

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította

A Matematikai és Physikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

L. évfolyam 10. szám



2000. október

A MENEKÜLÉSI PÁNIK DINAMIKAI TULAJDONSÁGAINAK SZIMULÁCIÓJA

Dirk Helbing, Farkas Illés és Vicsek Tamás

a Nature 2000. szeptember 28-i számában megjelent írása alapján

A kollektív emberi magatartás egyik legkataszrofálibb megjelenési formája az a pánik okozta, tömeges, fejvesztett menekülés, mely gyakran halálos kimenetelű balesetekhez is vezet, minthogy a tömeg embereket nyom össze vagy tipor el. Ezt a viselkedést néha életveszélyes szituációk váltják ki, mint például egy tüzeset egy zsúfolt épületben. Máskor az ülőhelyekért siető emberek között alakul ki ez a pánikszerű rohanás, megint máskor pedig látszólag minden ok nélkül. Bár a mérnökök folyamatosan dolgoznak ki módszereket az efféle szerencsétlenségek mértékének csökkentésére, ahogy a tömeges események száma és mérete egyre nő, ezek gyakorisága is emelkedni látszik. A pánikviselkedéssel szisztematikusan foglalkozó tanulmányokat és az ehhez hasonló tömegmozgások előrejelzésére alkalmas kvantitatív elméleteket mégis ritkán látni. A következőkben a gyalogosviselkedés modelljén keresztül fogjuk vizsgálni a tömegben jelentkező pániknak és a koordinálatlan mozgás előidézte összezsúfolódásnak mechanizmusait (és előfeltételeit). Szimulációnk gyakorlati megoldásokat ajánl a tömeg veszélyes nyomásának megelőzésére. Sőt, mi több, optimális stratégiát találunk a füsttel telt termekből való menekülésre, amely stratégia az egyéni viselkedés és a kollektív „csordaöszön” keverékét veszi alapul.

A pánikot mint a kollektív magatartásnak a megfelelő források hiányában vagy azok fogytán kialakuló, sajátos formáját ezideig elsősorban szociálpszichológiai szempontból vizsgálták. A pánikba eső egyének jellemzően

Dirk Helbing a Drezdai Egyetem Közgazdasági és Közlekedési Intézet, *Farkas Illés* és *Vicsek Tamás* az Eötvös Loránd Egyetem Tudományegyetem Biológiai Fizika Tanszéke munkatársai. Az írást, valamint a folyóirat hozzá tartozó címlapképét a szerzők és a Nature engedélyével közöljük. Fordította *Cziegler István*, ELTE fizikushallgató. További szimulációk és animációk találhatóak <http://angel.elte.hu/~panic> honlapon.

alkalmazkodni képtelen és könyörtelen tömegmagatartást tanúsítanak, mint amilyen az összetorlódás és életveszélyes túlszűföldés. A megfigyelt összetorlódás koordinálatlan mozgás („inkoordináció”) eredménye, és függ az elérni kívánt előny jellegétől.

A menekülési pánik karakterisztikus tulajdonságait a következőképpen összegezzük:

- (1) az emberek jelentősen gyorsabban mozognak vagy próbálnak mozogni a normálisnál;
- (2) lökdösődni kezdenek, így az emberek közti kölcsönhatások fizikai természetűvé válnak;
- (3) egy útszűkületben való mozgás – különösen a keresztülhaladás – koordinálatlanná válik;
- (4) a kijáratoknál ívképződés és elakadás figyelhető meg;
- (5) torlódások alakulnak ki;
- (6) az összezsúfolt tömegben a fizikai kölcsönhatások összeadódnak veszélyes nyomást okozva ezzel, ami elérheti a 4450 Nm^{-1} -t is, amely elég egy acélkorlát elgörbítéséhez vagy egy téglafal ledöntéséhez;
- (7) a menekülést tovább lassítják az elesett vagy sérült személyek, akik akadályt képeznek;
- (8) az emberek hajlandóságot mutatnak a tömegmagatartásra, azaz arra, hogy azt tegyék, amit a többiek;
- (9) a pótkijáratok gyakran vagy elkerülik a menekülő figyelmét, vagy nincsenek megfelelően kihasználva.

Ezek a megfigyelések arra ösztökéltek bennünket, hogy a menekülési pánik társadalmi jelenségét az önjáró sokrészecskes rendszerek mintájára modellezzük. A gyalogos tömegek dinamikáját modellező számítógépes szimulációink egy általánosított erőmodellre épülnek, mely főként a pánik során megfigyelt nyomás fatális következményének leírására alkalmas. Olyan szociopszichológiai és fizikai hatások keverékét vezetjük be, melyek a tö-

megben mutatott viselkedést befolyásolják: N gyalogos minden m_i tömegű i tagja adott \mathbf{v}_i^0 kívánt sebességgel szeretne haladni, adott \mathbf{e}_i^0 irányban, ezért igyekszik ennek megfelelően alakítani valódi \mathbf{v}_i sebességét bizonyos karakterisztikus τ_i idő alatt. Ezzel egyidejűleg sebességfüggő távot próbál tartani a többi j gyalogostól és az F falaktól. Ezt egyenként \mathbf{f}_{ij} és \mathbf{f}_{iF} „kölsönhatási erők” segítségével modellezhetjük. Matematikai megfogalmazásban: a sebesség t idő alatti megváltozását ekkor a gyorsulási egyenlet adja meg

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = m_i \frac{v_i^0(t)\mathbf{e}_i^0(t) - \mathbf{v}_i(t)}{\tau_i} + \sum_{j \neq i} \mathbf{f}_{ij} + \sum_F \mathbf{f}_{iF} \quad (1)$$

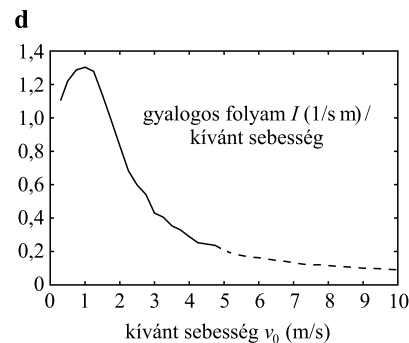
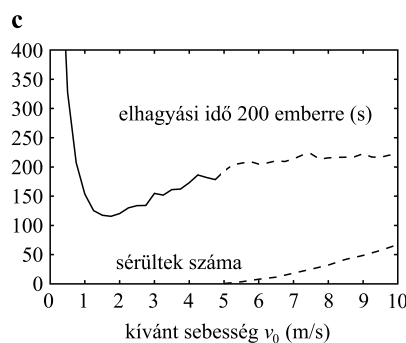
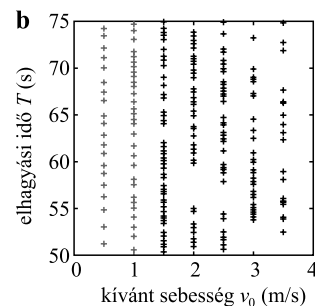
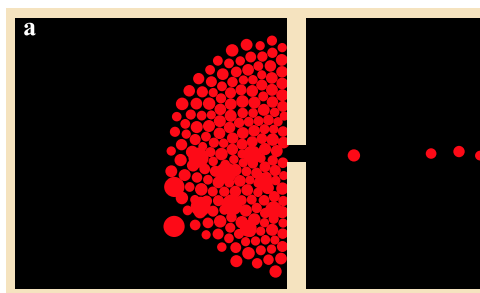
miközben az $\mathbf{r}_i(t)$ elmozdulást a sebesség adja meg $\mathbf{v}_i(t) = d\mathbf{r}_i/dt$.

Két gyalogos, i és j azon pszichológiai tendenciáját, hogy igyekezzen egymástól távol maradni, egy $A_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/B_i] \mathbf{n}_{ij}$ taszító kölsönhatási erővel írjuk le, ahol A_i és B_i konstans. $d_{ij} = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$ jelöli a gyalogosok tömegközéppontjai közötti távolságot, $\mathbf{n}_{ij} = (n_{ij}^1, n_{ij}^2) = (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)/d_{ij}$ pedig a j -ből i -be mutató egységvektor. A gyalogosok akkor érnek egymáshoz, ha d_{ij} távolságuk kisebb, mint az r_i és r_j sugarak $r_{ij} = (r_i + r_j)$ összege. Ez esetben bevezetünk további két erőt a szemcsés rendszerek kölsönhatásainak mintájára, amelyek elengedhetetlenek a pánikoló tömegben mutatkozó sajátos jelenségek megértéséhez: egy $k(r_{ij} - d_{ij}) \mathbf{n}_{ij}$ „térfogati erőt”, ami a testkompresszió ellen hat és egy $\kappa(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ij}^t \mathbf{t}_{ij}$ „csúsztási súrlódást”, ami a relatív tangenciális mozgást akadályozza, ha az i gyalogos közel kerül j -hez. Itt $\mathbf{t}_{ij} = (-n_{ij}^2, n_{ij}^1)$ jelöli a tangenciális irányt $\Delta v_{ij}^t = (\mathbf{v}_j - \mathbf{v}_i) \cdot \mathbf{t}_{ij}$ pedig a tangenciális sebességkülönbséget, míg k és κ nagy konstansokat jelöl. Összegezve az

$$\mathbf{f}_{ij} = \left\{ A_i \exp[(r_{ij} - d_{ij})/B_i] + kg(r_{ij} - d_{ij}) \right\} \mathbf{n}_{ij} + \kappa g(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ij}^t \mathbf{t}_{ij} \quad (2)$$

egyenlethez jutunk, ahol a $g(x)$ függvény zérus, ha a gyalogosok nem érnek egymáshoz ($d_{ij} > r_{ij}$), máskülönben egyenlő az x argumentummal.

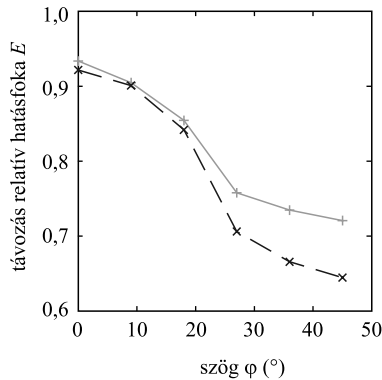
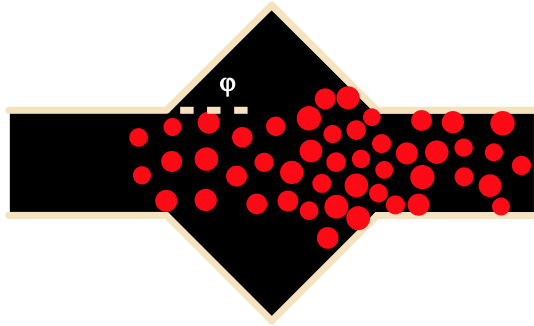
Ezzel analóg módon kezeljük a falakkal történő kölsönhatást, azaz ha d_{iF} jelöli az F faltól való távolságot, \mathbf{n}_{iF} jelöli a rá merőleges irányt, és \mathbf{t}_{iF} a tangenciális, akkor a megfelelő kölsönhatási erőt a fallal a következő egyenlet adja meg



1. ábra. Egy 15 m × 15 m-es terem 1 m szélességű ajtaja felé haladó azonos $v_i^0 = v_0$ kívánt sebességű gyalogosok szimulációja. a) Pillanatkép a szimulációból. A dinamikus szimulációk elérhetőek a <http://angel.elte.hu/~panic/> webcímen. b) A terem elhagyásának ideje különböző v_0 kívánt sebességű gyalogosokra. Nagy kívánt sebességeknél ($v_0 \geq 1,5 \text{ m s}^{-1}$, fekete kereszt) megfigyelhető az elzáródásból fakadó szabálytalan kiáramlás. c) Normális járás esetén a terem elhagyásához 200 ember számára szükséges idő v_0 növekedésével csökken. Az $1,5 \text{ m s}^{-1}$ -nél nagyobb kívánt sebességek redukálják a távozás hatásfokát. Ez akkor válik különösen világossá, ha az I kiáramlást osztjuk a kívánt sebességgel (d). Ez a tokolodásnak köszönhető, ami járulékos sűrűlási erőkhez vezet. Ezenkívül egy körülbelül 5 m s^{-1} -os kívánt sebesség felett (a c és d ábrán a szaggatott vonal) emberek sérülnek meg, és mozdulatlan akadályt jelentenek társaiknak, amennyiben a rájuk ható radiális erők nagyságainak összege a kerületükkel osztva meghaladja az 1600 N m^{-1} nyomást. A fenti „a gyorsabb a lassabb” jelenség következtében a pánikot a gyalogosok ellenárama válthatja ki, mivel az a távozni szándékozó tömeg késlekedését okozza. Ettől a feltartott gyalogosok ugyanis elvesztik a türelmüket, és tokolodni kezdenek, amit úgy írhatunk le, mint a kívánt sebesség megemelését $v_i^0(t) = [1 - p_i(t)] v_i^0(0) + p_i(t) v_i^{\max}$ szerint, ahol $v_i^0(0)$ a kezdeti, v_i^{\max} pedig a maximális kívánt sebesség. Az időfüggő $p_i(t) = 1 - 0 \langle v_i(t) \rangle / v_i^0$ paraméter (ahol $\langle v_i(t) \rangle$ a kívánt irányú átlagsebességet jelöli) a türelmetlenség mértéke. Mindent összevéve a hosszú várakozási idő emeli a kívánt sebességet, s ez elégtelen kiáramláshoz vezethet. Ez tovább növeli a várakozási időt, és így tovább, így ez a tragikus visszacsatolás végeredményben pánikot válthat ki. Ez tehát arra kényszerít bennünket, hogy elegendően széles kijáratokat használjunk, és megakadályozzuk az ellenáramot nagy tömegek távozásakor.

$$\mathbf{f}_{iF} = \left\{ A_i \exp[(r_i - d_{iF})/B_i] + kg(r_i - d_{iF}) \right\} \mathbf{n}_{iF} - \kappa g(r_i - d_{iF}) (\mathbf{v}_i \cdot \mathbf{t}_{iF}) \mathbf{t}_{iF} \quad (3)$$

Valószínűleg annak következtében, hogy a menekülési pánik váratlan és veszélyes esemény, ami kizárja az in vivo kísérletet, nem találtunk modellünk kvantitatív ellenőrzéséhez alkalmas adatokat. Ez az adathiány megköveteli a megbízható modellt. A paramétereket ezért a következőképpen határoztuk meg: $m = 80 \text{ kg}$ tömeggel reprezentálunk egy átlagos focirajongót. A v_i^0 kívánt sebesség meghaladhatja az 5 m s^{-1} -ot (egész 10 m s^{-1} -ig), de egy szoba elhagyásakor megfigyelt szabad sebességek nyugodt körülmények között $v_i^0 \sim 0,6 \text{ m s}^{-1}$, normális helyzetben $v_i^0 \sim 1 \text{ m s}^{-1}$, ideges állapotban pedig $v_i^0 \sim 1,5 \text{ m s}^{-1}$ szerint alakul. A gyorsulás idejére elfogadható becslés a $\tau_i = 0,5 \text{ s}$. $A_i = 2 \times 10^3 \text{ N}$ és $B_i = 0,08 \text{ m}$ mellett reprodukálhatjuk a normális kívánt sebességeknél tartott távolságot és illeszthetjük adatainkat a mért áram-



2. ábra. Kiszélesedő menekülési útvonal szimulációja. a) Pillanatkép a szimulációból $v_i^0 = v_0 = 2 \text{ m s}^{-1}$ -mal. (<http://angel.elte.hu/~panic>) A folyosó 3 m széles és 15 m hosszú, a közepén lévő háromszögletű darabok területe $2 \times 3 \text{ m} = 6 \text{ m}^2$. A gyalogosok bal kéz felől érkeznek a szimulációs területre $I = 5,5 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ beáramlással, és jobbra menekülnek. b) A távozás határfoka a középső terület szélességét, vagyis az egyenes folyosótól való eltérést jellemző ϕ szög függvényében. Az $E = \langle \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{e}_i \rangle / v_0$ relatív határfok a folyosón való átlagssebességet méri a kívánt sebességhez képest, és 0 és 1 között van (folytonos vonal). Míg egyenes folyosó esetében ($\phi = 0$) csaknem 1 (azaz maximális), addig a körülbelül 20%-ot zuhan a határfok, ha a folyosó kiszélesedik. Ez érthető, ha számításba vesszük, hogy a kiszélesedés zavarosságához vezet azok közt, akik kiválnak a széles részben taszító kölcsönhatásuk miatt, vagy megpróbálják megelőzni egymást, és visszapréselődni a főáramba a kiszélesedés végénél. Ennél fogva az ábrázolt folyosó jobb oldala útszűkületként viselkedik és torlódáshoz vezet. Az E határfok lezuhanása még kifejezettebb (1) a kiszélesedő területnek abban a részében, ahol a gyalogosáram a legszabálytalanabb, (2) ha a folyosó keskeny, (3) ha a gyalogosoknak különböző vagy magas a kívánt sebessége, és (4), ha a gyalogossűrűség nagyobb a folyosón.

láshoz egy útszűkületben, ami annyi mint 0,73 személy másodpercenként egy 1 m nyílásszélességű ajtón $v_i^0 \sim 0,8 \text{ m s}^{-1}$ feltétel mellett. A $k = 1,2 \times 10^3 \text{ kg s}^{-2}$ és a $\kappa = 2,4 \times 10^5 \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ paraméter határozza meg az eltömődési effektust fizikai kölcsönhatások esetén. Bár a valóságban a legtöbb paraméter egyénről egyénre változik, minden gyalogosra azonos értékeket választottunk, hogy a kalibrálás és a hibátűrés érdekében minimalizáljuk a paraméterek számát, és hogy kizárjuk a paraméterek variációja miatt adódó természetellenes kiáramlást. Mindamellett ahhoz, hogy elkerüljük a modelltől származó műtermékeket (a szimmetrikus konfigurációk pontosan kiegyensúlyozott erői miatti darabosságot), egy kis mértékű – egyébként majdnem önkényes – egyenetlenségre van szükség. Ezt az egyenetlenséget a gyalogosok $2r_i$ átmérőjének a $[0,5 \text{ m}; 0,7 \text{ m}]$ intervallumon való egyenletes elosztásával vezettük be, ami közelítőleg a focirajongók vállszélességének eloszlása.

A fenti feltevésekkel élve a modellben most a menekülési pánik számos fontos jelenségét fogjuk szimulálni, melyek a paraméterek kis változásaira érzéketlenek, de szerencsére kevésbé kifejezetten lesznek széles kijáratoknál.

(1) Koordinátatlanság kialakulása elakadás miatt. A teremből való szimulált kiáramlás jól koordinált és szabályszerű, amennyiben a $v_i^0 = v_0$ kívánt sebességek normálisak. Ám ha a kívánt sebesség $1,5 \text{ m s}^{-1}$ felett van, azaz siető emberek esetében, a kijárat ívszerű eltorlaszolásának és az ív megtörésekor a termet elhagyó gyalogosok lavinaszerű csoportjainak irreguláris sorozatát tapasztaljuk (1.a, b. ábra). Ez a jelenség összeegyeztethető a fent említett empirikus megfigyelésekkel, és a szemcsés áramlások tölcseren vagy öntőgaraton megfigyelhető szakaszos eltömődéséhez hasonlítható. (Mindenesetre megjegyezzük, hogy az efféle eltömődést a részecskék statikus sűrűlódásának tulajdoníthatjuk távoli kölcsönhatások feltételezése nélkül, illetve, hogy inkább az elég kicsi nyílások esetén figyeltek meg ilyen eltömődést, mint a hajtóerő variációjának okán.)

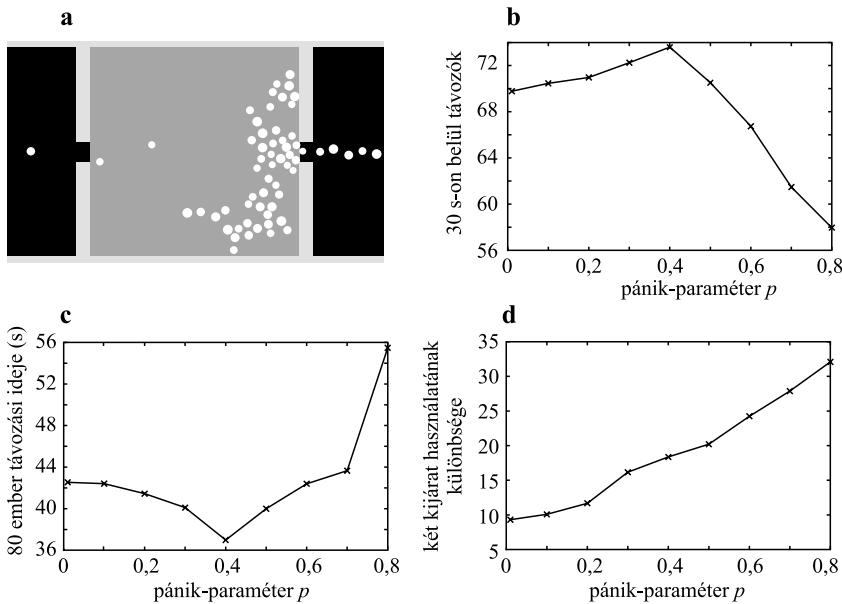
(2) A türelmetlenségből eredő „a gyors a lassabb jelenség”. Mivel az eltömődéshez késlekedés társul, az, hogy az egyének gyorsabban igyekeznek mozogni (azaz emelni v_i^0 -t), lelassíthatja a terem elhagyásának átlagos sebességét, amennyiben a κ sűrűlódási paraméter elég nagy (1.c, d. ábra). Ez az effektus különösen tűz jelenlétében végzetes, miután a menekülő emberek a saját túlélési esélyeiket csökkentik. Az e miatti haláleseteket a tűz frontja által elért gyalogosok számával becsülhetjük (<http://angel.elte.hu/~panic/>).

Mivel a sűrűlódási tényezőknek a tömegben átlagosan semmiféle fékező hatása nincsen, ha a falak elegendően messze vannak, az eltömődési effektus mélyén lévő ívképződés két effektust követel meg: egyrészt egy útszűkület – például egy ajtó – okozta lassulást, másrészt erős személyek közti sűrűlódást, mely akkor válik dominánssá, mikor a gyalogosok túlságosan közel kerülnek egymáshoz. Következésképp az eltömődés veszélye minimálisra csökkenthető az útszűkületek kerülésével a stadionok és más nyilvános épületek tervezésekor. Azt viszont meg kell jegyeznünk, hogy a torlódás a menekülési útvonalak kiszélesedésénél is bekövetkezhet. Ezt a meglepő eredményt illusztrálja a 2. ábra. A kiáramlást javíthatjuk a kijáratok előtt aszimmetrikusan elhelyezett oszlopok segítségével, amelyek a végzetes nyomás kialakulását is megakadályozzák (<http://angel.elte.hu/~panic/>).

(3) Tömegmagatartás. Olyan szituációt fogunk vizsgálni, melyben a gyalogosok egy füsttel telített szobát próbálnak elhagyni, de ehhez előbb rá kell találniuk az egyik rejtett kijáratot (3. ábra). Minden egyes i gyalogos választhat egyéni \mathbf{e}_i irányt vagy követheti adott R_i sugáron belüli j szomszédjainak átlagos $\langle \mathbf{e}_j^0(t) \rangle$ irányát, vagy megpróbálkozhat e kettő keverékével. Feltesszük, hogy mindkét lehetőség szerepel valamilyen p_i paraméterrel súlyozva

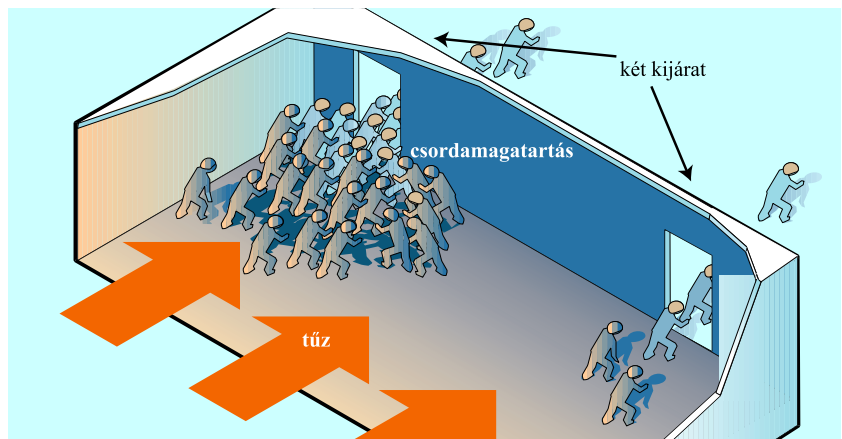
$$\mathbf{e}_i^0 = \text{Norm} \left[(1 - p_i) \mathbf{e}_i + p_i \langle \mathbf{e}_j^0(t) \rangle \right], \quad (4)$$

ahol $\text{Norm}(\mathbf{z}) = \mathbf{z} / \|\mathbf{z}\|$ a \mathbf{z} vektor egységvektorát jelenti. Ebből következik, hogy egyéni cselekvést kapunk, ha p_i kicsi, de csordamagatartást, ha p_i nagy. Ezért p_i az i egyén pánikállapotának mértékét tükrözi.



3. ábra. Egy $A = 15 \text{ m} \times 15 \text{ m}$ (szürkével) területű füstös teremből két $1,5 \text{ m}$ széles láthatatlan ajtón menekülni próbáló $N = 90$ gyalogos szimulációja. Ezeket az ajtókat az egyéni cselekvés és a csoportos viselkedés keverékével kell megtalálni. (A dinamikus szimulációk elérhetők a <http://angel.elte.hu/~panic/> webcímen.) a) Pillanatkép a szimulációból $v_i^0 = v_0 = 5 \text{ m s}^{-1}$ -mal. Kezdetben minden egyes gyalogos véletlenszerűen választja saját kívánt sebességét és irányát. Később az egyes gyalogosok mozgásának irányát befolyásolja egy adott sugáron belül lévő szomszédok átlagos iránya, például $R_i = R = 5 \text{ m}$. Ennek a csoportba verődési effektusnak az erőssége egyre nő a növekvő $p_i = p$ pánik-paraméterrel és a növekvő $b = \pi R^2 \rho$, ahol $\rho = N/A$ a gyalogossűrűséget jelenti. Egy-egy határ elérése a gyalogos irányának visszaverődését eredményezi. Ha az egyik kijárat 2 m -nél közelebb van, az illető elhagyja a termet. b) A 30 s alatt megmenekülők száma a p paraméter függvényében. c) 80 személynek egy füstös szobából való kimeneküléséhez szükséges idő. Ha a kijáratok viszonylag keskenyek, és a pánik-paraméter kicsi vagy nagy, a távozás különösen sokáig tart, így csak néhány ember menekül meg a füstmérgezésből. Eredményeink azt sugallják, hogy a legjobb menekülési stratégia bizonyos kompromisszum a többiek követése, és az egyéni keresés között. Ez jól megfér a csoportos problémák megoldásának hatásfokával kapcsolatos kísérleti adatokkal, miszerint a csoportok általában jobban teljesítenek az egyes embereknél, de a tömegek rossz hatásfokúak az összetett problémák megoldását illetően. d) Az N_1 és N_2 értékeknek (a jobb-, illetve a baloldalon távozó emberek számának) $|N_1 - N_2|$ abszolút differenciája a pánik-paraméter függvényében. Azt látjuk, hogy ha a pánik-paraméter nagy, a gyalogosok hajlamosak az egyik kijáratnál összehúzóulni.

Modellünk azt sugallja, hogy sem az egyéni cselekvés, sem a csordamagatartás nem hatékony (3.b ábra). A tisztán egyéni viselkedés azt jelenti, hogy mindenki csak véletlenszerűen talál kijáratot, míg a tisztán csordamagatartás oda vezet, hogy végül is az egész tömeg ugyanabban a – valószínűleg elzáródott – irányban halad, így aztán nem használják ki hatékonyan a rendelkezésre álló kijáratokat (3.d ábra), ami egyezik a megfigyelésekkel. Ahogy azt a 3.b és 3.c ábra mutatja, az optimális túlélési esélyt az egyéni és a csordamagatartás olyan keverékénél várjuk, ahol az individualizmus lehetővé teszi, hogy néhányan rátaláljanak a kijáratokra, a csoportba verődés pedig garantálja, hogy a többiek kövessék a sikeres megoldást. Ha a gyalogosok követik a falakat, ahelyett, hogy „visszaverődnének” róluk, azt várhatjuk, hogy a tömeg követése szintén torlódást okoz, és megint csak az ajtók rossz kihasználását (1. ábra), az ellenkező irányban haladó egyéni mozgásuk pedig egymást akadályozzák.



Folytonos gyalogosmodellünk plauzibilis kölcsönhatásokon alapszik, és egyszerűsége miatt igen erős a paraméterek variációjára való tekintettel. Épp ezért alkalmas arra, hogy következtetéseket vonjunk le belőle a menekülési pánik mélyén rejlő, lehetséges mechanizmusokra vonatkozóan (vagyis a kívánt sebesség emelését, a fizikai kölcsönhatások során jelentkező erős sűrűdési hatásokat és a csoportba verődést illetően). Miután a modell paramétereit a gyalogosok áramlására vonatkozó adatokhoz kalibráltuk, számos megfigyelt jelenséget reprodukáltunk. Modellünket épületek alkalmassági vizsgálatára lehetne fölhasználni aszerint, hogy azok hogyan viselkednek vészhelyzetben. A modell ezenfelül egyetlen $p_i = p$ paraméter változtatásának segítségével számol a normális és a pánikszerű helyzetek különböző dinamikájával is.

Jelenleg kiegészítő adatokra és további videóanyagokra van szükségünk a menekülési pánikról, hogy modellünket mennyiségileg ellenőrizhessük, és alternatív modellekkel vethessük össze. Ezek a modellek figyelembe vehetik például a személyek közti irány- és sebességfüggő kölcsönhatásokat, részletezhetik a paraméterek egyéni variációját, tanulmányozhatják a fluktuáció hatását, figyelembe vehetik a földre hulló embereket, beépíthetik a szóbeli információcserét, összetettebb stratégiát, illetve bonyolultabb kölcsönhatásokat vihetnek végig (akár háromdimenziósakat), vagy megengedhetik a stratégiák közötti váltogatást. Az elmélet fejlesztésének három útja van. A magasabb rendű elmélet vagy kevesebb paraméterrel tudja épp ilyen jól reprodukálni a vizsgálati eredményeket, vagy azonos számú paraméter mellett magasabb fokú egyezést ér el az adatokkal, vagy további megfigyeléseket reprodukál majd.