a potenciálszámítása. A 19. ábrán a kapott potenciálértékeket szemléltetem a számosság (a világokon előforduló felszínborítás osztályok száma) mellett.



19. ábra: A felszínborítások száma és a kapott potenciálértékek korrelációjának vizsgálata. A feltüntetett pontok a vizsgált területen szimulált 400 világot szimbolizálják

A 19. ábrán jól látható, hogy a potenciál értéke pozitív korrelációban van a világban fellelhető felszínborítások számával. A legkevésbé változatos világ nem a legkevesebb felszínborítás osztállyal rendelkező világ, illetve a legnagyobb potenciállal rendelkező világ nem a legtöbb osztállyal rendelkező világok közül került ki. Megfigyelhető, hogy találunk olyan csupán 6 felszínborítás osztállyal rendelkező világot, aminek potenciálja megelőz bizonyos 10 osztállyal rendelkező világokat.



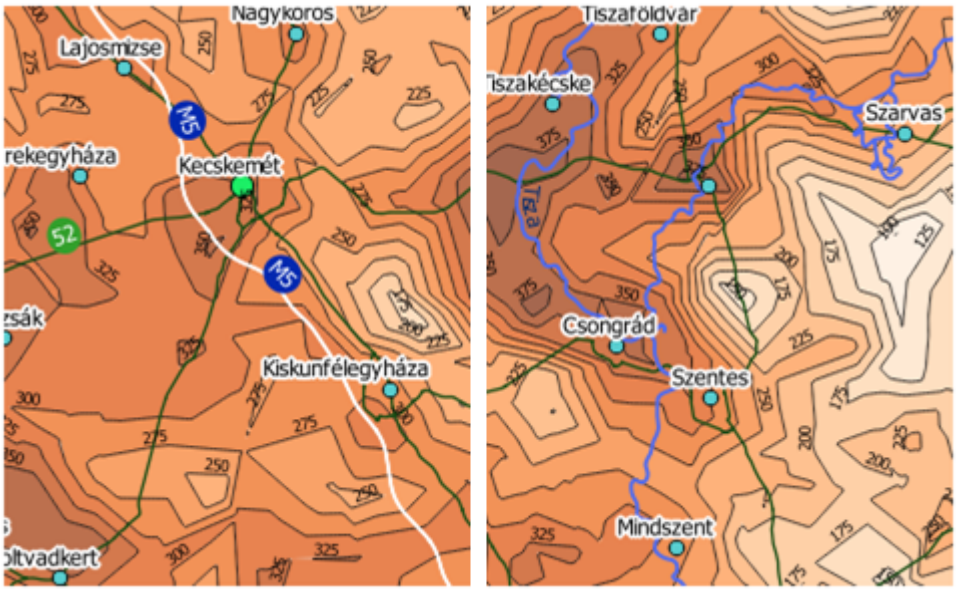
20. ábra: A legkevésbé változatos, és a legváltozatosabb táj

Az eredményeknek az efféle változatossága a foltok alakjából és eloszlásából következik. A korreláció nagyságrendjének megállapításához meghatároztam a Pearson-féle korrelációs együtthatót, amely a változók közötti lineáris kapcsolat szorosságát méri:

$$r = r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} = 0.791. \tag{16}$$

A kapott erős pozitív korreláció ellenére a potenciál nem egyedül a fellelhető felszínborítás osztályok függvénye.

A szimulációk végrehajtása után az eredményeket hozzárendeltem a világok középpontjaihoz. Azokra térinformatikai szoftver segítségével először egy szabálytalan háromszöghálót (TIN: Triangulated irregular network) készítettem, majd izovonalas potenciál térkép réteget készítettem a szimulációs értékék alapján.



21. ábra: Tájdiverzitás izopotenciál térkép 25 potenciál egységes szintvonalközzel. A bal képen a Duna-Tisza köze, a jobb képen a Duna-Tisza köze és a Tiszántúl egy része látható. Tematikus rétegek: folyók - kékkel, autópályák - fehérrel, elsőrendű utak - zölddel, városnevek - fehér árnyékkal (Wirth, Szabó és Czinkóczky, 2016a)

A 21. ábráról leolvashatók azok a területek, ahol a táj túlságosan homogén. Minél sötétebb vörös egy terület, annál összetettebb a táj, annál nagyobb a diverzitás. A világos foltokban szükséges lehet új élővilág populációk és fajok elterjesztése, ami a táj diverzitásának növeléséből következik. A 21. ábra alapján a Tiszántúli régióban alacsonyabb a tájdiverzitás.

2. Tézis

A *véletlen bolyongó ágensek* továbbfejlesztésével létrehozott *felderítő ágensek* céltudatos mozgásuk, látásuk és hosszú távú memóriájuk révén alkalmasak egy vizsgált terület diverzitásának becslésére. Felfedezésük során az új objektumosztályok észleléseit egy Monte-Carlo integrálba gyűjtve a vizsgált terület diverzitási potenciálja becsülhető.

Tézispontot alátámasztó publikációk:

Wirth, E., Czinkóczky, A., és Szabó, Gy. (2015). Biodiversity estimation by agent logic. Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában: Térinfomatikai Konferencia és Szakkiállítás VI. Debrecen: Debreceni Egyetem.

Wirth, E., Szabó, Gy., és Czinkóczky, A. (2016a). Measure of landscape heterogeneity by agent-based methodology. ISPRS Annals of Photogrammetry.

Wirth, E., Szabó, Gy., és Czinkóczky, A. (2016b). Measure landscape diversity with logical scout agents. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences .

3. Tézis

Megmutattam, hogy a tájdiverzitási ágensmodellekkel számított potenciálértékek vizuális reprezentálására alkalmas a tájdiverzitás izopotenciál térkép, amelynek alapját a véletlenszerűen mintavételezett világokon végzett mérésekből interpolált izopotenciál vonalak adják.

Tézispontot alátámasztó publikációk:

Wirth, E., Czinkóczky, A., és Szabó, Gy. (2015). Biodiversity estimation by agent logic. Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában: Térinfomatikai Konferencia és Szakkiállítás VI. Debrecen: Debreceni Egyetem.

Wirth, E., Szabó, Gy., és Czinkóczky, A. (2016a). Measure of landscape heterogeneity by agent-based methodology. ISPRS Annals of Photogrammetry.

Wirth, E., Szabó, Gy., és Czinkóczky, A. (2016b). Measure landscape diversity with logical scout agents. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences .

3 Evakuáció szimuláció

Ebben a fejezetben bemutatom a gyalogosok evakuációjához használt modellezési módszertanokat. Részletesebben kitérek a sejtautomata és ágensmodellekre, illetve a *közösségi erőmodellre*. A modellek ismertetését követően az implementáláskor használható navigációs megoldásokkal, térbeli reprezentációkkal foglalkozom.

Az evakuáció szimuláció mára több mint 30 éves múlttal rendelkezik, az első publikációk közé tartozik Stahl cikke 1982-ből (Stahl, 1982).

Az evakuáció szimuláció egy módszer, amivel evakuációs (kiürítési) faktorokat tudunk meghatározni területekre, épületekre, folyosókra. A módszer a tömegek dinamikáján és a gyalogosok mozgásán alapul.

Az evakuációban részt vevő tömegek szimulációja számításigényes, ezen a területen bekövetkezett fejlődésnek köszönhetően az elmúlt évtizedben népszerű témává vált a gyalogosok, tömegek mozgásának szimulációja.

A tervezők számára meglehetősen bonyolult megérteni a tér és az emberi viselkedés kapcsolatát csupán a tapasztalataik és megérzéseik alapján. A gyalogosok mozgásának számítógépes szimulációja egy hasznos eszköz ennek a problémának a feloldására (Okazaki és Matsushita, 1993).

Az evakuáció szimulációk kiértékeléseinek számos biztonsági vonatkozása van, mint például az építészeti tervezés, evakuációs protokollok definiálása, közösségi terek kialakításának és használatának szabályozása. A gyalogosok evakuálásának modellezése különösen fontos a nagy forgalmú épületek, a kulturális, kormányzati és ipari épületek esetében (Izquierdo, Montalvo, Pérez, és Fuertes, 2009).

A gyalogosok evakuálása egy összetett probléma, aminek kísérletekkel történő mérése szinte lehetetlen (Izquierdo és mtsai, 2009), nagyon költséges (ismétlések, alternatív elrendezések) (Gwynne, Galea, Owen, Lawrence és Filippidis, 1999), és veszélyes is lehet.

Továbbá az evakuáció egyszeri valóságos eljátszása nem biztosít megbízható adatot. Még ha az ismétlésben ugyanazokat a személyeket is használjuk, akkor is lehet teljesen eltérő eredmény (Gwynne és mtsai, 1999).

Összehasonlítva a járművekkel kapcsolatos szimulációkkal, amik általában 1 dimenziósak, a tömegek mozgásának szimulációja általában 2 vagy 3 dimenziós megközelítést igényel. A szabadságfok növekedése szofisztikáltabb modellek kidolgozását igényli, egyre jobb időbeli és térbeli felbontással. Ebből kifolyólag a számítási kapacitás döntő szerepet játszik a gyalogosok szimulációjában (Anders és Kretz, 2012). A gyalogosok mozgásának modellezéséhez szükséges figyelembe venni a választott módszertannal (matematikai egyenlet, sejtautomata, ágens-alapú modell) kapcsolatos számításigényeket, a modell komplexitását, léptékét – mire tervezzük –, és az eredmények pontosságát.

A evakuációs modellek csoportosítása lépték szerint a következőképp lehetséges (Anders és Kretz, 2012):

- Mikroszkopikus:

  Minden egyes gyalogost egy önálló térbeli entitásként írunk le. Ilyenek az ágensmodellek, sejtautomata modellek, a *közösségi erőmodell*, Okazaki mágnesmodellje (Okazaki és Matsushita, 1993).

- Makroszkopikus:

  A gyalogosok térbeli pozíciója nem részletes, nem tartalmaz individuális viselkedést (Gwynne és mtsai, 1999). A gyalogosok átlagos dinamikáját a sűrűségük, áramlásuk és sebességük függvényében írják le (Anders és Kretz, 2012). Ezek nagyon leegyszerűsített modellek, ilyen például Takahashi modellje (Takahashi, Tanaka, és Kose, 1989), ami a termek méretét használja, vagy a sorbanállás modellek (általános áramlás, fix áteresztő kapacitás). A makroszkopikus modellek egyszerűségükből eredően gyorsabb futási eredményeket adnak, mint a mikroszkopikus modellek (Gwynne és mtsai, 1999).

A *kinetikus gázmodell* (általánosabban Brown-mozgás) mindkét léptékben érvényesül, ezért mezoszkopikus modellnek tartják (Anders és Kretz, 2012). A gázrészecskék mozgása mikroszkopikusan megjeleníthető, a termodinamikai tulajdonságok leírhatók makroszkopikus egyenletekkel (Brown, 1828; Einstein, 1905).

A modellek a tér-idő szemléletük alapján lehetnek folytonosak, illetve diszkrétek. A diszkrét modellek az időt mint független változót diszkrét időközökkel kezelik. Míg a folytonos modellek az idő végtelen finom felbontású kezelésére is alkalmasak (Ossimitz és Mrotzek, 2008; Hall, 1986).

Különféle modellezési megközelítések léteznek az evakuáció szimuláció témakörében:

- Sejtautomata modellek
- Közösségi erőmodell (SFM: Social Force Model)
- Ágens-alapú modellek

Egyéb modellezési alternatívák:

- Hidrodinamikai modellek (Fluid-Dynamic Models):

  Nagy tömegsűrűségek esetén a gyalogosok áramlása a víz áramlására hasonlít, ebből kifolyólag lehetséges a makroszkopikus hidrodinamikai egyenletek alkalmazása a tömegek mozgásának szimulációjára (Hughes, 2003). Az egyenletek peremfeltételeinek megváltoztatásával analitikai kiértékeléseket tudunk tenni az infrastrukturális változtatásokra (Anders és Kretz, 2012).
- Sorbanállás modellek (Queuing Models):

  A sorbanállás modellek tovább egyszerűsítik a tömeget és a mozgásukat. A gyalogosok egy olyan hálózaton áramlanak keresztül, aminek csomópontjai ajtók, termek, kapuk, kereszteződések, utak lehetnek. Minden egyes csomópont rendelkezik egyfajta áteresztő aránnyal (service rate), és a gyalogosok a következő csomópontra érnek, ha átjutnak (Anders és Kretz, 2012).
- Részecske-raj alapú optimálás (PSO: Particle Swarm Optimization):

  A részecske-raj alapú optimálás egy evolúciós számítási technika, amit elsőként Kennedy és Eberhart dolgozott ki (Kennedy és Eberhart, 1997). Evakuáció modellezésben Izquierdo és társai egy olyan fitnesz függvényt minimalizálnak (optimalizáltak), amely összegzi a gyalogosok egymás közti, illetve a kijáratok közti távolságait (Izquierdo és mtsai, 2009).

3.1 Sejtautomata modellek

A sejtautomata egy mikroszkopikus modell, mely térben és időben is diszkrét (Meyer-König, Klüpfel és Schreckenberg, 2002; Blue és Adler, 1999). A sejtautomata modellek sejtalapú topológiát használnak (Neumann-féle, Moore-féle), a szimuláció során a sejtek állapota változik.

Bár a sejtautomata alapkoncepciója egyszerű, nagyon bonyolult, sok szabályt tartalmazó mozgásokat is leírhatunk velük. Például ilyen a Kirchner és Schadschneider által kidolgozott sztochasztikus modell (Kirchner és Schadschneider, 2002), amelyben a részecskék (sejtek) a mozgás során statikus (S) és dinamikus (D) potenciálmezők komplex kombinálásával orientálódnak a kijárathoz:

$$p_{ij} = N\ exp(k_D D_{ij}) exp(k_S S_{ij})(1 - n_{ij})\xi_{ij}, \tag{17}$$

ahol p_{ij} az átmeneti valószínűség a szomszédos (i, j) cellára. n_{ij} a sejt elfoglaltsága – értéke 0 vagy 1. ξ_{ij} az akadályokra vonatkozik, szintén 0 (pl. fal) és 1 értékkészlettel rendelkezik, azonban értéke időben nem változik. A k paraméterek súlyok, a dinamikus és statikus potenciálmezőkre vonatkoznak. Az N függvény normalizálja a szomszédos sejteket a súlyozott összegükkel.

Kifinomultabb modellek készítésére a sejtautomata modell nem megfelelő, a sejtautomata modellek fő hátrányai az evakuáció szempontjából (Seitz és Köster, 2012):

- Mivel a sejtek (cellák) identikusak, ezért kötött a gyalogosok mérete és alakja (1 cella 1 gyalogos).
- Mivel sejtalapú topológiát, szomszédsági modelleket használnak, ezért a mozgás iránya is kötött, a modell nem enged mesterséges irányokat.

3.2 Közösségi erőmodell

Elterjedt, és nagy szakirodalmi háttérrel rendelkezik a Helbing és társai által kidolgozott *közösségi erőmodell* (Helbing, Illés, Molnár és Vicsek, 2002; Helbing, Illés és Vicsek, 2000; Helbing és Molnár, 1995). A modell a mikroszkopikus modellek közé tartozik, időben és térben folytonos, végtelen finom időintervallumok használatával végtelen finom mozgást kapunk. A modellre nagy hatással volt Newton mechanikája; a gyalogosok taszító erőkkel kerülik el egymást, illetve a falakat, továbbá súrlódási, vonzó, vezérlő erők is jelentkeznek a modellben. Ezen erők eredője határozza meg a gyalogosok gyorsulás- és sebességvektorát a szimuláció során. A *közösségi erőmodell* gyorsulási egyenlete a következőképp épül fel:

$$m_i \frac{d\boldsymbol{v_i}}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t)\boldsymbol{e}_i^0(t) - \boldsymbol{v}_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j(\neq i)} \boldsymbol{f}_{ij} + \sum_W \boldsymbol{f}_{iW}, \tag{18}$$

ahol i gyalogos m_i tömeggel és egy bizonyos v_i^0 sebességgel szeretne haladni $\boldsymbol{e}_i^0$ irányba, és eszerint igyekszik alakítani $\boldsymbol{v}_i$ sebességét τ_i relaxációs (reakció) idővel. A gyalogos igyekszik magát távol tartani a többi gyalogostól és a falaktól, ezek mint interakciós erők $\boldsymbol{f}_{ij}$ és $\boldsymbol{f}_{iW}$ jelentkeznek. A gyalogosok közti taszító erő a következő képlettel számítható:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{f}_{ij} = \left\{ A_i exp\left[\frac{(r_{ij} - d_{ij})}{B_i}\right] + kg(r_{ij} - d_{ij}) \right\} \boldsymbol{n}_{ij} + \\ \kappa g(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ij}^t \boldsymbol{t}_{ij}, \end{aligned} \tag{19}$$

ahol $r_{ij} = (\boldsymbol{r}_i + \boldsymbol{r}_j)$ a gyalogosok sugarainak összege, $d_{ij} = \|\boldsymbol{r}_i - \boldsymbol{r}_j\|$ pedig a tömegközéppontjuk közötti távolság, $\boldsymbol{n}_{ij} = (n_{ij}^1, n_{ij}^2) = (\boldsymbol{r}_i - \boldsymbol{r}_j)/d_{ij}$ az i gyalogosról j gyalogosra mutató egységvektor. Az $A_i exp[(r_{ij} - d_{ij})/B_i]\boldsymbol{n}_{ij}$ tag a gyalogosok közt fellépő taszító erő, A_i és B_i pedig konstansok. A $kg(r_{ij} - d_{ij})\boldsymbol{n}_{ij}$ tag a térfogati erőt írja le, ami a testkompresszió ellen hat. A $\kappa g(r_{ij} - d_{ij})\Delta v_{ij}^t \boldsymbol{t}_{ij}$ tag a testek közt fellépő csúszási súrlódási erő, ami akkor fejti ki hatását, ha a gyalogosok túl közel kerülnek egymáshoz. A $t_{ij} = (-n_{ij}^2, n_{ij}^1)$ az érintőirányú vektort jelenti, $\Delta v_{ji}^t = (\boldsymbol{v}_j - \boldsymbol{v}_i) \cdot \boldsymbol{t}_{ij}$ az

érintőirányú sebességkülönbség, k és κ szintén konstansok. A $g(x)$ függvény 0, ha a gyalogosok nem érintik egymást, különben megegyezik az x értékével.

A gyalogosokéhoz hasonlóan a falakra számított taszító erő a következő:

$$\boldsymbol{f}_{iW} = \left\{ A_i exp\left[\frac{(r_i - d_{iW})}{B_i}\right] + kg(r_i - d_{iW}) \right\} \boldsymbol{n}_{iW} - \kappa g(r_{iW} - d_{iW})(\boldsymbol{v}_i \cdot \boldsymbol{t}_{iW})\boldsymbol{t}_{iW}. \tag{20}$$

A bonyolult fizikai egyenletek és erők használata természetesen komoly számítási kapacitást igényel (Izquierdo és mtsai, 2009).

A modell implementálható ágens-alapú modellező környezetben, ennek ellenére nem feltétlenül nevezzük ágens-alapú modellnek, mivel az ágensek nem rendelkeznek semmilyen egyedi tulajdonsággal (leszámítva az azonosítót és a pozíciót) vagy aktivitással.

A *közösségi erőmodellt* érő leggyakoribb kritika abból ered, hogy a szakértők szerint a gyalogosok mozgása számos véletlenszerű karaktert tartalmaz, amit a modell determinisztikus természete egyáltalán nem kezel. Következésképp a sztochasztikus modelleket tartják a jelenséghez megfelelőbbnek (Izquierdo és mtsai, 2009). Sokan hiányolják a modellből az emberek belső döntéshozó képességét (Crooks és Heppenstall, 2012). Továbbá komplex terek esetén gyakran előfordul, hogy két gyalogos nagyon közel halad egymáshoz, azonban fal választja el őket, ilyen esetekben a *közösségi erőmodell* nem vizsgálja, hogy valóban fennáll-e az interakció a két gyalogos között (Kirchner és Schadschneider, 2002).

3.3 Ágens-alapú modellek

Eric Bonabeau szerint az ágens-alapú modellek alkalmazási terület alapján négy csoportba kategorizálhatók, melyből az első az Áramlatok, ahová az evakuáció, közlekedés, és a vásárlók áramlási menedzsmentje tartozik (Bonabeau, 2002).

Az evakuációs ágensmodelleknek a legfontosabb előnye, hogy a mozgás nagyon valóságosan néz ki (Anders és Kretz, 2012; Castle és Crooks, 2006), mivel az ágensek adaptívak, képesek a magas szintű mesterséges intelligenciára, amit a kialakuló jelenségben jól alkalmaznak. Vitathatatlanul könnyebb megfogalmazni és modellezni a menekülő embereket, mint felvázolni az evakuáló tömegsűrűségeket vezérlő egyenleteket (Castle és Crooks, 2006).

A hátrányuk ezeknek a modelleknek, hogy nagyon bonyolultak, illetve számításigényesek lehetnek (Anders és Kretz, 2012).

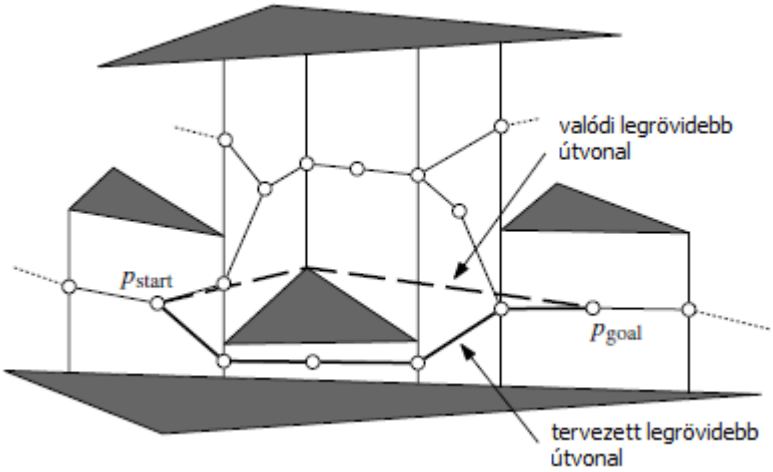
Találkozhatunk számos olyan ágens-alapú modellel, amelyek sejtautomata jellegű elemeket (szomszédsági topológiák; egy ágens egy sejtet foglal el) tartalmaznak (Crooks és mtsai, 2015; Almeida, Kokkinogenis és Rossetti, 2012). Ilyenkor a gyalogosok lépései – a szomszédos cellákon – egy általában 0.3 (Kirchner és Schadschneider, 2002) - 1.0 másodpercesnek választott időköz iterálása alatt történnek (Anders és Kretz, 2012). A sejtautomata elemek által (diszkrét tér és idő) ezeknek a modelleknek a számításigénye jelentősen csökken, így alkalmasak akár nagy (több ezer fős) tömegek szimulációjához. A sejtautomata jellegű ágensmodellek egyik nagy hátránya – a rácsháló-topológiát használó ágensekből adódóan – az, hogy nem tudunk velük pontos evakuálási időket számítani, csak szimulációs lépésszámot adnak eredményül. Ezeket utána tapasztalati lineáris függvényekkel kell átváltanunk másodperc dimenzióra (Izquierdo és mtsai, 2009).

3.4 Navigáció

A gyalogosok navigációjának megoldására számos kidolgozott módszer létezik. A tér komplexitása (tartalmaz-e akadályokat) és reprezentációja (vektoros vagy raszteres modellt használunk) jelentősen befolyásolja a navigációs modell kiválasztását.

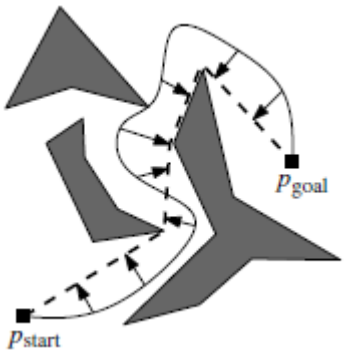
A térmodell típusát általában már a modellező szoftver megköti, de a számítási kapacitás is befolyásolja ezzel kapcsolatos döntéseinket.

A poligon akadályokat tartalmazó vektoros modellen megvalósítható navigációra jó példa Berg láthatósági gráfja (de Berg, Cheong, van Kreveld és Overmars, 2008):



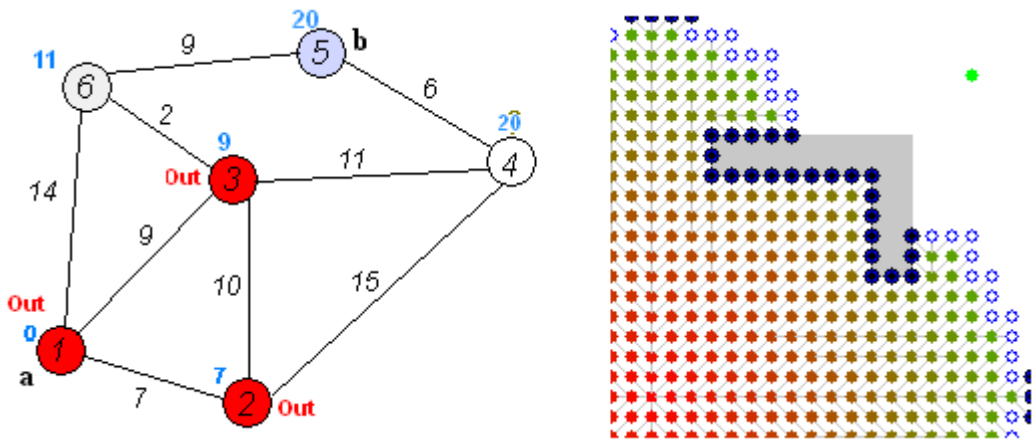
22. ábra: Láthatósági gráf készítése trapézra bontással (középpontok, és szakaszfelező pontok). A tervezett útvonallal szemben a valódi legrövidebb útvonal a háromszög fölé esik (de Berg és mtsai, 2008)

A 22. ábrán használt navigációs algoritmus azt a gráfot választja, ami a legkevesebb szakaszt/csomópontot tartalmazza. Azonban a legrövidebb útvonal a poligonok töréspontjaiból kell, hogy felépüljön, lásd 23. ábra.



23. ábra: Gumiszalag jelöli ki a legrövidebb útvonalat (de Berg és mtsai, 2008)

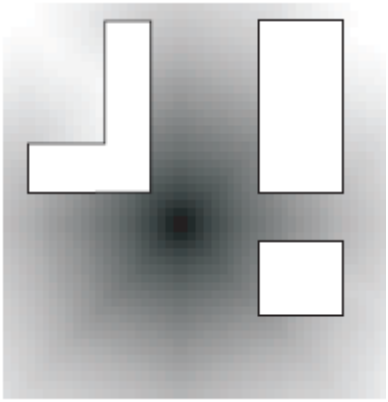
Egy nyilvánvaló fejlesztés lehet az euklideszi távolságok súlyként történő felhasználása, majd egy olyan gráfkereső algoritmus használata, ami megtalálja a legrövidebb utat, mint pl. Dijkstra algoritmusa (Dijkstra, 1959). Azonban lényegesen számításigényes – szinte használhatatlan – az, ha minden egyes lépésben, minden egyes ágensnek újraszámítjuk az egész navigációját, ami bizonyos esetekben kivitelezhetetlen (másik ágens elzárja az utat). Ehelyett elkészíthető a helyszín statikus potenciálfelülete a Dijkstra-algoritmus valamilyen tesszeláción történő kiértékelésével.



24. ábra: Dijkstra-algoritmus szabálytalan (vektor) és szabályos (raszter) gráfon

3.5 Potenciálfelület

A statikus potenciálfelületet úgy kell elképzelni, mint egy plusz rácshálót a geometria fölött, ami azt tartalmazza, hogy az egyes pontoktól (cellából) mekkora távolságra van a kijárat (Anders és Kretz, 2012). A potenciál elnevezés Khatib (Khatib, 1986) nevéhez fűződik a robotika területéről, korábban távolság keresőtáblának is hívták (distance lookup table). Azonban az általa bevezetett potenciál még nem vette figyelembe az akadályokat (Schultz, Kretz és Fricke, 2010).



25. ábra: Potenciálmező akadályokkal Neumann szomszédság alapján (Schultz és mtsai, 2010)

Számos módja van a potenciálfelület elkészítésének, akár térinformatika szoftverrel (GRASS) is létrehozható egy statikus potenciálmező. Az GRASS-beli 'r.walk' algoritmus a következő képletet használja a mozgási idők számítására (részben átfogalmazva):

$$T = a\ \Delta_S + b\ \Delta_H, \tag{21}$$

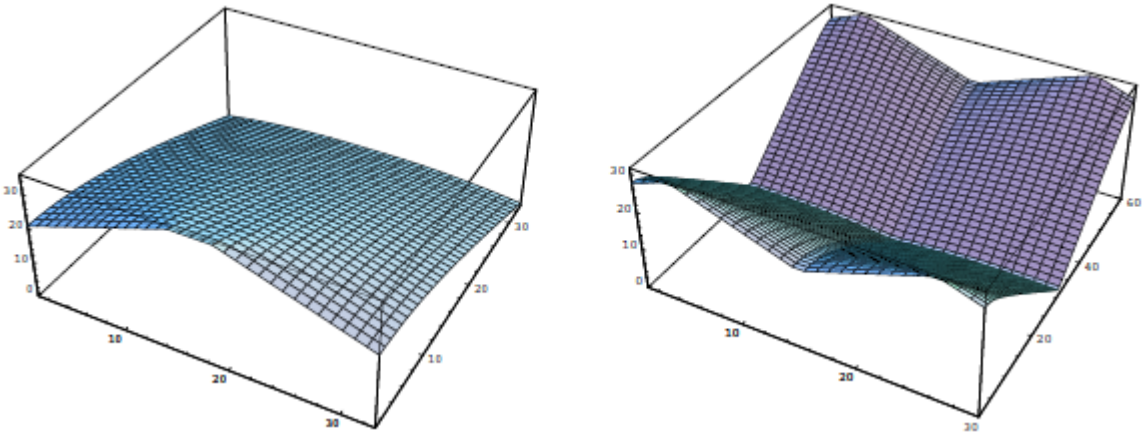
ahol T a mozgáshoz szükséges idő másodpercben, Δ_S a raszter cellák közötti horizontális távolság méterben, Δ_H a szomszédos cellák közötti magasságkülönbség (a szomszédos cella magasságából vonjuk ki a saját cella magasságát). Az a paraméter a vízszintes felületen 1 méter megtételéhez szükséges időt jelenti, alapértelmezett értéke 0.72. A b paraméter alapértéke emelkedőn 6.0, enyhe lejtőn 1.9998, meredek lejtőn -1.9998. A paraméterek értékeit a Naismith-szabály alapján határozták meg (Langmuir, 1984; Aitken, 1977). Az emelkedő esetén a Δ_H pozitív értéke hatszorosára szorzódik, és jelentősen megnöveli a sétálási költséget. Enyhe lejtő (12 fok alatt) esetén a Δ_H negatív értéke pozitív kettővel szorzódik, így a végső negatív érték csökkenti a sétálási költséget. Meredek lejtő (12 fok felett) esetén a Δ_H negatív értéke negatív kettővel szorzódik, így a végső pozitív érték szintén növeli a sétálási költséget. Ennek alapja, hogy meredek lejtőn is lassan megyünk.

A bemutatott (18) képlettel készíthető potenciálmező képes a magasságok kezelésére is. A végső teljes költség a következőképp kumulálódik:

$$C = T + \lambda \; s \; \Delta_S, \tag{22}$$

ahol C a cella végső költsége, λ a súrlódás dimenzió nélküli skálatényezője, s a súrlódás értéke a cellában (szabadtéri mozgásnál lehet jelentősége, pl.: erdő, mező, bokor).

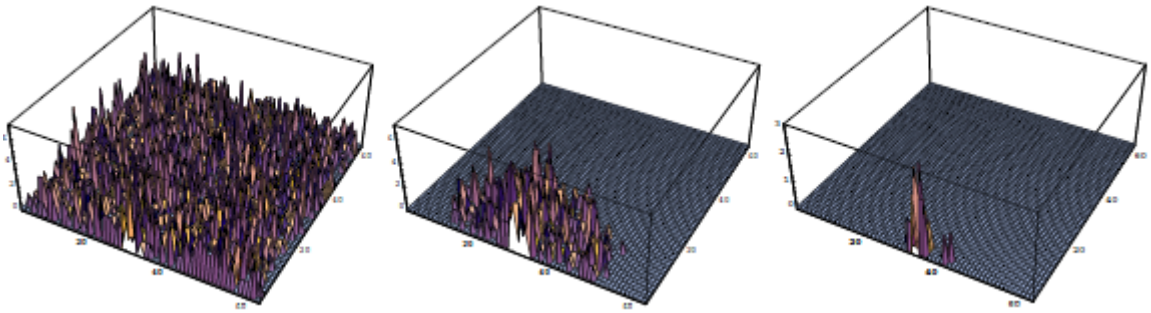
A statikus potenciálmező időben sem, és a gyalogosok hatására sem változik. Egy ilyen mezőt az evakuáció szempontjából vonzó helyekre (pl. ajtókra) is elkészíthetünk (Kirchner és Schadschneider, 2002).



26. ábra: Statikus potenciálmező egy ajtóval (4 cella széles), és négy ajtóval (jobb kép). A mező értékei a kijáratokban a legnagyobbak (Kirchner és Schadschneider, 2002)

A 26. ábrán az ajtók a legnagyobb értéket kapják, míg a GRASS-szal készített sétálási költségtérképen a legkisebbet. A 26. ábra esetén a gyalogosoknak a legmeredekebb lejtőn felfelé, ellenben a (22) egyenlettel készített költségtérképen lefelé ajánlott haladniuk (36. ábra). Megjegyzem, a költségtérkép külön-külön is elkészíthető valamennyi ajtóra, ez esetben a gyalogosoknak kell eldönteniük melyik ajtó felé haladnának.

A gyalogosok mozgásának navigációjához egy dinamikus potenciálmező is bevezethető. Kirchner és Schadschneider folyamatosan összeszámolták, hogy egy adott cellán, hányan mentek keresztül, ami egy bozonikus mezőhöz hasonlítható (Kirchner és Schadschneider, 2002).



27. ábra: Dinamikus potenciálmező a kezdeti fázisban; középidőben; a szimuláció végén (Kirchner és Schadschneider, 2002)

A dinamikus potenciálmező a gyalogosok folyamatos áramlása miatt időben változik. Továbbá kiegészítették a mezőt azzal, hogy értékei - δ valószínűséggel – csökkenjenek (hanyatlás), valamint – α valószínűséggel – terjedjenek szét a szomszédos cellákra:

$$\begin{aligned} D_{ij} &\rightarrow D_{ij} + 1 \\ D &= D(t, \delta, \alpha). \end{aligned} \tag{23}$$

A gyalogosok által elhagyott bozonok segíthetnek az őket követő gyalogosok nyomkövetésében.

A korábban bemutatottakhoz hasonlóképp, potenciálmezőként valós gyalogos mérésekből készített sűrűségtérkép is használható (Crooks és mtsai, 2015).

3.6 Implementáció

Az evakuációs modellek implementációja során a következő fő szempontokat kell átgondolnunk:

3.6.1 Az evakuáló individuum térbeli leírása

Az evakuáló személy térbeli kiterjedése leírható:

a. egy megadott méretű cella állapotával a rácshálón (sejtautomata szemlélet);
b. egy ágenssel a rácsháló egy adott térbeli kiterjedéssel bíró celláján (ágens-alapú szemlélet);
c. egyenletekkel, biztosítva egy megkötött térbeli kiterjedést, vagy annak változását. Például távolságtartó egyenletekkel (*közösségi erőmodell*), területlefedő egyenletekkel (*térbeli lépésmodell*);
d. egyéb módon.

3.6.2 Az evakuációs tér reprezentációja

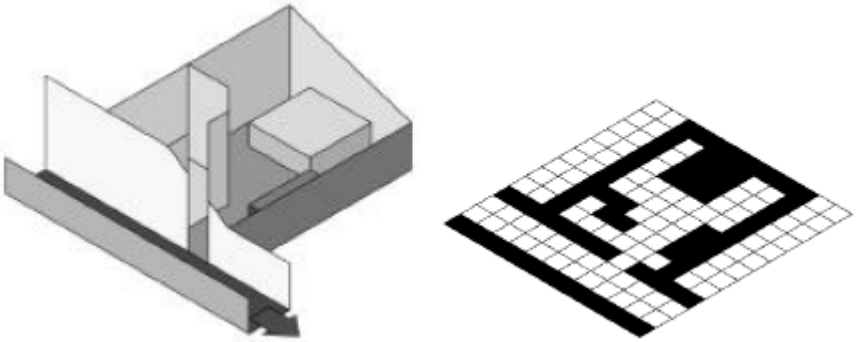
Számos modell bemutatásánál csak nagyon egyszerű, kísérleti tereket használnak (téglalap vagy négyzet alakú tér, 1-3 ajtóval). Ezek a modellek nem biztos, hogy működőképesek az általános, komplex térreprezentációkban. A térbeli reprezentációt Gwynne a finom hálózatok (celluláris modell) és a durva hálózatok (gráfmodell) csoportjára bontja (Gwynne és mtsai, 1999):

a. Celluláris modell

A celluláris modell a mikroszkopikus modelleknél használatos. A modellezők a cellák méretét általában az ember méretéhez igazítják (Waterson és Pellissier, 2010), 40 x 40 centiméteresnek szokták választani (Anders és Kretz, 2012), például Crooks és munkatársai 37.5 cm-es cellákat használtak (Crooks és mtsai, 2015). De találkozhatunk ettől eltérő cellamérettel is, például 1 x 1 méteressel (Almeida és mtsai, 2012). Az említettek közös nevezője, hogy egy cellán egy ember állhat (ágens-

alapú szemlélet); vagy a cella állapota elfoglalt, vagy nem (sejtautomata szemlélet). Egy 40 cm-es (relatív durva) térbeli felbontású modellnél (sejtautomata vagy ágens-alapú) pl. egy 3 cellából álló ajtó 80 és 160 cm szélességet is jelenthet (Anders és Kretz, 2012). Azonban találkozhatunk a korábbiaknál finomabb, például 10 x 10 cm-es cellamérettel is (Wirth és Szabó, 2017), ekkor az ágensek kiterjedése több cellát érint.

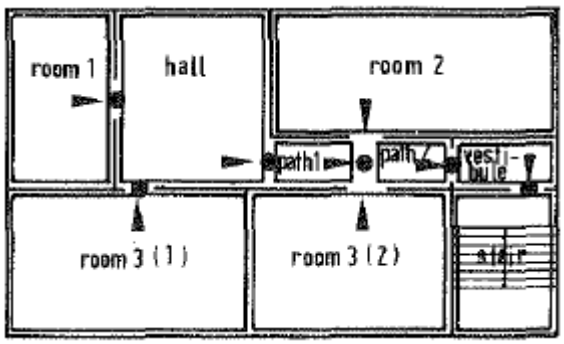
Celluláris modellt használnak például az EXODUS, STEPS, SIMULEX szimulációs szoftverek. Az EXODUS 0.5 méteres, a SIMULEX 0.25 méteres cellákat használ (Pelechano és Malkawi, 2008; Gwynne és mtsai, 1999; Owen, Galea és Lawrence, 1996; Thompson és Marchant, 1994).



28. ábra: A tér diszkretizálása vagy raszterizálása (Meyer-König és mtsai, 2002)

b. Gráfmodell

A makroszkopikus modelleknél használatos. A szemantikailag fontos elemek pontokként (ajtók, kijáratok, ablakok) jelennek meg (Okazaki és Matsushita, 1993). A tereket csomópontokra bontják, az élek a helyszíneket összekötő ajtókat jelentik. Ilyen modelleket (pl. Takahashi modell) alkalmazó szoftver például az EVACNET+ (Gwynne és mtsai, 1999; Takahashi, Tanaka és Kose, 1989; Kisko és Francis, 1985).



29. ábra: A tér makroszkopikus modellezése csomópontokkal és haladási iránnyal (Takahashi és mtsai, 1989)

Továbbá a tér kezelhető még:

c. egyenletekkel, periodikus határfeltétellel;

d. üres modell-koordinátarendszerrel;

e. egyéb módon.

3.6.3 Navigáció megoldása

A szimulációs modellnek tartalmaznia kell valamilyen külső segítséget, ami alapján a bemeneti adatok – a gyalogosok – eljutnak a céljukhoz. Ezek lehetnek ellenőrző/iránypontok, amelyek felé a gyalogosok haladnak, vagy lehet egy mező is, ami meghatározza orientálódásukat, esetleg követhetnek egy személyt is, aki tudja az útvonalat (ismeri a mező/ ellenőrző pontokat). Az ellenőrző pontok, vagy a mező elkészítése történhet manuálisan, vagy automatizáltan (például a Dijkstra algoritmussal).

A pontok manuális szelekciója azt jelenti, hogy kézzel választjuk ki az evakuálás során fontosnak vélt szemantikai elemeket (sarkok, ajtók). Kisebb tömegek esetén célszerű ekkor a pontokat a sarkokhoz közel, nagyobb tömegek esetén a sarkoktól távolabb lehelyezni (Anders és Kretz, 2012). Ezen iránypontokat akár explicit betáplálhatjuk az ágensekbe (Okazaki és Matsushita, 1993), vagy implicit módon a saját keresőkörükkel megkerestethetjük őket. Az implicit módszernek kockázatai is

lehetnek, ugyanis lehet, hogy valamelyik iránypont térben közelebb van, azonban az eléréséhez kerülő szükséges. Az iránypontos módszernél az ágensek egy szekvenciát követnek. Az iránypontok koordinátáin haladnak végig, vagy a felületek azonosítóin. Például, padsor - 1, folyosó - 2, ajtó - 3. Az iránypontok lehetnek akár a menekülési táblák is. Tehát a komplex térbeli navigáció történhet (Schultz és mtsai, 2010):

a. Irányok sorozatával
b. Potenciálmezővel

A mozgás leírását a választott evakuációs modell tartalmazza, amely használhat szabályokat, egyenleteket, topológiai szomszédságmodelleket. Az adott modell választása megköti az implikációs lista bizonyos pontjait, például egy sejtautomata modell esetén az 3.6.1.a, 3.6.2.a implementációk szükségesek 3.6.3.b navigációval. A *közösségi erőmodell* megköti az 3.6.1.c pontot, de megvalósítható 3.6.2.a vagy 3.6.2.c, 3.6.2.d evakuációs térrel, 3.6.3.a vagy 3.6.3.b navigációval.

4 Térbeli lépésmodell

Ebben a fejezetben bemutatom az általam kifejlesztett, evakuáció szimulációra alkalmas ágensmodellt, a *térbeli lépésmodellt* (SSM: Spatial Stepmodel). A *térbeli lépésmodell* egy diszkrét, mikroszkopikus ágensmodell, amely megtartja a sejtautomata modellek lépés-szemléletét, azonban feloldja a celluláris modellek térbeli korlátait. Matematikai háttere alkalmassá teszi az evakuációs szimulációk kivitelezésére bármilyen térbeli felbontású környezetben. Ágens jellege megragadja a várakozás aktivitást, ezért képes annak regisztrálásával a kialakuló pánik becslésére. A kidolgozott modell alkalmazását egy egyetemi előadóteremben különféle szcenáriókkal mutatom be. Az SSM modellt összehasonlítom a folytonos tér-idő szemléletű *közösségi erőmodellel* (SFM), és kimutatom, hogy az SSM-ben jelentős keveredés jelentkezik a padsorok kiürülésének sorrendjében ellenben az SFM-mel. Az utolsó rész az SSM szimulációs modell valós idejű verzióját ismerteti.

A kidolgozott *térbeli lépésmodell* egy diszkrét, mikroszkopikus, determinisztikus evakuációs ágensmodell (Wirth és Szabó, 2017a). Diszkrétsége abból ered, hogy a modell lépésalapú, tehát a lépés vagy megtörténik, vagy nem. Az alapértelmezett verzióban a lépésmodell szimulációjának időalapját maga a lépés eseménye adja, a másodperc alapú verzióban az ágensek sebességével kerül kiszámításra a lépés időpontja, az ágensek nem egyszerre lépnek. Mindkét verzióban a valósághoz hasonlóan a lépés akkor történik meg, ha van elegendő hely a lépés megtételére.

Szemben a folytonos modellekkel itt végtelen kicsi időintervallumra nem történik térbeli változás, a lépések a modell szimulációja során kerülnek megtervezésre, és egy adott időpontban megtörténnek. A folytonos *közösségi erőmodellel* szemben a *térbeli lépésmodellben* az ágensek nem folynak, hanem esetleges megszakításokkal lépkednek.

A modell mindkét kidolgozott verziója determinisztikus, tehát ugyanarra az evakuációs beállításra ugyanazt az eredményt adja, azonban a módszer könnyedén kiegészíthető sztochasztikus elemekkel, véletlenszerű megállásokkal (pl.: táskában keresés, ijedtség, udvariasság, tervezés).

A modell az ágens-alapú modellek közé sorolható főképp a modellbeli aktivitásokból adódóan. Aktivitás függvény például a lépés, vagy a várakozás. A várakozás során lehetősége van a modellezőnek a várakozási idő rögzítésére, amely a pánikkal kapcsolatos mérőszámként is felhasználható. A modell ágens-alapú modellező környezetben, ágens-alapú szemléletben került kidolgozásra.

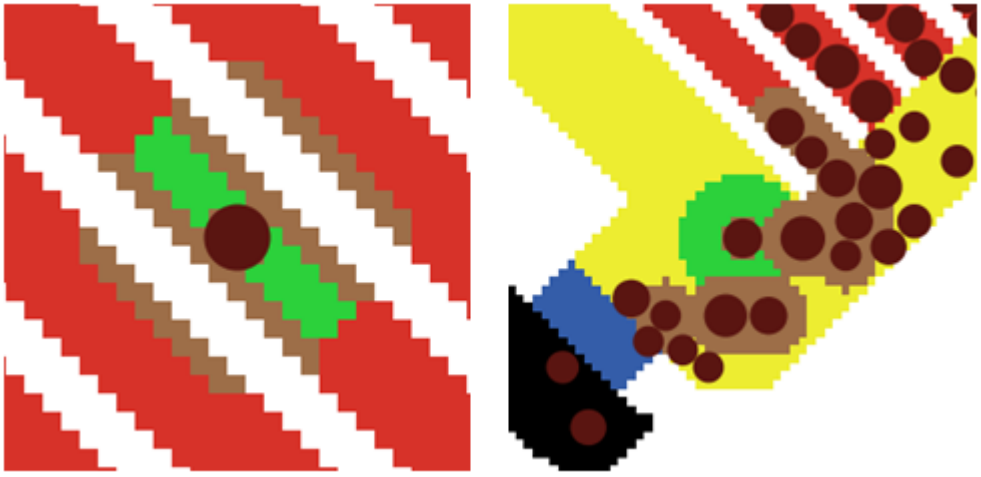
Gwynne és társai szerint az evakuációs modellek két típusba sorolhatók, az egyik csoport az, amiben csak a mozgással foglalkozunk, a másik csoportban az emberi viselkedést is vizsgáljuk (Gwynne és mtsai, 1999). Ez a határ elmosódik az általam kidolgozott modellben, ami a mozgást próbálja 100 %-ban imitálni, de egyben tartalmaz emberi viselkedéssel kapcsolatos elemeket (várakozás, reakcióidő).

Gwynne és társai szerint számos evakuációs modell létezik, melyek nagyban függnek attól, hogy milyen célra fejlesztették, és hogy ki fejlesztette (mérnök, fizikus, építész, pszichológus) (Gwynne és mtsai, 1999).

Az általam – térinformatikai szemmel – készített evakuációs modell a tér matematikai műveletekkel történő kezelésével feloldja a sejtautomata modellekkel kapcsolatos térbeli korlátokat, de megtartja azok lépés-orientáltságát. A készített ágensmodell általánosan alkalmazható, könnyen kiegészíthető, felhasználható épületek alkalmassági vizsgálatára.

4.1 A mozgás matematikai leírása

A matematikai rész könnyebb megértéséhez először a szimulációban részt vevő ágenseket mutatja be a 30. ábra.



30. ábra: A bal képen egy előadóterem padsorában elhelyezkedő ágens látható, a jobb képen az ágens egy komplexebb környezetben tart a kék ajtó felé. A rácsháló felbontása 10 cm, tehát egy ágens több cellát fed le (Wirth és Szabó, 2017a)

Mivel a mikroszkopikus modellek általában celluláris térmodellt használnak, ezért a módszer is eszerint a térreprezentáció szerint került leírásra. Először vesszük az ágensek és valamennyi térmodellbeli cella halmazát:

$$A : \{Agent\ Set\}, C : \{Cell\ Set\}. \tag{24}$$

Ezt követően két csoportba rendezzük a cellákat a térbeli objektumazonosítók alapján (gid attribútum). Az egyik csoport (W) a járható cellákat, a másik csoport (O) az akadályokat tartalmazza:

$$\begin{aligned} W :&\ \{C \mid gid(C) \neq 0\} \\ O :&\ \{C \mid gid(C) = 0\} \\ &C = W \cup O. \end{aligned} \tag{25}$$

Veszünk minden ágenst, akik helyét a $p(t, i)$ időben változó függvény írja le:

$$\forall\ i\ \in A \tag{26}$$

$$p(t,i) = \{x, y\}.$$

Ezt követően kigyűjtjük minden egyes – a szimulációban soron következő – ágens azon környezetét, ami járható (30. ábra bal képén a zöld terület):

$$R: \ \{w \in W \mid (w_x - p(t,i)_x)^2 + (w_y - p(t,i)_y)^2 \leq l^2\}, \tag{27}$$

ahol w egy járható cellát jelent, l pedig az ágens lépésméretét jelenti. Az ágensek méretét a sugaruk adja meg, amit az ágensek a tér bekolonizálásakor véletlenszerűen kapnak a következő tartományon:

$$r(i) = 18 \ldots 26 \ cm. \tag{28}$$

Szükséges megvizsgálni, hogy tartózkodik-e másik ágens a vizsgált ágens környezetében. N halmaz azokat az ágensek tartalmazza, akik hatással lehetnek a vizsgált ágens mozgására:

$$N = \left\{ j \in A \setminus \{i\} \middle| \begin{array}{c} (p(t,j)_x - p(t,i)_x)^2 + (p(t,j)_y - p(t,i)_y)^2 \\ \leq (l + r(i) + (\max_{i \in A} r(i)))^2 \end{array} \right\}. \tag{29}$$

Ezt követően alkotni kell egy NB halmazt a szomszédos ágensek azon környezetéről, amiben a saját maguk által lefedett terület, valamint az a terület is benne van, ahova lépve a vizsgált ágens átfedésbe kerülne a szomszédjával. Tehát a szomszédos ágens övezetének sugarát meg kell növelni a vizsgált ágens sugarával. Ki kell gyűjteni ezeket a cellákat:

$$NB = \bigcup_{\forall n \in N} \left\{ w \in W \middle| \begin{array}{c} (w_x - p(t,n)_x)^2 \ + \\ (w_y - p(t,n)_y)^2 \leq (r(i) + r(n))^2 \end{array} \right\}. \tag{30}$$

Egy másik, M halmazba gyűjtsük ki az i ágens környezetében található azon o akadály cellákat, amik hatással lehetnek a mozgásra:

$$M = \{o \in O \mid (o_x - p(t,i)_x)^2 \ + (o_y - p(t,i)_y)^2 \leq (l + r(i))^2\}. \tag{31}$$

Ezt követően készítsük el az M halmaznak az övezetét. Ez azért szükséges, hogy az ágens ne kerüljön túl közel az akadályokhoz. Az övezet sugara a vizsgált ágens

sugarával egyezik meg. A számítások felgyorsításához lehetséges az akadályok cellakontúrjának az elkészítése a cellafoltok helyett.

$$OB = \bigcup_{\forall m \in M} \{w \in W \mid (w_x - m_x)^2 \ + (w_y - m_y)^2 \leq r(i)^2\}. \tag{32}$$

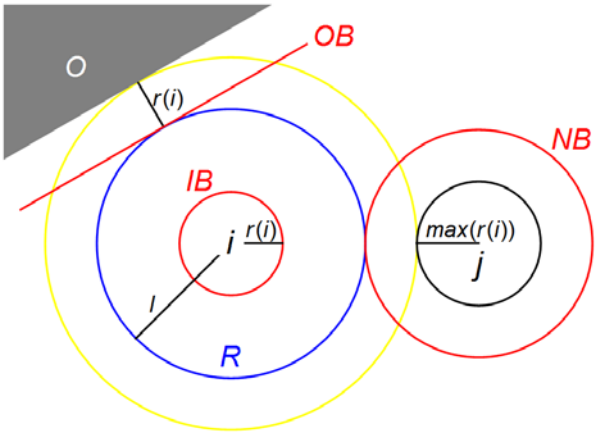
Tehát az OB azokat a járható cellákat tartalmazza, amik az akadályok ágens-méretű környezetébe esnek. Továbbá szükséges az ágens által lefedett területnek az IB halmazba gyűjtése:

$$IB = \{w \in W \mid (w_x - p(t,i)_x)^2 \ + (w_y - p(t,i)_y)^2 \leq r(i)^2\}. \tag{33}$$

Végül elkészítjük az övezetek unióját, és kivonjuk a vizsgált ágens környezetébe eső járható halmazból:

$$P = R \setminus (NB \cup OB \cup IB). \tag{34}$$

A kapott P halmaz tartalmazza azokat a potenciális cellákat, ahova az ágens léphet. Ezt követően eldönthető, hogy az ágens melyik cellára lépjen. A módszer biztosítja, hogy a gyalogosok ne kerüljenek átfedésbe sem egymással, sem az akadályokkal. A felvázolt övezetméretek megértéséhez jó áttekintést ad a 31. ábra:



31. ábra: A vizsgált i ágens a kék körvonalon belül léphet, a sárga körvonal az akadályok keresőköre, a piros vonalak a nem járható cellákat határolják (Wirth és Szabó, 2017a)

Bár nincs nagy valószínűsége, de előfordulhat, hogy olyan cellát is tartalmaz az S halmaz, aminek elérését objektumok akadályozzák. Ezen cellákat láthatósági

elemzéssel kell kiszűrni. Nagyon vékony falak esetén mindenképp szükséges a láthatóság elemzés.

Egy továbbfejlesztési irány lehet például áthatolhatósági érték rendelése az akadálycellákhoz, pl. padoknál sokkal kisebb érték, mint vékony falaknál. És a várakozás során a stressz emelkedése járhatóvá tenné ezeket az akadályokat.

A *térbeli lépésmodell* átfedés-mentessége feloldható, illetve nagyobb távolságtartás állítható be egy plusz p paraméterrel. A (29-32) egyenletek jobb oldalán $r(i)^2$ helyett $p\ r(i)^2$-t használva százalékosan állíthatunk a gyalogos-gyalogos, gyalogos-akadály kapcsolatok átfedésein, illetve távolságtartásán.

A P halmazt még érdemes tovább szűrni a navigáció szempontjából optimális cellák halmazára (S). Potenciálmező használata esetén ez a kisebb költségű, a kijárathoz közelebb lévő cellák:

$$S = \{p \in P \mid cost(p) < cost\big(p(t,i)\big)\}. \tag{35}$$

Az S tartalmazza azokat a cellákat, ahova az ágensnek érdemes lépnie. Ezen cellák közül az ágens a legkedvezőbb cellára lép:

$$\exists s \in S \xrightarrow{lépés} \min_{s \in S} cost(s). \tag{36}$$

Iránysorozatok esetén az S halmaz a kívánt iránnyal hozható létre:

$$\begin{gathered} S = \{p \in P \mid \cos(\Phi_{n,p} + \alpha) > 0\} \\ \Phi_{n,p} \in [0, 180], \end{gathered} \tag{37}$$

ahol $\Phi_{n,p}$ a vizsgált ágens által kívánt n navigációs irány és a vizsgált p cella iránya által bezárt szöget jelenti. Az α paraméterrel az ágens látókúpjának nyílásszögét tudjuk állítani ($\alpha = 0 \rightarrow 180°$; $\alpha = 10 \rightarrow 160°$). A feltétel magába foglalja azt, hogy a cella a megfelelő irányba legyen.

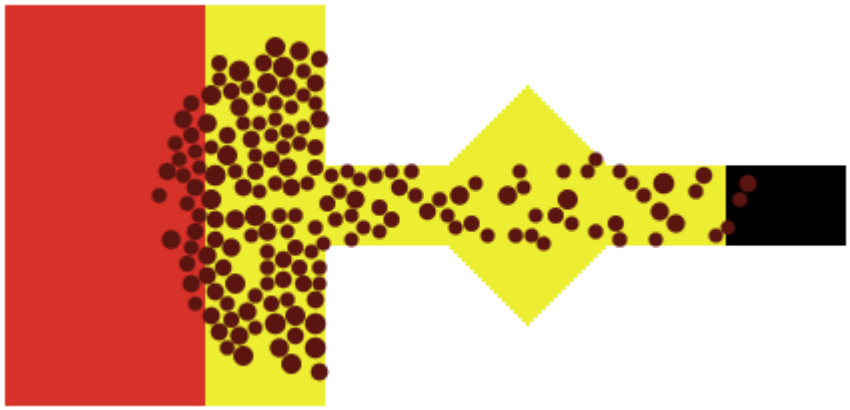
A lépés szintén a legkedvezőbb cellára történik, a kívánt irántól való eltérés kombinálható a lépés nagyságával:

$$\exists s \in S \overset{lépés}{\longrightarrow} \max_{s \in S} \left(\sqrt{(s_x - p(t,i)_x)^2 + (s_y - p(t,i)_y)^2} \cos(\Phi_{n,s} + \alpha) \right). \tag{38}$$

Lehetséges, hogy nem létezik az ágens pozíciójánál kedvezőbb cella, ekkor az ágens megvárja a következő szimulációs lépés időpontját.

4.2 Az SSM modell jellemzői

A módszer – a fizikai törvények implementálása nélkül – hasonló mozgási karakterisztikákat mutat, mint a *közösségi erőmodell*. Itt értem például az ívelést, vagy az eltömődést. A megjelenő mintákat jól szemléleti a 32. ábra.



32. ábra: A gyalogosok a piros területről haladnak a fekete területre. A navigációhoz potenciálfelületet használtam (Wirth és Szabó, 2017a)

A modell tulajdonságai és előnyei:

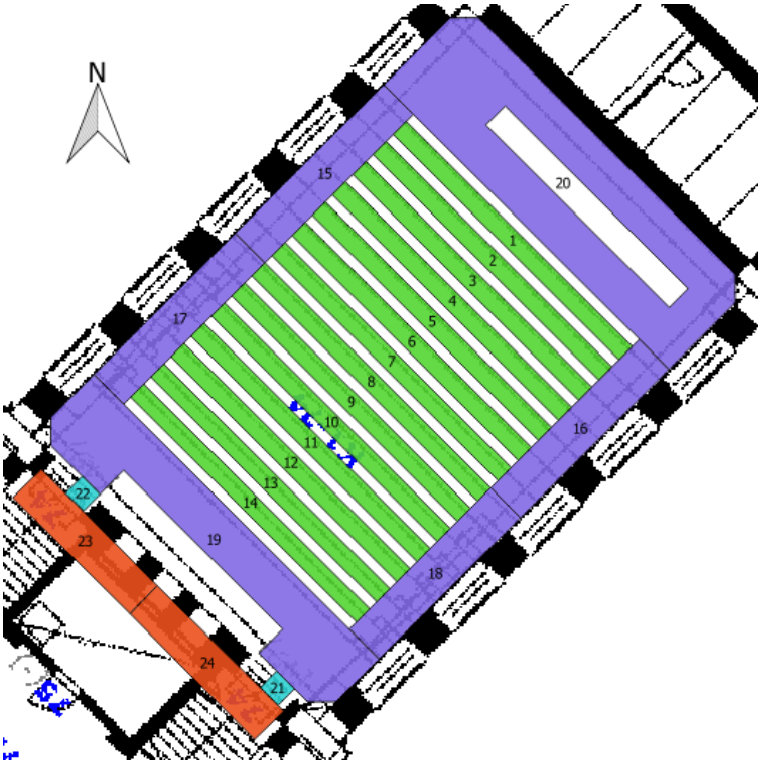
- diszkrét;
- mikroszkopikus;
- determinisztikus;
- általános felhasználású;
- ágens-alapú – könnyen kiegészíthető;
- flexibilis – többféle navigációs megoldással használható;
- sokoldalú – bármilyen cellaméret használható (pl.: 5, 10, 25, 40 cm);
- kevés paraméter jellemzi (lépésméret, ágensméret).

4.3 A módszer alkalmazása

A modell tesztelésének helyszíneként a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem K174-es számú előadótermét választottuk. A teremben 14 padsor található, valamennyi padsor 16 széket tartalmaz, lásd 33. ábra.

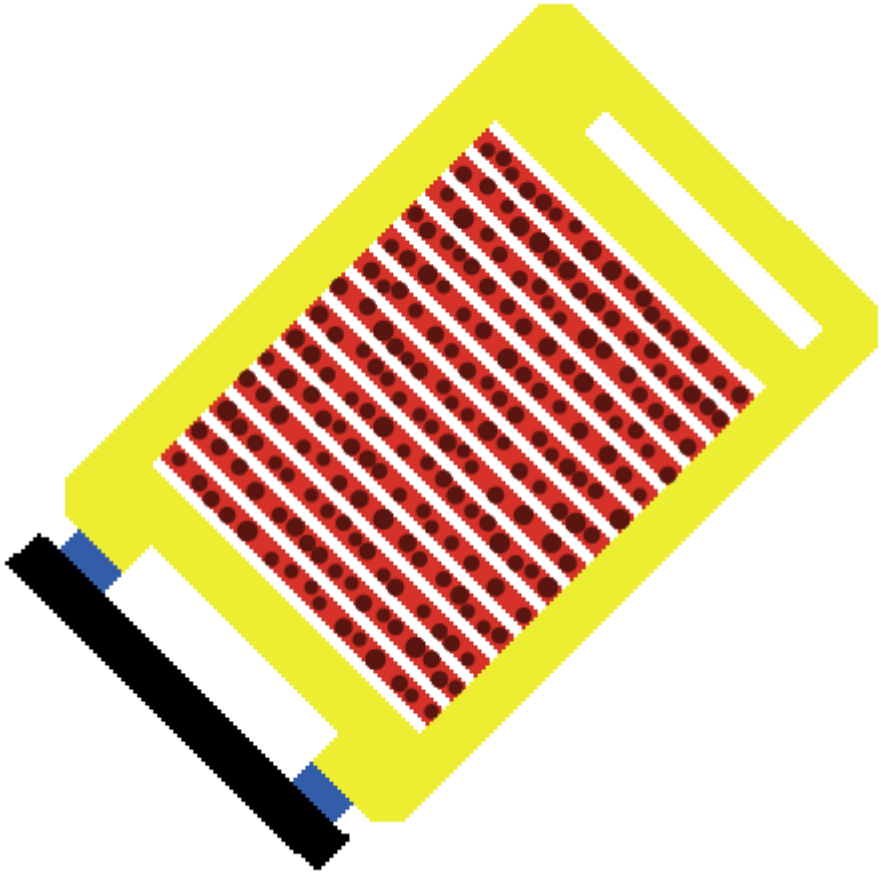
33. ábra: A K174-es előadóterem (Wirth és Szabó, 2017a)

A terem két oldalán lehet elhagyni a padsorokat, a szélső folyosók a terem két ajtaja felé vezetnek, a legutolsó padsor mögötti terület szintén alkalmas a közlekedésre. Először szükséges volt a terem felmérése, a mért pontok felszerkesztése. A 34. ábra a termet georeferáltan, méret és alakhelyesen mutatja egy térinformatikai szoftverben.



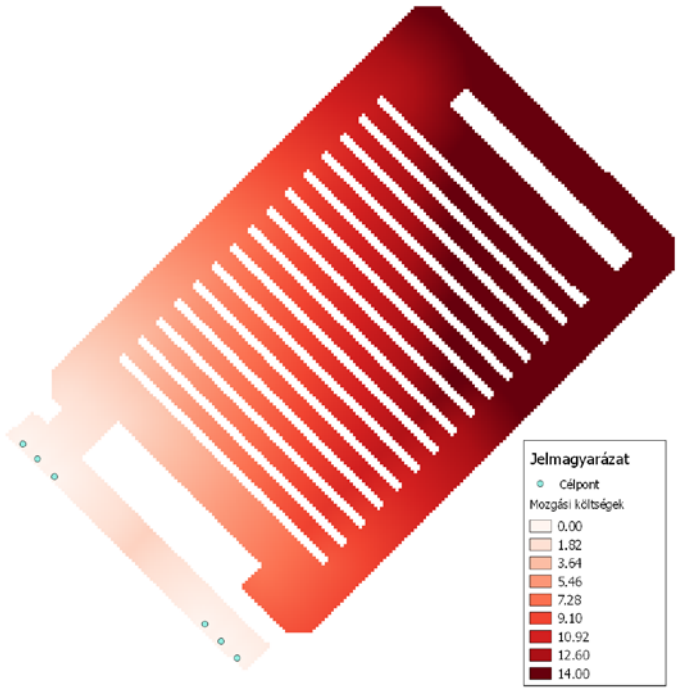
34. ábra: A georeferált – északi tájolású – előadóterem részekre bontott vektormodellje. 1-14: ülések, 15-20: folyosók, 21-22: ajtók, 23-24: külső tér (Wirth és Szabó, 2017a)

A 34. ábrán bemutatott vektormodell diszkretizálását, azaz raszterizálását 10 centiméteres cellamérettel hajtottam végre. A mintavételezett tér ágens-modellező környezetbe töltését követően megtörtént annak kolonizálása. A 35. ábrán a diákok a padsorokba véletlenszerűen lettek elhelyezve. Ha egy diák az elhelyezés során olyan pozíciót kapott, hogy érintkezésbe került a szomszédos diákokkal, akkor új helyre került. A diákok telepítése közben a köztük megengedett távolságot egy szeparációs paraméterrel biztosítottam.



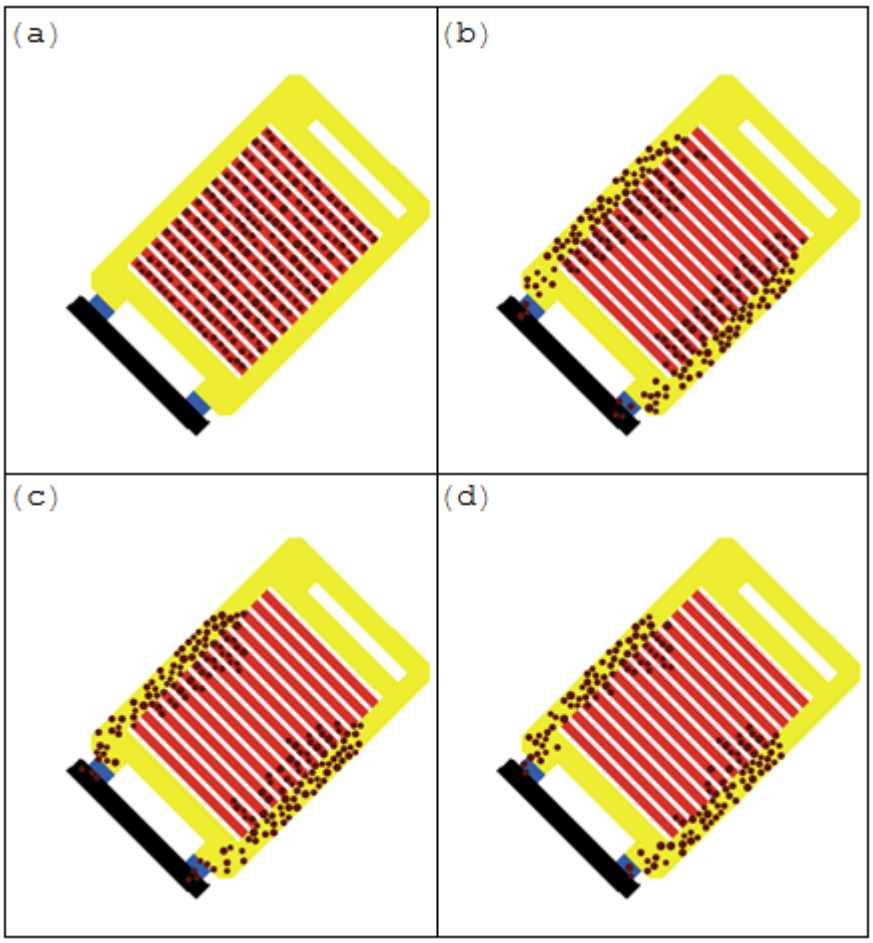
35. ábra: A celluláris térmodell telepítése 220 fővel (Wirth és Szabó, 2017a).
A telepítés 7 cm-es szeparációs paraméterrel történt.
A diákok átmérője amerikai és brit bideltoid vállszélesség minták
alapján 36 és 52 centiméter között változik (Chan, 2004)

Navigációs megoldásként a (21) és (22) képletek alapján elkészítettem a terem mozgási költségtérkép rétegét, amit potenciálmezőként használtam fel. A sétálási költségek számítása során nem használtam súrlódás, illetve domborzatmodell réteget, a termet magasságilag egy síkba helyeztem. Mivel szimmetrikus a terem, ezért nem lett volna jelentősége a 2+1D implementációnak.



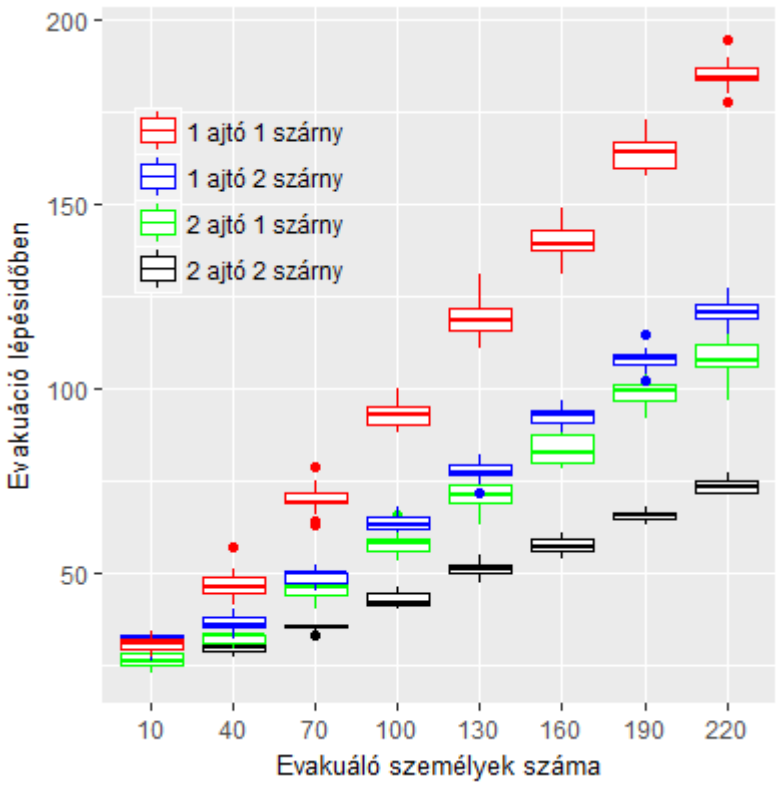
36. ábra: A terem potenciálmezejeként alkalmazott sétálási költségtérkép (egy szélesre nyitott ajtóval). A sötétebb vörös nagyobb sétálási költséget jelent (Wirth és Szabó, 2017a)

Az ágensek a (36)-os egyenletben bemutatott egyszerű szabályt követik, igyekeznek minél alacsonyabb potenciállal rendelkező cellára lépni. A szimuláció során minden egyes szimulációs lépésben valamennyi ágens véletlenszerűen megszólításra került, hogy lépjen, ha lehetséges. A 37. ábra 220 diák evakuációját mutatja be. Az ábrán megfigyelhető, hogy utoljára a középső sorok ürülnek ki.



37. ábra: A szimuláció bemutatása, 0 (a), 10 (b), 20 (c), 30 (d) szimulációs időpontokban (Wirth és Szabó, 2017a)

A 37. ábrán megfigyelhető, hogy a 36. ábrával ellenben két ajtót tartalmaz. A szimulációk során a terem néhány ajtókombinációját megvizsgáltuk, értve itt mindkét ajtó mindkét szárnyának nyitott állapotát, egy ajtó teljesen nyitott állapotát, illetve két ajtó félig nyitott állapotát, valamint egy ajtó félig nyitott állapotát. Az ajtó félig nyitott állapotban 75 centiméter, teljesen nyitott állapotban 1.5 méter széles. A szimulációs eredmények általános jellemzéséhez minden egyes ajtóbeállítást 20-szor szimuláltam, az eredményeket a 38. ábra foglalja össze.



38. ábra: Boxplot ábra a kiürítési időkről a diákok számának függvényében. A nagyobb téglalapok az eredményekben nagyobb szórást jelentenek (Wirth és Szabó, 2017a)

A 38. ábra alapján a kiürítési idő az ajtók beállításától függetlenül lineáris trendet mutat. A jelenség az ajtók fix áteresztő kapacitásából adódik. Látható, hogy a kék és zöld esetekben az összes ajtószélességek bár megegyeznek, a kiürítési időkben mégis eltérések adódnak. A két ajtó egy szárnnyal történő nyitva tartása jobb kiáramlási időket produkál, mint az egy ajtó két szárnyas nyitva tartása. Látható, hogy a szimulációk viszonylag precíz eredményeket adnak, nincs nagy szórás az eredményekben. Hasonló lineáris trendet figyeltek meg az előadótermek kiürítésében Li és Chow (Li és Chow, 2000). Továbbá az is megfigyelhető, hogy az ajtók mindkét szárnyának nyitva tartásával (kék, fekete) a szimulációs eredmények varianciája kisebb, mint a félig nyitott állapotoké. Ebből kifolyólag állítható, hogy szélesebb ajtók használata esetén megbízhatóbb evakuációs idők számíthatók.

Az eredmények szimulációs idejének a másodperc alapú időtől történő eltérése megértésbeli problémákat okozhat. A szimulációk lépésidő mértékegységétől megszabadulhatunk a felhasználók számára könnyen értelmezhető numerikus információs termék, a 7. táblázat elkészítésével. Ha valamelyik paraméter beállítást etalonnak vesszük, arányszámok készíthetők az egyes szcenáriókról (egy/két ajtó, egy/két szárny).

7. táblázat: Etalonnak a 130 fő 2 ajtó, 1 nyitott szárny beállítást vettük. 220 fő 1 ajtó 1 szárnyas kiáramlása ehhez képest 2,5-szer ennyi időbe telik (Wirth és Szabó, 2017a)

Személyek száma	**2 ajtó 2 szárny**	**2 ajtó 1 szárny**	**1 ajtó 2 szárny**	**1 ajtó 1 szárny**
10	0.36	0.36	0.43	0.43
40	0.41	0.45	0.51	0.65
70	0.49	0.63	0.68	0.98
100	0.6	0.81	0.88	1.3
130	0.71	**1**	1.08	1.66
160	0.8	1.17	1.29	1.95
190	0.91	1.38	1.5	2.29
220	1.02	1.52	1.68	2.58

Egy ilyen információs termék hasznos információval szolgálhat valamennyi szereplőnek az evakuáció várható lefolyásáról.

4.3.1 Pánik mérése

A szimuláció során az ágensek rendelkeznek egy olyan rövid távú memóriával, amibe a várakozási idejüket regisztrálni tudták. Ez a számláló alapértelmezetten 0-án áll, egészen addig, amíg az ágens haladni tud. Ha az ágens elakad, akkor minden egyes szimulációs lépésben megnöveljük eggyel ezt a számlálót; egészen addig, amíg újra lépni nem tud – ekkor újra nullázódik. A várakozási idő ilyen jellegű, újszerű mérése minden bizonnyal kapcsolatban áll a tényleges, egyes személyekben kialakuló pánikkal. Abban természetesen egyéb tényezők is szerepelhetnek (pl.: természet, önuralom). A várakozási idők számítása a következő képlettel történt:

$$w(i,t) = \begin{cases} w(i,t-1) + \ 1 \ , ha \ \nexists s \in S \\ 0 \ , ha \ \exists s \in S \end{cases} \\ w(i,0) = 0. \tag{39}$$

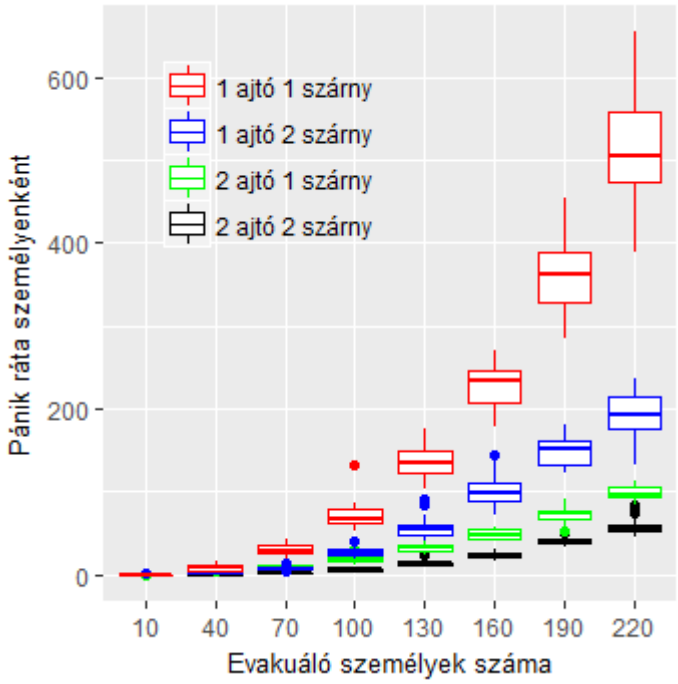
A w függvény növeli az i ágens várakozási idejét, ha nem tud lépni. A várakozás függvény bevezetésével képesek vagyunk pontos időpontok várakozási tulajdonságait megvizsgálni.

A várakozási idők szimulációbeli integrálásával kiszámíthatunk egy pánik rátát (PR), amely jól jellemzi a vizsgált evakuációs szcenáriót a kialakuló pánik vonatkozásában. A pánik rátát a kumulált várakozási idők ágens számmal történő normalizálásával számítottam:

$$PR(a,d) = \frac{\sum_{t=1}^{d} \sum_{i=1}^{a} w(i,t)}{a}, \tag{40}$$

ahol a az evakuáló személyek számát, d pedig a szimuláció hosszát jelenti.

A kialakuló pánik mértékét a különféle ágens létszámok mellett a 39. ábra mutatja:

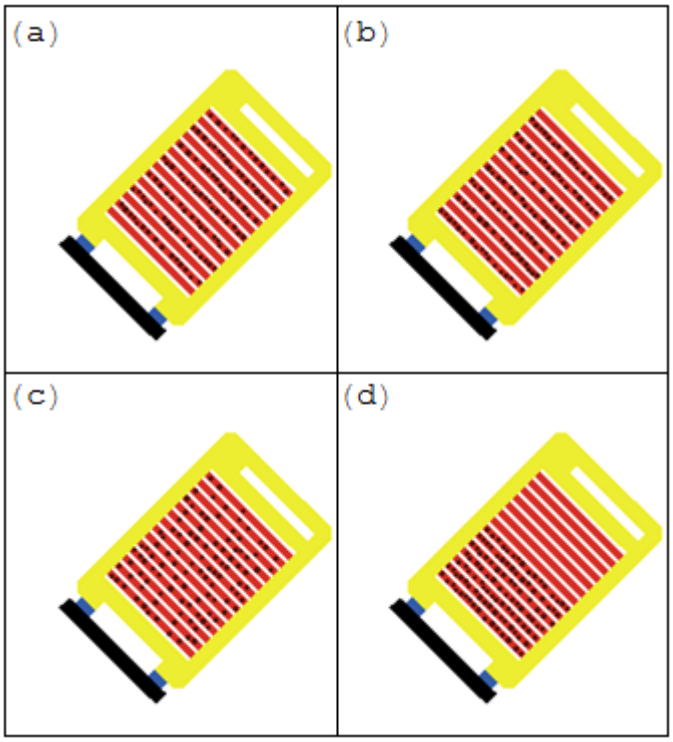


39. ábra: Boxplot ábra a kumulált várakozási időkről
különféle ágenslétszámok mellett (Wirth és Szabó, 2017a)

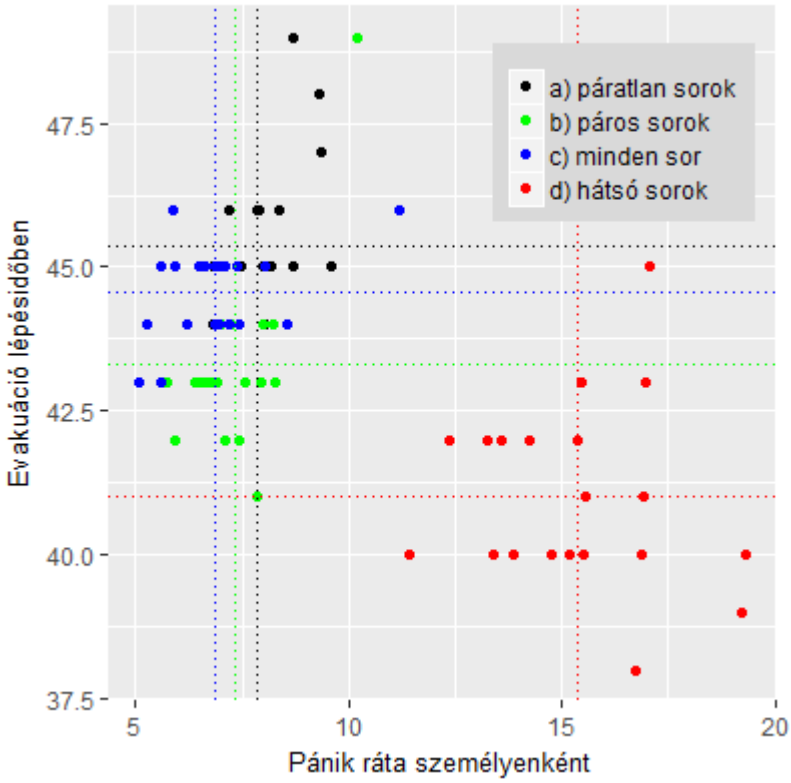
A 39. ábráról leolvasható, hogy a pánik az ágens létszámok növelésének függvényében nemlineáris trendet követ. A teremben 70-es létszám fölött kezdenek kialakulni a forgalmi dugók, kezd megjelenni a pánik. Természetesen a szélesre tárt több ajtó gyorsabb kiáramlást biztosít, ezért ekkor a kialakuló pánik kevésbé jelentékeny. Megfigyelhető, hogy a két ajtó nyitva tartása kisebb pánikot eredményez, valamint nagyobb eltérés mutatkozik a pánikban a 'két ajtó egy szárny' és az 'egy ajtó két szárny' beállítás között, mint ami a szimulációs időkben kimutatható. Tehát az ajtók nyitottságának a száma jelentősebb a pánik szempontjából, mint a szárnyak nyitottságának a száma.

4.3.2 Térszervezési alternatívák

Ebben az alfejezetben különféle ültetéselrendezéseket szimuláltunk, állandó ágenslétszám (110 fő) mellett. Az a) és b) verziókban csak minden második padsort töltöttünk fel diákokkal, a c) opcióban ugyanazt a diákszámot (110 fő) véletlenszerűen szórtuk szét, a d) opcióban pedig csak a hátsó sorokat töltöttük fel:



40. ábra: Négy különféle hallgatóeloszlás az előadóteremben (Wirth és Szabó, 2017a)

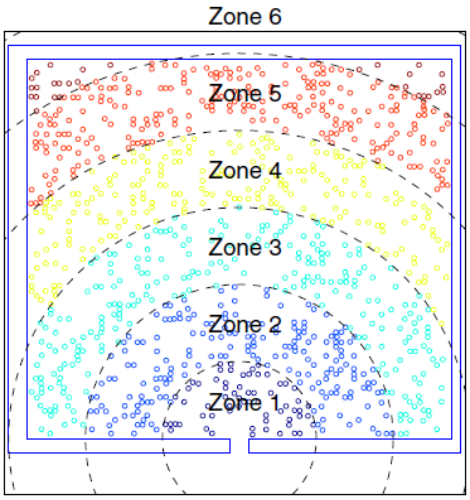


41. ábra: Az ültetéselrendezések hatása a pánik rátára és az evakuációs időre (Wirth és Szabó, 2017a)

Az egyes szcenáriók pontos jellemzése érdekében mindegyik beállítást 20-szor ismételtem meg. A 41. ábra alapján a leggyorsabb kiürítések a hátsó sorok feltöltéséből származnak. Fontos megjegyezni, hogy a kiürítési időkben nincs releváns különbség. A (c) beállítás – egyenletes eloszlás – jár a legkevesebb pánikkal, de hasonlóan kevés pánikkal járnak az (a) és (b) elrendezések is. Jelentős pánikbeli eltérés a (d) beállításnál érzékelhető. Megfigyelhető az is, hogy az evakuálási időre a diákok térbeli eloszlásának középpontja van a legnagyobb hatással. Minél közelebb van a középpont az ajtókhoz, annál kisebb evakuálási időhöz jutunk. Ez a megfigyelés alátámasztható a hátsó sorok legjobb idejével, vagy azzal, hogy az egyenletes eloszlás evakuációs ideje a páros/páratlan sorok evakuációs idei közé esik.

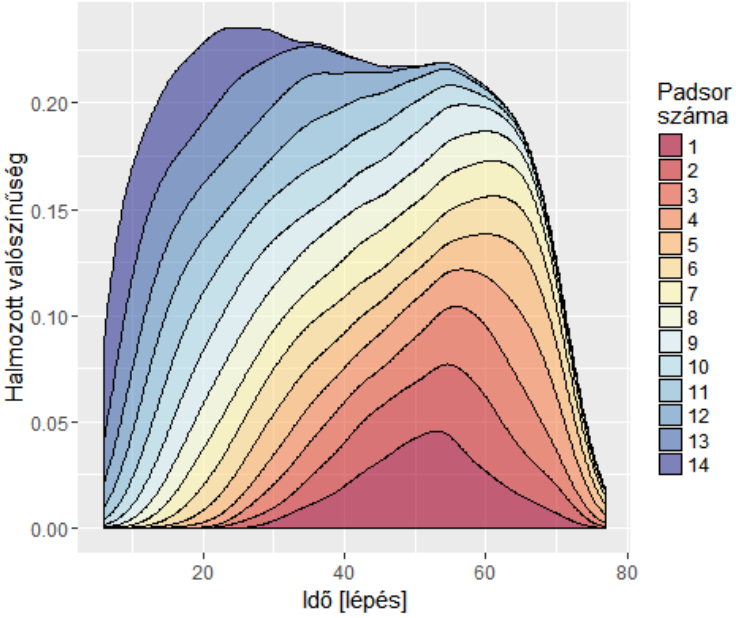
4.3.3 Keveredés vizsgálata

Az ágensekhez hozzárendeltem annak a padsornak az azonosítóját, ahonnan elindulnak. Ezt követően megfigyeltem, hogy kiéréskor ezek az azonosítók milyen sorrendet követnek. Az egyes modellek összehasonlításában Viswanathan és munkatársai arra következtetésre jutottak, hogy a keveredésben figyelhetők meg a legnagyobb modellbeli különbségek (Viswanathan, Lee, Lees, Cheong és Sloot, 2014). A keveredés vizsgálatához a vizsgált ajtóra koncentrikus övezeteket képeztek (5, 10 m), és rögzítették, hogy az ágensek melyik övezetből (zónából) indultak, és milyen eloszlásban értek ki.



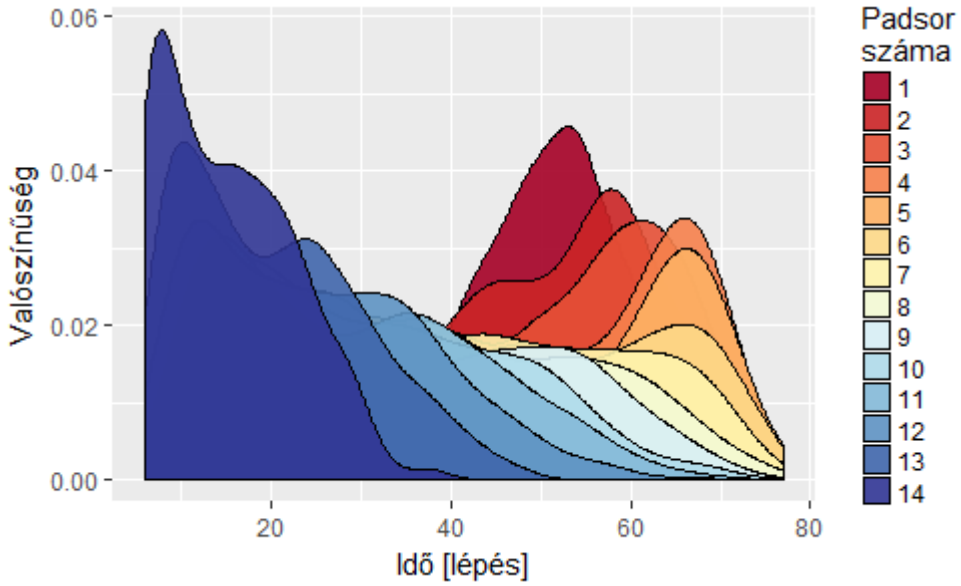
42. ábra: Zóna evakuációs idők számítása
(Viswanathan és mtsai, 2014)

A metrikára a 'zoned evacuation time' jelzőt használták. Ugyanezt a logikát implementáltuk, csak a padsorokra (Wirth és Szabó, 2017a; Wirth és Szabó, 2017b). A szimulációt 220 diákkal, 2 ajtóval és 2-2 szárnnyal hajtottam végre 40-szer. Az eredményeket egy halmozott sűrűségfüggvényen ábrázoltam:



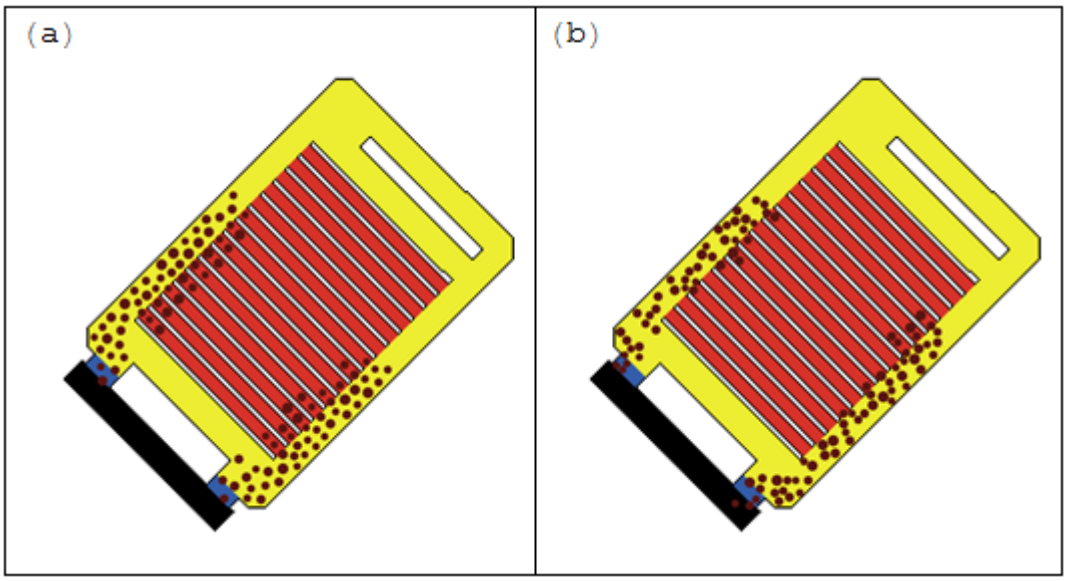
43. ábra: Halmozott sűrűségfüggvény a kiérkezettek sorazonosítóiról SSM modellel
(Wirth és Szabó, 2017a)

A 36. ábra alapján azt gondolnánk, hogy az utolsó diákok az első padsorból érnek ki, és előttük a második padsorból és így tovább. De a 43. ábrán látható eredményekben ez nem így van, legutoljára a középső padsorok diákjai érkeznek ki, ami szintén logikus. Ennek oka az lehet, hogy amíg a hátsó sorok kiürülnek, addig a szélső folyosók feltöltődnek, és a telített folyosóra a középső sorban tartózkodók nehezebben jutnak ki, mint az első sorban lévők, akik szabadon rácsatlakozhatnak a sor végére. A sorok kiürülésének időbeli megoszlása a csúcsok által áttekinthetőbb a 44. ábrán:



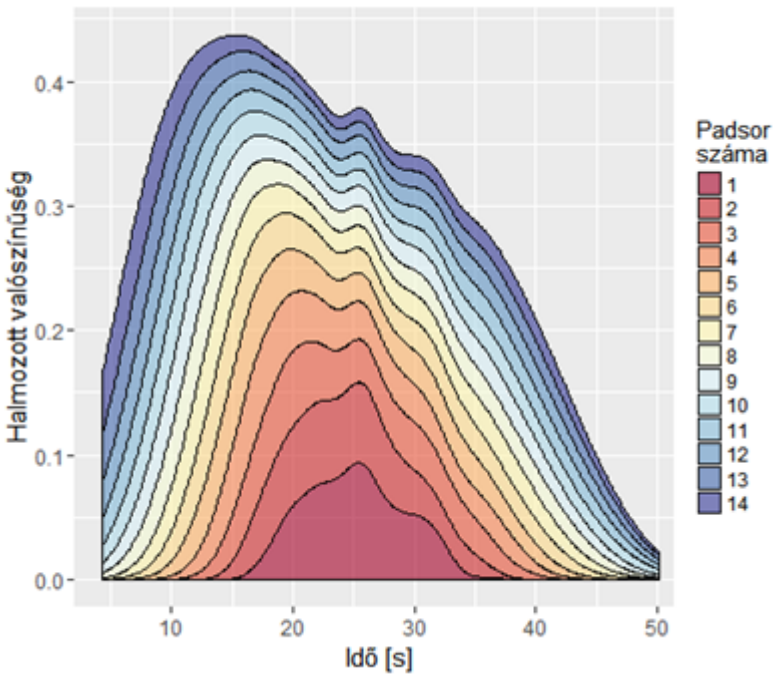
44. ábra: A kiérkezések sűrűségfüggvénye 40 szimulációs lépés alapján (Wirth és Szabó, 2017a). A kiérkezések először a hátsó sorokból, majd az első, végül a középső sorokból történtek. Az első sorok dominanciája a kiáramlás középső szakaszában jelentős keveredést feltételez a mozgási mintákban

A modell validálása érdekében a keveredést érdemes összehasonlítani a népszerű *közösségi erőmodellel* (SFM) ugyanazon feltételek mellett.



45. ábra: Az utoljára kiürülő sorok SFM (a) és SSM (b) modellel (Wirth és Szabó, 2017b). Az SFM nagyon szabályos, egyenletes, míg az SSM töredezettebb mintákat mutat.
Az SFM-nél használt paraméterek:
A: 2000 N, B: 0,08 m, m: 80 kg, k: 120 000 kg*s^{-2},
κ: 240000 kg*m^{-1}*s^{-1}, τ: 0.5 s, v^0: 1 m*s^{-1}
Az SSM-nél használt paraméterek: l = 0,7 m

A *közösségi erőmodell* halmozott sűrűségfüggvényén (46. ábra) látható, hogy nem jelentkezik jelentős keveredés, a csillapodás nagyon egyenletes. A padsorok fokozatosan ürülnek ki, először a legelső padsor (táblához közeli) ürül ki, majd a második padsor, harmadik, és így tovább. Érdekes, hogy a *közösségi erőmodell* használatával azt kapjuk, hogy az első padsor hamarabb kiürül, mint az utolsó, az utolsóban szó szerint "bennragadnak" az emberek. A *közösségi erőmodellben* a folytonosság, és az áramlási erő annyira domináns, hogy a hátsó sorokból nem tudnak "kiugrálni" a diákok (Wirth és Szabó, 2017b).



46. ábra: Az evakuálás halmozott sűrűségfüggvénye az SFM használata esetén 40 realizáció alapján (Wirth és Szabó, 2017b)

Látható, hogy az SFM modell esetén a kiáramlás amplitúdója az első harmadra tehető, és intenzitása onnantól folyamatosan csökken az utolsó kiáramló emberig. Ellenben az SSM esetén az amplitúdó nem olyan markáns, és a kiáramlás csillapodása is mérsékeltebb. A kiáramlás intenzitásának csökkenése az evakuáció vége felé esésszerűen jelentkezik (Wirth és Szabó, 2017b).

4. Tézis

A kifejlesztett *térbeli lépésmodell* megtartja a sejtautomata modellek lépés-szemléletét, azonban ágens-szemlélete és matematikai háttere feloldja azok térbeli korlátait. Különféle példákkal megmutattam, hogy a modell általánosan alkalmazható evakuáció szimulációkhoz.

Tézispontot alátámasztó publikációk:

> Wirth, E., és Szabó, Gy. (2017a). Overlap-avoiding Tickmodel: an Agent- and GIS-Based Method for Evacuation Simulations. Periodica Polytechnica Civil Engineering .
>
> Wirth, E., és Szabó, Gy. (2017b). Evakuációs modellek térszervezési alternatívái. Az Elmélet és a Gyakorlat Találkozása a Térinformatikában VIII. Debrecen: Debreceni Egyetem.

5. Tézis

Zónált evakuálási idők vizsgálatával megmutattam, hogy a diszkrét tér-idő szemléletű *térbeli lépésmodellel* jelentős a keveredés a padsorok kiürülésének sorrendjében, szemben a folytonos tér-idő szemléletű *közösségi erőmodellel*, ahol a padsorok kiürülése szabályszerű.

Tézispontot alátámasztó publikációk:

> Wirth, E., és Szabó, Gy. (2017a). Overlap-avoiding Tickmodel: an Agent- and GIS-Based Method for Evacuation Simulations. Periodica Polytechnica Civil Engineering.
>
> Wirth, E., és Szabó, Gy. (2017b). Evakuációs modellek térszervezési alternatívái. Az Elmélet és a Gyakorlat Találkozása a Térinformatikában VIII. Debrecen: Debreceni Egyetem.

4.4 Valós idejű verzió

Ebben a fejezetben a modell maradék korlátai is feloldásra kerülnek. A bemutatott SSM modell hátránya lehet, hogy a sejtautomata modellekhez hasonlóan az eredményt szimulációs idő (lépés) dimenzióban kapjuk valódi – másodperc alapú – idő helyett. Egy alternatív – de nem túl elegáns – megoldás lehet az egy lépés méretéhez szükséges idő kiszámítása valamilyen átlagos gyalogossebességgel (0,7 m / 1.4 m/s), majd ezzel az aránszámmal váltani lehet a dimenzión.

A modell egy másik vélhető hátránya az, hogy a lépések hívása mindig azonos időpontban történt, míg a valóságban ez nem teljesen így van, valakik előbb, gyorsabban lépnek.

47. ábra: Egy hölgy gyorsulása (Zebela, Ciepka és Reza, 2012).
Látható, hogy a lépés mérete állandó, annak frekvenciája változik

A gyalogosok átlagos gyorsulása 0.2-0.3 g értékre tehető, ami 2-3 m/s^2 gyorsulási tartománynak felel meg. Egy lépéshez közel 0.7 másodperc szükséges, ami lényegében azt jelenti, hogy egy lépés alatt közel 1.5 m/s^2-os gyorsulás valósítható meg. Tehát a gyalogosok kívánt sebessége 1, maximum 2 lépésen belül elérhető. Ezért az ágensekhez kétféle, manőverezési és áramlási sebességet rendeltem.

Az SSM valós idejű modelljébe ágyazott fontos karakterisztikák:

- A gyalogosokhoz egyedi méret, lépésméret, manőverezési/áramlási sebesség, reakcióidő rendelhető.
- Alapvetően a gyalogosok nem "lökdösik" egymást, hanem várakoznak vagy lépnek.
- Amennyiben a gyalogos nem tudja az átlagos lépésméretét tartani, vagy elfordulásra kényszerül, akkor kénytelen lépését manőverező sebességgel megtenni.
- Amennyiben a gyalogos átlagos lépésméretet meghaladó lépésekkel, kis fordulásokkal, jól tud haladni, akkor lépését áramlási sebességgel teszi.
- Ezáltal azok a gyalogosok, akik szabad területre érnek, jobban tudnak haladni.
- Akik elől vannak, gyorsabban haladnak, a szimulációban előbb lépnek. Így feloldódik a szinkronizált lépéshívásból adódó probléma, hogy két szomszédos gyalogos esetén a hátsó előbb is sorra kerülhet, mint az előtte álló.
- Egy adott gyalogos lépéseinek időtartama a szimuláció során változik, függ a változó sebességtől (manőverező/áramlási), és a maximális lépésmérettől (ez utóbbi változatlan). Így a kis és nagy lépések ugyanannyi időbe telnek egy adott sebesség mellett, ugyanis a sebesség változik az aktuális lépésméret függvényében.
- Azonos sebesség mellett a kisebb maximális lépésmérettel rendelkezők nagyobb lépésfrekvenciával rendelkeznek. Azaz a kisebb emberek fürgébben lépnek.

Valamennyi gyalogos rendelkezik:

- mérettel (r sugár);
- maximális lépésméretettel (l);
- sebességgel (v);
- állapottal ($state$);
- lépési időponttal (t_{step});
- reakcióidővel (τ).

A sebességváltás (manőverezési/áramlási) függvényében a lépéstartást és az irány változását vizsgáltam. Ha egy gyalogos nagy lépéseket tud tenni, és utána egy kisebb lépés szükséges, akkor szükségszerű a lassítás.

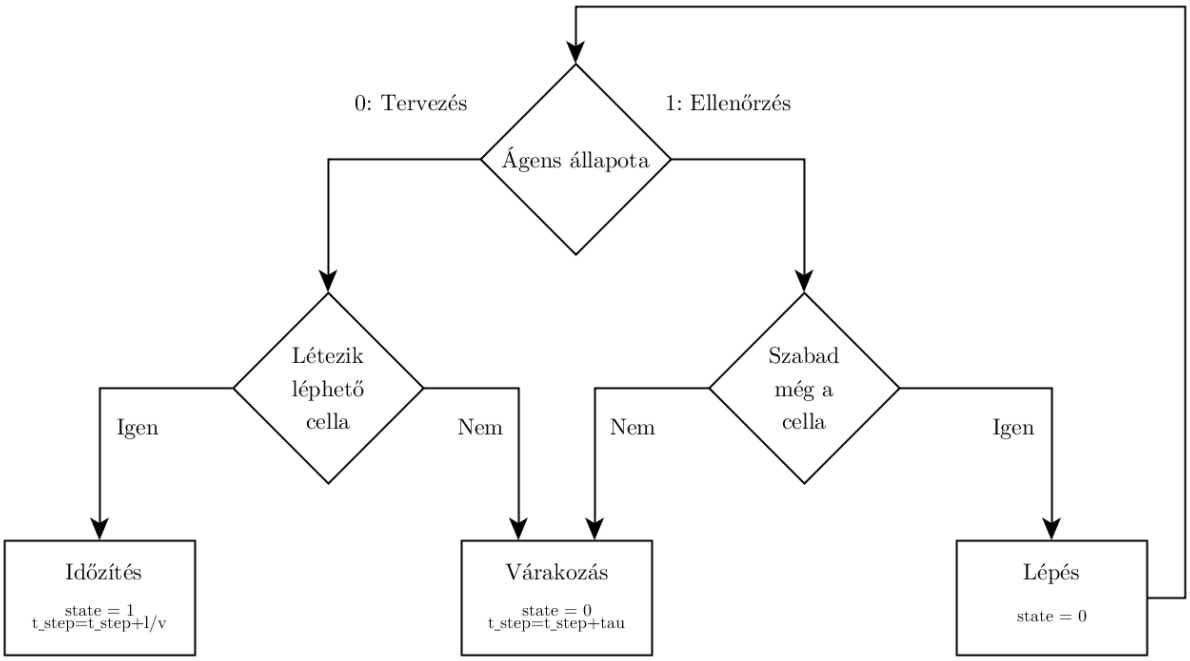
A szimulációhoz bevezetésre került egy idő-számláló, századmásodperc felbontással:

$$\begin{aligned} t &= t + \Delta t \\ \Delta t &= 0.01\ s. \end{aligned} \tag{41}$$

Ezt az időszámlálót (t) folyamatosan növeljük a szimuláció során, és minden egyes századmásodpercnél ellenőrizzük, hogy akkor van-e valamelyik ágensnek a lépési időpontja (t_{step}):

$$t_{step} = t. \tag{42}$$

Valamennyi ágensben a szimuláció kezdetén és a lépési időpontokban a következő eljárást futtatjuk:



48. ábra: A valós idejű SSM modellt vezérlő eljárás folyamatábrája

Az ágensek lépési időpontja alapértelmezetten 0, ami folyamatosan kumulálódik a szimuláció alatt a sebességük függvényében. Ha nem tudnak lépni, vagy valaki elfoglalta a kitervelt helyet, akkor egy reakcióidő elteltével újra megpróbálják megtervezni a lépést. Ha a kitervelt lépési időpontjukban tudnak lépni, akkor rekurzívan egy újabb lépés tervezésébe kezdenek.

A 48. ábrán bemutatott eljárás a következő függvényeket tartalmazza:

- Tervezés
- Időzítés
- Lépés
- Ellenőrzés
- Várakozás

Tervezés

A tervezés során az ágens az SSM matematikai leírásában bemutatott módon kiszámítja, hogy létezik-e olyan cella a környezetében, ahova célszerű lépni. A függvény a (24 - 34) (35 vagy 37) egyenleteket használja.

Időzítés

Amennyiben létezik a navigáció szempontjából optimális cella, az ágens kiszámítja a lépés nagyságát:

$$l_s = \sqrt{(s_x - p(t,i)_x)^2 \ + (s_y - p(t,i)_y)^2}, \tag{43}$$

ahol l_s az optimális cellára történő lépés mérete, ami kisebb vagy megegyezik a maximális l lépésmérettel. Ezt követően kiszámítja l_{avg} átlagos lépésméretét, ami a p_l paraméterrel állítható (alapértelmezetten 80 %):

$$l_{avg} = p_l l. \tag{44}$$

Továbbá szükséges kiszámítani az ágens szögelfordulását ($\Phi_{0,s}$) , ami az előző lépésből megmaradt irány (vagy a kezdeti véletlenszerű irány), és a tervezett s cellára mutató irány által bezárt szög. Az ágens adott lépésbeli sebessége a lépés nagyságától (l_s), az irányeltéréstől ($\Phi_{0,s}$), valamint a paramétereknek ($p_l,\ p_r$) beállított értékektől függ:

$$(l_s \geq l_{avg}) \wedge (\Phi_{0,s} \leq p_r) \rightarrow v = v_{flow};\ v_{control}. \tag{45}$$

Az ágens lépési idejét a következő összefüggés adja:

$$t_{step} = t_{step} + \frac{l}{v}. \tag{46}$$

A képletben l szerepel, ugyanis a lépés nagyságát (l_s) a sebesség számításánál vesszük figyelembe. Valamint a kisebb lépések is hasonló időt igényelnek, mint a nagyobbak. Az időzítés fázisban az "ellenőrzés" állapot beállítása is megtörténik ($state = 1$), ami maga után vonja a lépést a tervezett idő elteltével.

Ellenőrzés

A gyalogos leellenőrzi, hogy az időzítésben megtervezett cella – az esetlegesen belépett gyalogosok miatt – még elérhető-e. A függvény a (28 - 30) egyenleteket használja.

Lépés

Amennyiben az ágens lépésének van optimális helye és már túl van az ellenőrzésen ($state = 1$), akkor áthelyezi magát a tervezett cellára. A lépés után visszaállítja az állapotát ($state = 0$) és újra tervezésbe kezd.

Várakozás

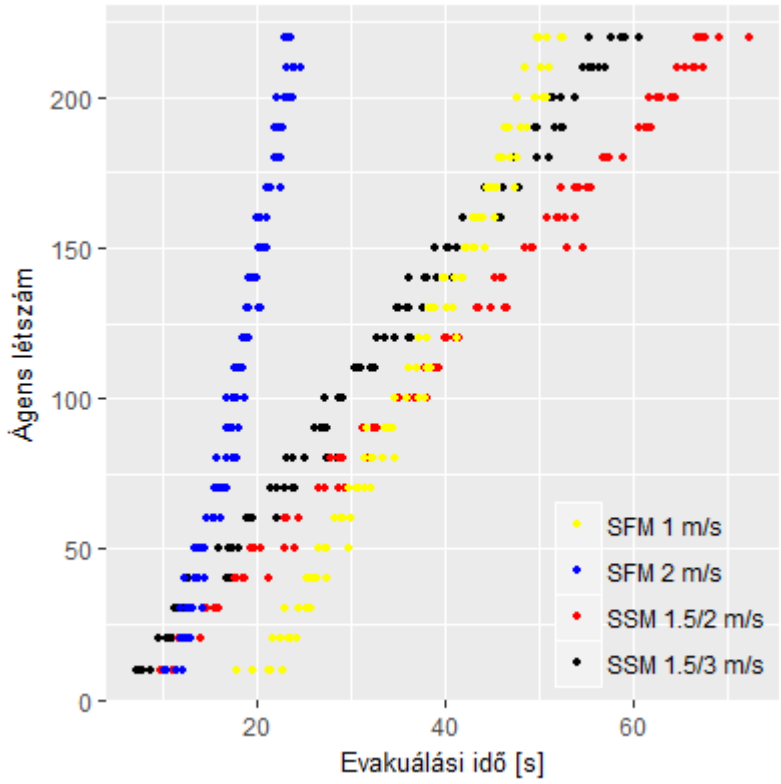
Ha nincs léphető cella, akkor az ágens kénytelen várakozni, és tervezési állapotra vált (vagy abban marad). A lépési ideje τ reakcióidővel módosul:

$$t_{step} = t_{step} + \tau. \tag{47}$$

Alapértelmezettként τ értékéhez 0.25 másodpercet rendelünk.

4.4.1 Paraméterek vizsgálata

A szimuláció során a másodperc alapú verziót az SFM-mel számított kiürítési időkkel hasonlítottam össze:



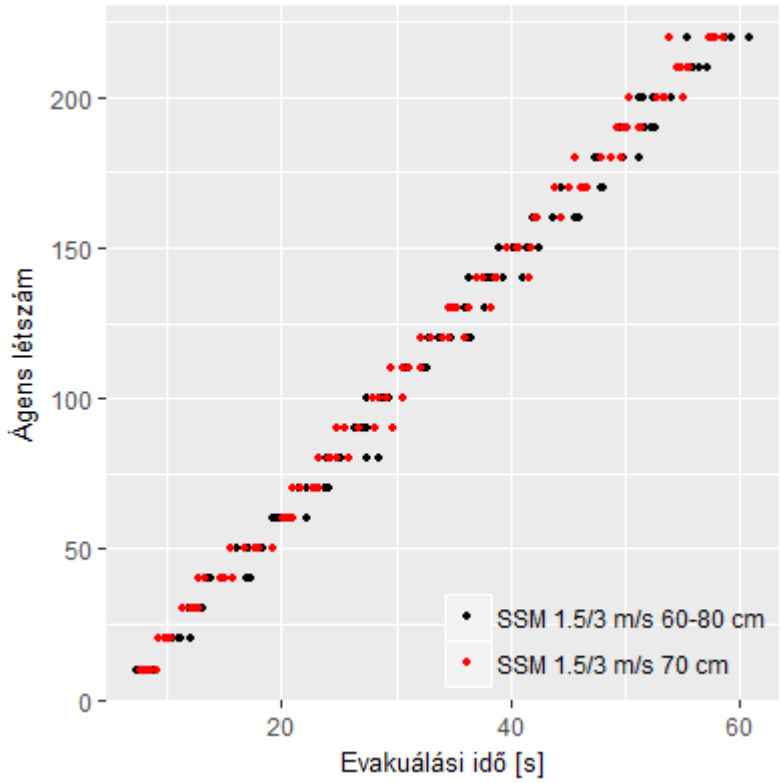
49. ábra: Az SSM és SFM modellekkel számított evakuálási idők másodperc dimenzióban

Az SFM esetén a v^0, az SSM esetén a $v_{control}$, v_{flow} paramétereket változtattam. Mindkét modellel 5-ször hajtottam végre a szimulációt 2 ajtó 2 szárny ajtóbeállítással. A megkötött paraméterek SFM esetén: A: 2000 N, B: 0,08 m, m: 80 kg, k: 120 000 $kg*s^{-2}$, κ: 240000 $kg*m^{-1}*s^{-1}$, τ: 0.5 s, r: 18 - 26 cm SSM esetén: r: 18 - 26 cm, l: 60 - 80 cm, p_r: 40°, p_l: 0.8, $\tau = 0.25$ s.

A 49. ábra megfelelő interpretálásához fontos megjegyezni, hogy az SFM-nél nincs maximális sebesség, a gyalogosok jobban is felgyorsulhatnak a kívánt sebességnél. Az SSM esetén a gyalogosok két eltérő sebességgel haladhatnak. Az SFM folytonossága miatt a gyalogosok nem akadnak el, folyamatosan mozognak, az ábrán megfigyelhető,

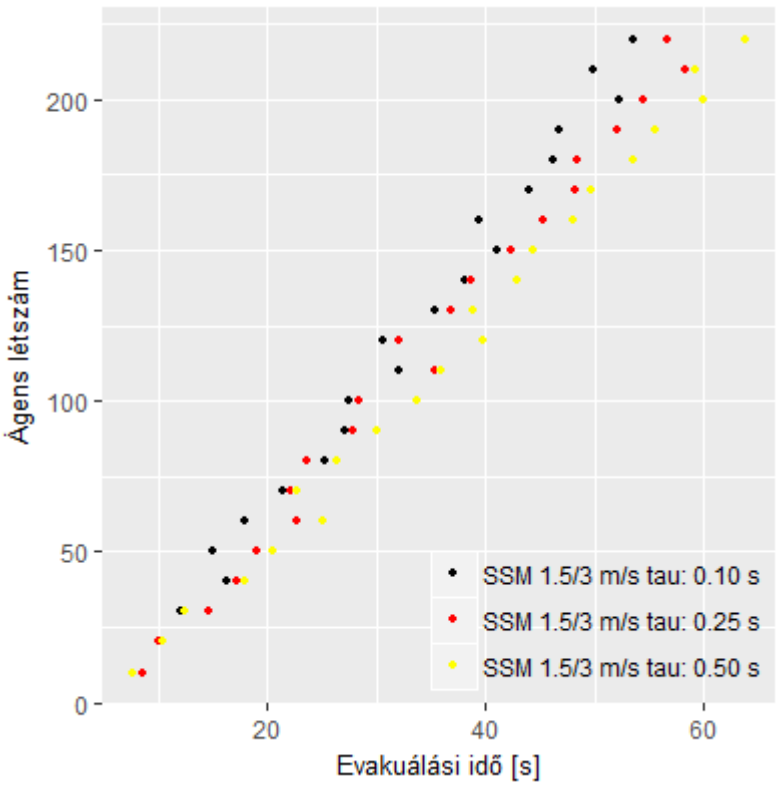
hogy kétszer akkora kívánt sebességgel feleannyi evakuálási időt kapunk az SFM modellel. Ez a végtelen kicsi lépésekben történő folyás miatt lehetséges, a valóságban ez az együttfolyás lehetetlen, az emberek vagy lépnek, vagy nem. És ha valaki nem tud lépni, akkor a mögötte lévők várakoznak.

Szintén megfigyelhető, hogy a lépés természetét megragadó SSM szimulációk és az SFM szimulációk alacsony gyalogos létszám mellett hasonlók. Tehát szabad áramlás mellett a modellek hasonló eredményeket produkálnak.



50. ábra: Evakuációs idők 60-80 cm közötti véletlen lépésméretekkel, illetve 70 cm-es identikus lépésméretekkel.
r: 18 - 26 cm, p_r: 40°, p_l: 0.8, $\tau = 0.25$ s

Az 50. ábrán a megkötött és véletlenszerűen felvett lépésméretekkel végrehajtott szimulációkat hasonlítottam össze. A vizsgált terjedelmen (60 - 80 cm) nem látható a maximális lépésméret varianciája az eredményekben.



51. ábra: A reakcióidők hatásának vizsgálata
megkötött paraméterek mellett:
r: 18 - 26 cm, l: 60 - 80 cm, p_r: 40°, p_l: 0.8

Az 51. ábrán láthatjuk, hogy a kisebb reakcióidők kisebb evakuálási időket eredményeznek. A reakcióidő hatása az evakuáció idejére nagyobb létszámok mellett jelentősebb. Megfigyelhető, hogy 220 fő mellett a 0.50 és a 0.10 másodperces reakcióidejű szimulációk közt közel 10 másodperces különbség van.

5 Összefoglaló

Az értekezés először egy ágens-alapú Monte-Carlo módszert mutat be, amellyel képesek vagyunk a térbeli objektumosztályok kerületének illetve határvonalainak hosszának becslésére. A módszer a vizsgált világot – amely az objektumosztályokat tartalmazza – tórusz-topológiával fűzi össze az élei mentén, így a véletlen bolyongó mintavételezés egyenletes marad. A módszer alkalmazhatóságát a pi (3.14) közelítő értékének kiszámításával mutattam be, egy kör, illetve egy négyzet határvonalán rögzített ágens-áthaladások alapján.

A kifejlesztett tájdiverzitást mérő ágensmodell komplexitásában, összefüggéseiben kezeli a tájelemek változatosságát. A szimulációs módszer általánosan alkalmazható bármilyen osztályozott téradatbázisra; a módszerrel becsült tájdiverzitás potenciál érték jól aggregálja a különféle tájelemek számosságát, szétszórtságát, eloszlását. A módszer könnyen testreszabható és paraméterezhető, képes a legkülönfélébb egyedi szempontok kielégítésére. A tájdiverzitási ágensmodellekkel számított potenciálértékből interpolációval elkészíthető egy terület izopotenciál térképe, potenciál felülete, amely vizuális reprezentációja révén megkönnyítheti a döntéshozók, elemzők munkáját.

Az evakuáció szimuláció témakörben kidolgozott *térbeli lépésmodell* jól ötvözi az ágens-alapú és a sejtautomata modellek karakterisztikáit. A modell megtartja a sejtautomata modellek lépés-orientáltságát, azonban ágens-szemlélete és matematikai háttere feloldja azok topológiai és térbeli korlátait. A kidolgozott ágensmodell a gyalogosok méretének matematikai kezelésével bármilyen – akár nagyon finom – felbontású celluláris térmodellen, raszteren alkalmazható. A sebességek és lépésméretek, reakcióidők bevezetésével a modell alkalmassá válik valós idejű szimulációs eredmények számítására.

1. Tézis

A kifejlesztett *véletlen bolyongó ágensek* rövid távú memóriájuk révén kizárólagosan csak az utoljára észlelt objektumosztályra emlékeznek. Emlékezetük új objektumosztállyal történő frissítéseit Monte-Carlo integrálba gyűjtve, egy referenciaelemmel végzett összehasonlítás segítségével megbecsülhetjük a vizsgált terület objektumainak kerületét, vagy határvonalainak hosszát.

Tézispontot alátámasztó publikációk:
(Wirth, Czinkóczky és Szabó, 2015; Wirth, Szabó és Czinkóczky, 2016b)

2. Tézis

A *véletlen bolyongó ágensek* továbbfejlesztésével létrehozott *felderítő ágensek* céltudatos mozgásuk, látásuk és hosszú távú memóriájuk révén alkalmasak egy vizsgált terület diverzitásának becslésére. Felfedezésük során az új objektumosztályok észleléseit egy Monte-Carlo integrálba gyűjtve a vizsgált terület diverzitási potenciálja becsülhető.

Tézispontot alátámasztó publikációk:
(Wirth, Czinkóczky és Szabó, 2015; Wirth, Szabó és Czinkóczky, 2016a; Wirth, Szabó és Czinkóczky, 2016b)

3. Tézis

Megmutattam, hogy a tájdiverzitási ágensmodellekkel számított potenciálértékek vizuális reprezentálására alkalmas a tájdiverzitás izopotenciál térkép, amelynek alapját a véletlenszerűen mintavételezett világokon végzett mérésekből interpolált izopotenciál vonalak adják.

Tézispontot alátámasztó publikációk:
(Wirth, Czinkóczky és Szabó, 2015; Wirth, Szabó és Czinkóczky, 2016a; Wirth, Szabó és Czinkóczky, 2016b)

4. Tézis

A kifejlesztett *térbeli lépésmodell* megtartja a sejtautomata modellek lépés-szemléletét, azonban ágens-szemlélete és matematikai háttere feloldja azok térbeli korlátait. Különféle példákkal megmutattam, hogy a modell általánosan alkalmazható evakuáció szimulációkhoz.

Tézispontot alátámasztó publikációk:
(Wirth és Szabó, 2017a; Wirth és Szabó, 2017b)

5. Tézis

Zónált evakuálási idők vizsgálatával megmutattam, hogy a diszkrét tér-idő szemléletű *térbeli lépésmodellel* jelentős a keveredés a padsorok kiürülésének sorrendjében, szemben a folytonos tér-idő szemléletű *közösségi erőmodellel*, ahol a padsorok kiürülése szabályszerű.

Tézispontot alátámasztó publikációk:
(Wirth és Szabó, 2017a; Wirth és Szabó, 2017b)

6 Irodalomjegyzék

1. Aitken, R. (1977). *The wilderness areas in Scotland* . University of Aberdeen.

2. Almeida, J. E., Kokkinogenis, Z., és Rossetti, R. J. (2012). NetLogo implementation of an evacuation scenario. *7th Iberian Conference.* Information Systems and Technologies (CISTI).

3. Anders, J., és Kretz, T. (2012). Applied Pedestrian Modelling. In A. J. Heppenstall, A. T. Crooks, L. M. See, és M. Batty, *Agent-Based Models of Geographical Systems* (old.: 451-462). Springer.

4. Axtell, R. L., Epstein, J. M., Dean, J. S., Gumerman, G. J., Swedlund, A. C., Harburger, J., és mtsai. (2002). Population growth and collapse in a multiagent model of the Kayenta Anasazi in Long House Valley. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America , 99* (3).

5. Batty, M. (2007). *Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals.* The MIT Press.

6. Benenson, I., és Torrens, P. (2013). *Geosimulation: Automata-based modeling of urban phenomena.* Wiley.

7. Berger, T. (2001). Agent-based spatial models applied to agriculture: a simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis. *Agricultural Economics , 25.*

8. Blue, V., és Adler, J. (1999). Cellular automata microsimulation of bidirectional pedestrian flows. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (1678).

9. Bonabeau, E. (2002). Agent-based modeling: Methods and techniques for simulating human systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America , 99.*

10. Bossard, M., Feranec, J., és Otahel, J. (2000). CORINE land cover technical guide: Addendum 2000. Copenhagen: European Environment Agency.

11. Brown, D. G., Riolo, R., Robinson, D. T., North, M., és Rand, W. (2005). Spatial process and data models: Toward integration of agent-based models and GIS. *Journal of Geographical Systems , 7* (1).

12. Brown, R. (1828). XXVII. A brief account of microscopical observations made in the months of June, July and August 1827, on the particles contained in the pollen of plants; and on the general existence of active molecules in organic and inorganic bodies. *Philosophical Magazine Series 2 , 4* (21), 161-173.

13. Bura, S., Guérin-Pace, F., Mathian, H., Pumain, D., és Sanders, L. (1996). Multiagent Systems and the Dynamics of a Settlement System. *Geographical Analysis .*

14. Castle, C. J., és Crooks, A. T. (2006). Principles and Concepts of Agent-Based Modelling for Developing Geospatial Simulations. In C. J. Castle, és A. T. Crooks (Szerk.), *Centre for Advanced Spatial Analysis (University College London): Working Paper 110.* London.

15. Chan, A. (2004). *17. Shoulder breadth (bideltoid).* Forrás: Anthropometry Online: http://personal.cityu.edu.hk/~meachan/Online%20Anthropometry/Chapter2/Ch2-17.htm

16. Cooper, C. N. (1988). *From cardinals to chaos: Reflections on the life and legacy of Stanislaw Ulam.* Cambridge University Press.

17. Crooks, A. T., és Heppenstall, A. J. (2012). Introduction to Agent-Based Modelling. In A. J. Heppenstall, A. T. Crooks, L. M. See, és M. Batty, *Agent-Based Models of Geographical Systems.* Springer.

18. Crooks, A. T., Croitoru, A., Lu, X., Wise, S., Irvine, J., és Stefanidis, A. (2015). Walk This Way: Improving Pedestrian Agent-Based Models through Scene Activity Analysis. *ISPRS Int. J. Geo-Information , 4* (3).

19. de Berg, M., Cheong, O., van Kreveld, M., és Overmars, M. (2008). *Computational Geometry: Algorithms and Applications.* Springer.

20. Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik , 1* (1).

21. Einstein, A. (1905). Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der physik , 322* (8), 549-560.

22. Epstein, J. M., és Axtell, R. L. (1996). *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up.* Brookings Institution Press és MIT Press.

23. Evsutin, O., Shelupanov, A., Meshcheryakov, R., Bondarenko, D., és Rashchupkina, A. (2016). The Algorithm of Continuous Optimization Based on the Modified Cellular. *Symmetry , 8* (9).

24. Farmer, J. D., és Foley, D. (2009). The economy needs agent-based modelling. *Nature , 460* (6).

25. Gardner, M. (1970). Mathematical Games - The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game of life. *Scientific American , 223.*

26. Gilbert, N., és Bankes, S. (2002). Platforms and methods for agent-based modeling. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America , 99* (3).

27. Gilbert, N., és Troitzsch, K. G. (1999). *Simulation for the social scientist.* United Kingdom: Open University Press.

28. Grimm, V., Revilla, E., Berger, U., Jeltsch, F., Mooij, W. M., Railsback, S. F., és mtsai. (2005). Pattern-Oriented Modeling of Agent-Based Complex Systems: Lessons from Ecology. *Science 11 , 310* (5750).

29. Gwynne, S., Galea, E. R., Owen, M., Lawrence, P. J., és Filippidis, L. (1999). Gwynne, S., Galea, E. R., Owen, M., Lawrence, P. J., és Filippidis, L. (1999). A review of the methodologies used in the computer simulation of evacuation from the built environment. *Building and environment , 34* (6).

30. Hall, R. W. (1986). Discrete models/continuous models. Omega, 14(3), 213-220.

31. Helbing, D., és Molnár, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E , 51.*

32. Helbing, D., Illés, F. J., Molnár, P., és Vicsek, T. (2002). Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. *Pedestrian and evacuation dynamics , 21* (2).

33. Helbing, D., Illés, F., és Vicsek, T. (2000). Simulating dynamical features of escape panic. *Nature , 407* (6803).

34. Holland, J. H. (1995). *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity.* Helix Books.

35. Huang, C. Y., Sun, C. T., Hsieh, J. L., és Lin, H. (2004). Simulating SARS: Small-World Epidemiological Modeling and Public Health Policy AsseSSMents. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation , 7* (4).

36. Hughes, R. L. (2003). The flow of human crowds. *Annual review of fluid mechanics , 35* (1).

37. Izquierdo, J., Montalvo, I., Pérez, R., és Fuertes, V. S. (2009). Forecasting pedestrian evacuation times by using swarm intelligence. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications , 388* (7).

38. Johnston, K. M. (2013). *Agent analyst, Agent-based modelling in ArcGIS.* United States of America: ESRI Press.

39. Jung, M. (2016). LecoS—A python plugin for automated landscape ecology analysis. *Ecological Informatics , 31*, 18-21.

40. Kaufmann, S. (1995). *At Home in the Universe: The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity.* USA: Oxford University Press.

41. Kennedy, J., és Eberhart, R. (1997). Particle Swarm Optimization. *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks.*

42. Kertész, J., és Vicsek, T. (2006). Komplex hálózatok a természetben és a társadalomban. *Magyar Tudomány , 5.*

43. Khatib, O. (1986). The potential field approach and operational space formulation in robot control. In Narendra, és S. Kumpati, *Adaptive and Learning Systems.* Springer US.

44. Kirchner, A., és Schadschneider, A. (2002). Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics. *Physica A: statistical mechanics and its applications , 321* (1), 260-276.

45. Kisko, T. M., és Francis, R. L. (1985). EVACNET+: A computer program to determine optimal building evacuation plans. *Fire Safety Journal , 9* (2), 211-220.

46. Kohler, T., Gumerman, G. J., és Reynolds, R. G. (2005). Simulating Ancient Societies. *Scientific American , 293.*

47. Langmuir, E. (1984). *Mountaincraft and leadership: a handbook for mountaineers and hillwalking leaders in the British Isles.* Edimburgh: Scottish Sports Council.

48. LeBaron, B. (2002). Short-memory traders and their impact on group learning in financial markets. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America , 99.*

49. Li, J., és Chow, W.-k. (2000). Numerical studies on evacuation pattern in a lecture hall. *Journal of Applied Fire Science .*

50. Longley, P. A., De Smith, M. J., és Goodchild, M. F. (2015). *Geospatial Analysis, Fifth Edition.* United Kingdom: The Winchelsea Press.

51. Macal, C. M., és North, M. J. (2006). Tutorial on agent-based modeling and simulation part 2: How to model with agents. *Winter Simulation Conference.*

52. Macy, M. W., és Willer, R. (2002). From factors to actors: Computational Sociology and Agent-Based Modeling. *Annual Review of Sociology , 28.*

53. McGarigal, K., és Marks, B. J. (1995). *Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure.* US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station: Gen. Tech, Rep. PNW-GTR-351.

54. Mena, C. F., Walsh, J. S., Frizelle, G. B., Xiaozheng, Y., és Malanson, P. G. (2011). Land use change on household farms in the Ecuadorian Amazon: Design and implementation of an agent-based model. *31.*

55. Metropolis, N. (1987). The Beginning of the Monte Carlo Method. *Los Alamos Science* .

56. Meyer-König, T., Klüpfel, H., és Schreckenberg, M. (2002). AsseSSMent and Analysis of Evacuation Processes on Passenger Ships by Microscopic Simulation. In M. Schreckenberg, és S. D. Sharma, *Pedestrian and Evacuation Dynamics.* Springer.

57. Miller, H. J. (2005). A Measurement Theory for Time Geography. *Geographical Analysis , 37* (1).

58. Minar, N., Burkhart, R., Langton, C., és Askenazi, M. (1996). *The Swarm Simulation System: A Toolki for Building Multi-Agent Simulations.* Santa Fe Institute.

59. Moran, P. A. (1950). Notes on continuous stochastic phenomena. *Biometrika , 37* (1/2), 17-23.

60. Neil, J. F. (2009). *Simply complexity: A clear guide to complexity theory.* Oneworld Publications.

61. North, M. J., és Macal, C. M. (2007). *Managing Business Complexity: Discovering Strategic Solutions with Agent-Based Modeling and Simulation.* Oxford University Press.

62. Okazaki, S., és Matsushita, S. (1993). A study of simulation model for pedestrian movement with evacuation and queuing. *271.* International Conference on Engineering for Crowd Safety.

63. Ossimitz, G., és Mrotzek, M. (2008). The basics of system dynamics: discrete vs. continuous modelling of time. In Proceedings of the 26th International Conference of the System Dynamics Society], System Dynamic Society, Wiley-Blackwell (July 2008) (Vol. 72).

64. O'Sullivan, D., és Mordechai, H. (2000). Agent-based models and individualism: is the world agent-based? *Environment and Planning A , 32* (8).

65. Owen, M., Galea, E. R., és Lawrence, P. J. (1996). The EXODUS evacuation model applied to building evacuation scenarios. *Journal of Fire Protection Engineering , 8* (2), 65-84.

66. Parker, D. C., Manson, S. M., Janssen, M. A., Hoffmann, M. J., és Deadman, P. (2003). Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review. *Annals of the Association of American Geographers , 93* (2).

67. Pelechano, N., és Malkawi, A. (2008). Evacuation simulation models: Challenges in modeling high rise building evacuation with cellular automata approaches. *Automation in construction , 17* (4).

68. Peuquet, D. J. (2002). *Representation of Space andTime.* New York: Giulford.

69. Reynolds, C. W. (1987). Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model. *Computer Graphics , 21.*

70. Russell, S., és Norvig, P. (2003). *Artificial Intelligence, A Modern Approach, Second Edition.* United States of America: Prentice Hall.

71. Russell, S., és Norvig, P. (2005). *Mesterséges Intelligencia: Modern megközelítésben, Második, átdolgozott, bővített kiadás.* Budapest: Hungarian Translation Panem.

72. Schelling, T. C. (1971). Dynamic models of segregation. *Journal of Mathematical Sociology , 1* (1).

73. Schelling, T. C. (1978). *Micromotives and Macrobehavior.* W. W. Norton.

74. Schultz, M., Kretz, T., és Fricke, H. (2010). Solving the Direction Field for Discrete Agent Motion. *Conference on Cellular Automata for Research and Industry.* Springer.

75. Seitz, M. J., és Köster, G. (2012). Natural discretization of pedestrian movement in continuous space. *Physical Review E , 86* (4).

76. Shardlow, N. (2017). *Why Agent-Based Modelling?* Forrás: Sandtable: http://www.sandtable.com/why-agent-based-modelling/

77. Siegfried, R. (2014). *Modeling and Simulation of Complex Systems: A Framework for Efficient Agent-Based Modeling and Simulation.* Springer Vieweg.

78. Simpson, E. H. (1949). Measurement of diversity. *Nature , 193* (688).

79. Stahl, F. I. (1982). BFIRES-II: a behavior based computer simulation of emergency egress during fires. *Fire technology , 18* (1).

80. Szabó, S. (2010). A CLC2000 és CL50 adatbázisok összehasonlítása tájmetriai módszerekkel. *Tájökológiai Lapok , 8* (1).

81. Takahashi, K., Tanaka, T., és Kose, S. (1989). An evacuation model for use in fire safety design of buildings. *Fire Safety Science 2*, (old.: 551-560).

82. Tesfatsion, L. (2002). Agent-Based Computational Economics: Growing Economies from the Bottom Up. *Artificial Life , 8* (1).

83. Thompson, P. A., Marchant, E. W. (1994). Simulex; developing new computer modelling techniques for evaluation. *Fire Safety Science 4*, (old.: 613-624).

84. van Dam, K. H., Nikolic, I., és Lukszo, Z. (2013). *Agent-Based Modelling of Socio-Technical Systems.* Springer.

85. Viswanathan, V., Lee, C. E., Lees, M. H., Cheong, S. A., és Sloot, P. M. (2014). Quantitative comparison between crowd models for evacuation planning and evaluation. *The European Physical Journal B* .

86. Waterson, N. P., és Pellissier, E. (2010). *The STEPS pedestrian microsimulation tool-A technical summary.* Croydon, UK: Mott MacDonald Limited.

87. Wirth, E. (2015). *Pi from agent border crossings by NetLogo package.* Wolfram Research, Wolfram Information Center.

88. Wirth, E., és Szabó, Gy. (2017b). Evakuációs modellek térszervezési alternatívái. *Az Elmélet és a Gyakorlat Találkozása a Térinformatikában VIII.* Debrecen: Debreceni Egyetem.

89. Wirth, E., és Szabó, Gy. (2017a). Overlap-avoiding Tickmodel: an Agent-and GIS-Based Method for Evacuation Simulations. *Periodica Polytechnica Civil Engineering* .

90. Wirth, E., Czinkóczky, A., és Szabó, Gy. (2015). Biodiversity estimation by agent logic. *Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában: Térinfomatikai Konferencia és Szakkiállítás VI.* Debrecen: Debreceni Egyetem.

91. Wirth, E., Szabó, Gy., és Czinkóczky, A. (2016b). Measure landscape diversity with logical scout agents. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* .

92. Wirth, E., Szabó, Gy., és Czinkóczky, A. (2016a). Measure of landscape heterogeneity by agent-based methodology. *ISPRS Annals of Photogrammetry* .

93. Wolfram, S. (1984). Universality and complexity in cellular automata. *Physica D: Nonlinear Phenomena , 10* (1-2), 1-35.

94. Zebela, J., Ciepka, P., és Reza, A. (2012). Pedestrian acceleration and speeds. *Problems of Forensic Sciences , 91*, 227-234.

7 Függelék

7.1 Ágens-alapú modell definiálása

Az ágens-alapú modellek készítése bonyolult folyamat, amelyhez a jelenségek elmélyült megértésére van szükség. A következő lépések megfelelő keretet adnak az ágens-modell leírásához (Johnston, 2013):

1. Célok meghatározása
    a) Mi a modell fundamentális kérdése, mire szeretnénk választ adni? (pl. kárpáti hiúz viselkedésének tanulmányozása, pumák és emberek interakciójának minimalizálása)
    b) Hogyan definiáljunk egy sikeres modellt? (pl. a hiúzok a valósághoz hasonlóan viselkedjenek)
    c) Milyen módszerekkel tudjuk mérni a modell sikerességét? (pl. a valóságos környezetbeli és virtuális környezetbeli táplálkozások összehasonlításával)
2. Ágensek definiálásakor az alábbi kérdéseket kell megvizsgálni:
    a) Hogyan reprezentáljuk az ágenseket:
        i. pontokkal;
        ii. poligonnal;
        iii. raszter réteggel;
        iv. hálózattal;
        v. egyéb módon.
    b) Fogunk-e használni eltérő típusú ágenseket a modellben? (pl. a hiúzokat pontszerűen reprezentáljuk, az erdőtüzet pedig raszter réteggel definiáljuk)

c) Hozunk-e létre heterogén csoportokat? (felnőtt hím, felnőtt nőstény, kölyök hiúz)

d) Eltérő modellezési technikákat is implementálunk a modellbe vagy csak ágenseket használjunk? (pl. a hiúzok vadászási szokásai csak a tudásuktól függjön, vagy esetleg szezonális eloszlástérképek alapján történjen)

3. Az ágens csoportok mezőinek, tulajdonságainak definiálásakor az alábbi szempontokat vizsgáljuk:

   a) Milyen tulajdonságokat (mezőket) monitorozzon a döntéshozáshoz? (pl. az energia mező határozza meg a hiúzok éhségét)

   b) Milyen tulajdonságok legyenek hatással a többi ágenssel történő interakciókra?

4. Az ágensek akcióinak definiálásakor a következőket kell megvizsgálni:

   a) Mik az egyes ágensek akciói? (pl.: sétálás, futás, alvás, evés, stb., de a nem akció is akció)

   b) A mozgás is akció lesz-e a modellben?

   c) Milyen hatással lesz az akció a mezőkre? (pl. a futás több energiát fog fogyasztani)

   d) Milyen hatással lesznek az akciók a világra? (pl. a legelés csökkenti a fű mennyiségét az adott cellában)

5. Definiáljuk, hogy mitől függnek az ágensek tudatos, illetve ösztönös döntései:

   a) Az ágens állapotától, ami lehet fizikai vagy mentális vagy bármi egyéb. (pl. mennyire éhes az állat)

   b) Az ágens többi ágenssel történő interakciótól. (pl. az állatok elkerülik a ragadozókat)

   c) A külső világtól:

i. regionális/temporális környezeti faktorok; (pl.: elbújnak a vihar elől, nyáron kevésbé aktívak)

ii. specifikus tájelemi faktor - víz, domborzat, vegetáció; (pl. az állat lassabban megy le a lejtőn)

iii. külső szociális faktorok. (pl. kollektív viselkedésre való hajlam miatt szuboptimális személyes döntés)

d) A memóriájuktól, attól hogy tanulnak-e tapasztalataikból. (pl. utak elkerülése)

6. Definiáljuk, hogy honnan ered az információ az ágensek számára:

a) alaprétegekből, ezek lehetnek GIS raszterek;

b) levezetett rétegekből; (pl. az ágensek mozgása során térkép készíthető az aktuális pozícióikból)

c) regionális karakterisztikákból; (pl. a melegebb átlagos nappali hőmérsékletek is befolyásolhatják a tevékenységüket)

d) egyéb modellekből. (pl. a tűz terjedésének modelljével folyamatosan frissíteni kell a térképet)

7. Definiáljuk a szimulációs idő dimenzióját, mennyi ideig fognak tartani a tevékenységek. A szimulációs idő dimenziója függhet:

a) a jelenség értelmezésétől, mi diktálja a szabályokat;

b) az ágensek döntéshozó folyamatától; (ha az állatok mozgását vizsgáljuk, érdemes lehet 1 perces időközt választani, ha az evolúcióját, akkor mindenképp nagyobb idő dimenzióra van szükség)

c) az ágensek karakterisztikájától; (pl. milyen messzire jut egy epocha alatt az állat)

d) az adatok, téradatok felbontásától. (pl. ha egy 8 kilométeres felbontású rasztert használunk, akkor sokkal nagyobb idő dimenzió szükséges annak megtételére)

8. Határozzuk meg a modell futtatásának időtartamát (egy nap, egy hét, egy év). Az iterációk száma a következőktől függ:
    a) a modellezett jelenségtől;
    b) amit tudunk a jelenségről;
    c) mit szeretnénk a modellel megragadni;
    d) a választott szimulációs időköztől.
9. Határozzuk meg, hogyan verifikáljuk a modellt (belső ellenőrzés):
    a) a tervezési szempontokat kielégítésével;
    b) a programkód, algoritmusok vizsgálatával.
10. Határozzuk meg, hogyan validáljuk a modellt (külső ellenőrzés, certifikáció, akkreditáció)
    a) a kitűzött célok vizsgálatával;
    b) mért adatok felhasználásával;
    c) a jelenségről begyűjtött tudáshalmazzal;
    d) alternatív modellekkel történő összehasonlítással.