

OTDK-dolgozat

2023

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM
KÖZGAZDASÁGTUDOMÁNYI KAR



PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM
Közgazdaságtudományi Kar

**A JUTALMAZÁS RÖVID ÉS HOSSZÚ TÁVÚ HATÁSA AZ
EGYÜTTMŰKÖDÉSRE**

**THE SHORT- AND LONG-TERM IMPACT OF REWARD ON
COOPERATION**

Braun Emese

Konzulens: Dr. Sebestyén Tamás

Kézirat lezárásának dátuma: 2022.11.20.



Az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-22-2-I kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	1
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	4
2. 1. KERETRENDSZER	4
2. 2. KORÁBBI EREDMÉNYEK	5
2. 3. A DOLGOZAT ELHELYEZÉSE A SZAKIRODALOMBAN	11
3. MÓDSZERTAN	13
3. 1. HÁLÓZATI SZERKEZET	13
3. 2. FOGOLYDILEMMA JÁTÉK	14
4. EREDMÉNYEK.....	20
4. 1. AZ EGYENSÚLY KIALAKULÁSA	20
4. 2. A HÁTTÉRBE LEJÁTSZÓDÓ FOLYAMATOK	22
4. 2. 1. <i>A jutalmazás előtti 1. szakasz</i>	23
4. 2. 2. <i>A jutalmazás melletti 2. szakasz</i>	25
4. 2. 3. <i>A jutalom kivezetését követő 3. szakasz</i>	29
4. 3. A JUTALMAZÁS HATÁSA AZ EGYÜTTMŰKÖDÉSRE	30
5. ÖSSZEGZÉS	35
IRODALOMJEGYZÉK.....	38
MELLÉKLETEK	I
1. MELLÉKLET: A T-TÍPUS ARÁNYÁNAK ALAKULÁSA ER HÁLÓZATBAN	II
2. MELLÉKLET: A T-TÍPUS ARÁNYÁNAK ALAKULÁSA BA HÁLÓZATBAN.....	III

TÁBLÁZAT- ÉS ÁBRAJEGYZÉK

1. táblázat:	A hálózati szerkezet és a p-típus kifizetése közötti kapcsolat.....	27
1. ábra:	ER (bal) és BA (jobb) hálózat.....	14
2. ábra:	A modell folyamatábrája.....	18
3. ábra:	A szimuláció menete egy mintahálózat példáján.....	19
4. ábra:	A t-típus elterjedésének gyakorisága	22
5. ábra:	Az 1. szakaszban lejátszódó főbb folyamatok	24
6. ábra:	A 2. szakaszban lejátszódó főbb folyamatok	26
7. ábra:	A 3. szakaszban lejátszódó főbb folyamatok	29
8. ábra:	A jutalmazás hatása az együttműködésre	31

1. BEVEZETÉS

A kooperatív és az ezzel szemben álló önérdékkövető magatartás megértésére számos tudományterület tesz kísérletet, köztük a közgazdaságtudomány is. E tudománynak már a kezdetektől fogva szerves része a két magatartásforma közötti kapcsolat kutatása, merthogy a kölcsönös együttműködés a piaci koordináció alapját adja, de az együttműködés és az önérdékkövetés dilemmájával a hétköznapiakban is számos helyen találkozhatunk.

Egy egyszerű, talán kicsit sarkított példával élve, képzeljük el, hogy egy stadionban egy labdarúgó mérkőzést nézünk. Az előttünk ülő sorban lévő személy jobban szeretné látni a pályán zajló eseményeket, emiatt állva nézi tovább a mérkőzést. Emiatt mi, akik mögötte ülünk, nem látunk semmit a sporteseményből és kénytelen vagyunk mi is felállni ahhoz, hogy élvezni tudjuk a mérkőzést, és ez a folyamat tovább gyűrűzik a körülöttünk lévőkre is. Végül a stadionban a szomszédságunkban mindenki állva nézi a mérkőzést és ugyanannyit fog látni, mintha ülve nézné azt, annyi különbséggel, hogy mindenki egy kényelmetlenebb pozícióban fog elhelyezkedni. Ha visszagondolunk a közelmúltbéli eseményekre, a COVID-19 kapcsán, akkor egy, a gazdasághoz kapcsolódó példa is eszünkbe juthat. 2020-ban a pandémia miatt az emberek több időt töltöttek otthonukban és emiatt néhány jószág kereslete ugrásszerűen megugrott, ilyenek voltak a tartós élelmiszerek, vagy pl. a WC papír és az élesztő. A fogyasztók pánikszerűen elkezdtek termékeket felhalmozni, a boltokban pedig a túlkereslet miatt készlethiány lépett fel, ami végül odáig vezetett, hogy a kiskereskedelmekben mennyiségi korlátozást vezettek be. A pánikvásárlás miatt a beszállítók nem tudták tartani a lépést a keresletnövekedéssel és általános hiány lépett fel. Ha a fogyasztók együttműködtek volna egymással és nem azt helyezik előtérbe, hogy saját maguknak több hónapra elegendő mennyiség álljon rendelkezésre az adott termékből, hanem továbbra is kiegyensúlyozottan fogyasztottak volna, akkor a boltok, még ha általánosan növekszik is a kereslet, megfelelően ki tudták volna elégíteni az igényeket. Azonban a pánikvásárlás, az önérdékkövetés végül odáig vezetett, hogy az senkinek sem volt kifizetődő.

A fenti példákból is látható, hogy a társadalmi érdek és az önérdék közötti dilemma részese a mindennapjainknak és nem feltétlen döntünk mindig helyesen, melynek következményeképp a társadalom saját maga számára kedvezőtlen helyzetet idézhet elő.

A dolgozatom fókuszában a kooperatív és önérdékkövető magatartás közötti kapcsolat megértése áll, amelyet egy olyan, még eddig nem említett nézőpont motivál, ami jelenleg az egész világ számára kihívást jelent, ez pedig a fenntarthatóság. A fenntarthatóság kialakítása

egy közös cél és mindenki felett áll, mert csak egy Földünk van, aminek ökoszisztémáját nekünk kell megvédenünk. Ez a társadalmi-gazdasági kihívás rámutat a kooperáció jelentőségére és az önérdékkövető magatartásra épülő ösztönzési rendszerek tervezésére, működtetésére egyaránt. A kutatás a fenntarthatósággal, ami koncepcionálisan az együttműködés megfelelője, kapcsolatos rövid távú költségeket állítja szembe annak hosszú távú előnyeivel. A fő kutatási kérdés pedig, hogy a fellépő költségekkel szembeni kompenzáció képes-e hosszú távon fennmaradó kooperatív magatartásra ösztönözni a társadalom tagjait.

A fenntarthatósághoz kapcsolódó dilemmahelyzet egy klasszikus, absztrakt elemzési kerete a közlegelők tragédiája, ahol az önérdékkövetésből fakadó előnyök miatt a kooperáció elbukik. Ennek oka, hogy ha van néhány szereplő, aki együttműködik, míg a többség nem, akkor az utóbbiak „kizsákmányolják” az előbbieket, merthogy anélkül részesülnek az együttműködésből fakadó előnyökből (externáliák), hogy ők maguk együttműködő magatartást követnének. Tehát az együttműködés nem tűnik egy racionális döntésnek. A kizsákmányolók ellen az egyének csak egyféleképpen védekezhetnek, ha ők maguk is önérdékkövető magatartást tanúsítanak. Ha a szűkösen rendelkezésre álló természeti erőforrásokra gondolunk, akkor ez annyit jelent, hogy végül mindenki túlzott mértékben használja fel ezeket az erőforrásokat, amely végül visszafordíthatatlan eseményekhez vezethet, az erőforrás kimerülését eredményezheti.

A közlegelők tragédiájának és így a kimerülő erőforrások problémájának egy esete a fogolydilemma játék néven ismerté vált játékelméleti koncepció. Ebben a keretrendszerben a szereplők az együttműködés és a versengés között választhatnak úgy, hogy a játékosok számára a kooperatív magatartással szemben az önérdékkövetés, függetlenül a többi szereplő viselkedésétől, mindig az utóbbinak kedvez. Ebben a dolgozatban a fogolydilemma játékot veszem alapul 4 további elemmel kiegészítve. Egyrészt feltételezem, hogy a különböző szereplők döntéshozatalában más-más tényezők játszanak szerepet. A standard fogolydilemma játékban az egyének döntése a kifizetések egymással való szembeállításától függ, azonban a valós társadalmakban az egyének gyakran konformitásra törekszenek, vagyis a döntésüket attól teszik függővé, hogy az őket körülvevő személyek milyen döntéseket hoznak és ehhez próbálnak meg igazodni. E gondolat mentén a modellezés során megkülönböztetek piac-orientált (a klasszikus játékból is ismert racionális egyént) és társadalom-orientált (konformista) egyéneket. Úgy gondolom, hogy a maga módján mindkét attitűd racionális döntéseket hoz, mert a különböző szempontokat ugyan más-más súlyokkal veszik figyelembe, de a nap végén mégis azt a stratégiát fogják választani, ami a mérlegelést követően a számukra, a preferenciáiknak megfelelően a legoptimá-

lisabb, legjobb eredményt adja. Másrésztől figyelembe veszem, hogy ezek az attitűdök mennyire sikeresek egymáshoz képest. Amelyik attitűd sikeresebb a társadalmon belül, az elkezd terjeszkedni a sikertelenebb attitűd rovására, amit egyfajta evolúciós dinamika vezérel. Harmadrészt az egyének között nem teljes kapcsolathálót feltételezek, amivel a konformista egyének viselkedése válik realisztikusabbá, mivel a konformista egyének döntéshozatalában az őket körülvevő szomszédok viselkedése döntő jelentőséggel bír. Végül pedig ebbe a keretrendszerbe egy jutalmazási mechanizmus illesztetek. A dolgozatban ehhez kapcsolódva pedig arra a kérdésre keresem a választ, hogy az ösztönzők megváltoztatása, egy jutalmazási séma bevezetése hogyan képes hatni mind rövid és hosszú távon a kooperatív magatartás alakulására.

A dolgozat felépítését tekintve a következő fejezetben áttekintésre kerülnek a témához kapcsolódó korábbi kutatási eredmények és az, hogy a dolgozat hogyan illeszkedik a szakirodalomba. A 3. fejezet a modellezéshez használt keretrendszert és módszertant, míg a 4. fejezet a kapott eredmények értékelését írja le. A dolgozat az összegzéssel, a modell korlátjainak és a további kutatási irányok tárgyalásával zárul.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

2. 1. KERETRENDSZER

Mint ahogy a bevezetésben is szó volt róla, a fenntarthatósággal kapcsolatos egyéni döntési dilemma motiválta a dolgozat megírását. A természeti erőforrások, amelyek a kutatás alapját jelentik, a közös javak csoportjába tartoznak, amely jóságok két fontos tulajdonsággal rendelkeznek. Egyrészt jellemző a rivalizálás, vagyis, ha pl. egy vállalat kitermeli az adott erőforrást, akkor az általa kitermelt mennyiség más vállalatok számára már nem lesz elérhető. Másrészt viszont nagyon költséges mások kizárása a felhasználásból. A közös javak e két tulajdonsága miatt olyan döntési helyzetek jönnek létre, amikor a rövid távú gondolkodásból származó kimenetel hosszú távon végül senkinek sem állna az érdekében (Ostrom et al., 1999). A közös javak csoportjába tartozó természeti erőforrások csak szűkösen állnak a rendelkezésünkre. További probléma, hogy ha ez az erőforrás beláthatatlan ideig felhasználható, akkor a termelők szemében ez azt jelenti, hogy az végtelen mennyiségben áll rendelkezése. Amikor viszont szembesülnek azzal, hogy az erőforrás kimerült, akkor pedig magas költségek árán sem hozható helyre. A termelők azonban azt feltételezik, hogy ha egy erőforrás kimerül, akkor további ehhez hasonló hasznos erőforrások még a rendelkezésükre állnak (Ostrom, 2000). Mivel csak egy Földünk van és a bolygó adta erőforrások regenerálóképességének határát feszegetjük, ezért nem folytathatjuk az erőforrások olyan mértékű felhasználását és károsítását, mint eddig. A rövid távú gondolkodás miatt a költségek és a hasznok arányában változásra van szükség, amit a dolgozatban egy ösztönzési rendszer bevezetése fog előidézni.

A fentebb bemutatott állapotot a közlegelők tragédiája (Hardin, 1968) is szemlélteti. A történet lényege, hogy van egy mindenki számára nyitott legelő, ahova a pásztorok kihajthatják a szarvasmarháikat. A profitmaximalizálás hajszolása közben, mint minden termelési döntésnél, itt is felmerül a pásztorokban a kérdés, hogy megéri-e számukra még egy szarvasmarhát hozzáadni az állományhoz, és mindegyik racionális pásztor arra jut, hogy igen. Azonban a megnövekedett állomány miatt a legelő teherbíróképessége nem képes fenntartani a legelő állapotát és emiatt az erőforrás kimerül és tönkremegy. A szerző megállapítja, hogy az emberek egy olyan zárt, korlátolt világban élnek, ahol korlátlan növekedésre vannak ösztönözve. Formálisan ezt az ellentmondást a dolgozat során egy többszereplős fogolydilemma játékként (prisoner's dilemma, PD) fogom értelmezni (Ostrom, 1990).

Az, hogy a játék többszereplős, önmagában csak annyit jelent, hogy több játékos játssza egymással ezt a játékot. Azonban ezzel együtt felmerül az is, hogy ezek a játékosok milyen

kapcsolatban állnak egymással, ki-kivel játszik, kinek a viselkedését figyeli meg, befolyásolja – ez pedig a kapcsolatháló szerkezetétől függ, amit a 3. fejezetben fogok részletesen tárgyalni.

Visszatérve a fő gondolati ívre, a fogolydilemma rendkívül széles körben vizsgált probléma és mind a mai napig számos új kutatási eredmény születik. A történet főszereplője két fogoly, akik magánzárkában vannak és nincs lehetőségük kommunikálni egymással. Az ügyészek mindkét fogvatartottnak feltesznek egy ajánlatot, amelyről szimultán módon kell dönteniük. Adott két választható stratégia, az együttműködés (cooperation, C) és a defektálás, vagy másnéven versengés (defect, D). Ha a két bűnöző kölcsönösen defektál, akkor egyaránt P, míg kölcsönös kooperáció esetén R kifizetésben részesülnek. Ha az együttműködés egyoldalú, akkor az együttműködő S, míg a versengő T kifizetést kap. A standard fogolydilemmában a kifizetésekre igaz, hogy $T > R > P > S$ (true PD). A 2.2. alfejezetben bemutatott elméleti tanulmányok nagyrészt ezzel ellentétben egy újraskálázott, ún. gyenge fogolydilemmát (weak PD) használnak, ahol $T > R > P = S$ és $T = b$, $R = 1$ és $P = S = 0$. Ebben az esetben a játék dinamikája a b változótól, a defektálás kísértésétől függ, tehát hogy az adott defektáló egyén mekkora kifizetésben részesül, ha egy kooperáló egyénnel találja szembe magát a játék során.

2. 2. KORÁBBI EREDMÉNYEK

A választott téma számos tudományterületet, szakterületet érint és az irodomelemzés során a dolgozat szempontjából legrelevánsabb kutatási eredményekre igyekeztem kitérni főként a fogolydilemma játékhoz kapcsolódva.

A szakirodalomban a fogolydilemma játék szuboptimális Nash-egyensúlyának feloldására több empirikus kísérlet eredményéről is olvashatunk, amelyek bizonyítják, hogy a játékosok nem a Nash-egyensúlyi stratégiát, a versengést választják. Egy fogvatartottak és egyetemi hallgatók körében végzett kísérletből kiderül, hogy a szimultán, egylövéses (one-shot) PD játékban a hallgatók 37%-a, míg a fogvatartottak 55,6%-a volt hajlandó az együttműködésre, míg szekvenciális esetben ez 63,04%-ra és 46,3%-ra módosult (Khadjavi–Lange, 2013). Továbbá az előbb említett szekvenciális játéknál a kísérletben résztvevők közel 60%-os arányban viszonyozták az elsőként lépő együttműködését (Khadjavi–Lange, 2013), amit megerősít Clark és Sefton (2001) eredménye is, miszerint az együttműködést ekkor inkább a kölcsönösség, mintsem a feltétel nélküli altruizmus ösztönzi.

Az egylövéses PD játékok mellett, amikor a játékosok csak egyszer dönthetnek a játék során, Axelrod (1980) szimulációs versenyre hívta fel a figyelmet az ismételt PD játékokra, ahol a különböző stratégiák sorozata csap össze egymással. A versenyt a tit-for-tat stratégia nyerte meg, amire

gyakran megbocsájtó stratégiaként is hivatkoznak, mert nem bünteti a másik játékos hibáját, defektálását. Ha valaki ezt a stratégia-sorozatot követi, akkor az első körben együttműködést fog választani, majd a következő döntési körnél a másik játékos előző köri stratégiáját választja. A megbocsájtó stratégia-sorozatok mellett büntető stratégia-sorozatokkal is találkozhatunk, ilyen pl. a grim trigger, aminél először együttműködünk és mindaddig, amíg a másik játékos is együttműködik, addig mi is. Amikor a másik játékos defektál, onnantól kezdve örökre defektálást fogunk választani. Ez a stratégia-sorozat az egyik leghatékonyabb módja lehet az együttműködés fenntartásának (Buskens–Weesie, 2000), azonban fontos, hogy ez csak akkor tud működni, ha a másik játékos tisztában van azzal, hogy mi ezt a stratégia-sorozatot alkalmazzuk, mert a játék könnyen átfordulhat örök defektálásba (Axelrod, 2000).

A dolgozat középpontjában a PD játék elméleti elemzése áll, ezért rá is térnek az elméleti kutatási eredmények tárgyalására. Az elmúlt néhány évtizedben e kutatások jelentős része az evolúciós játékelméleti megközelítésre és azon belül is a replikátor-egyenletre összpontosított. Az evolúciós játékelmélet a klasszikus játékelmélethez képest jobban fókuszál a stratégiák dinamikájára és azt feltételezi, hogy a sikeres(ebb) stratégiák elterjednek a társadalomban – ezt a szelekciós mechanizmust írja le a replikátor-egyenlet (Taylor–Jonker, 1978; Hofbauer–Sigmund, 1998). Az utánzási dinamika (imitation rule) alapja, hogy egy jól kevert populációban a véletlenszerűen kiválasztott játékospárok a kifizetési különbségtől vagy a stratégia gyakoriságától függő valószínűséggel utánozzák egymás stratégiáját (Weibull, 1995; Hofbauer–Sigmund, 2003). Mivel a PD játékban a versengés a játék domináns stratégiája és egyetlen Nash-egyensúlya ezért, ha a dezertálók aránya nem nulla a társadalomban, akkor a replikátor dinamika egy olyan egyensúlyi állapotba vezet, ahol mindenki dezertál. Tehát a replikátor dinamika és a klasszikus játékelméleti megközelítés ugyanazt a megoldást hozza a fogolydilemma játékban. Nowak és May (1992) úttörő munkája számos tudományos eredmény alapját adja. A szerzők mellett, hogy evolúciós utánzási szabályt alkalmaztak, az együttműködés kialakulását jól kevert populáció helyett négyzetes rácson elemezték és ezzel utat nyitottak a különböző hálózatokban végzett elemzések felé és megmutatták, hogy az interakciók korlátozása elősegíti az együttműködés fennmaradását. Mindezek nyomán számos utánzási, stratégia-frissítési szabály (feltétel nélküli utánzás, replikátor-szabály, Fermi-szabály, Moran-szabály stb.) és térbeli struktúra került a figyelem középpontjába (Szabó–Fáth, 2007; Roca et al., 2009; Cardillo et al., 2010). Cardillo et al. (2010) tanulmányukban az evolúciós dinamikát a stratégiára és a frissítési szabályra együttesen írják fel, ami annyit jelent, hogy adott egyén egy másik egyénnek nem

csak a stratégiáját, hanem frissítési szabályát (replikátor, Moran, feltétel nélküli utánzás) is utánozza. A szerzők 3 elemzést végeztek el, ahol megnézték, hogy a stratégiák alakulása mellett két frissítési szabály szembeállítása milyen eredményekhez vezet.

A nem teljes hálózati szerkezetek közül gyakran szabályos, véletlen és skálafüggetlen hálózatokat hasonlítanak össze egymással. Egy hálózatban a foksám adott csúcs kapcsolatainak számát mutatja meg. Ennek alapján pedig szabályos hálózatban a foksámeloszlás konstans, véletlen hálózatban binomiális, míg skálafüggetlen hálózatban az eloszlás hatványfüggvényt követ. Ennek értelmében pl. a szabályos hálózat vagy a véletlen hálózat homogénebb struktúrának, míg a skálafüggetlen hálózat igen heterogén hálózati szerkezetnek minősül. Ehhez kapcsolódva pedig Roca et al. (2009) elemzése rámutat, hogy a replikátor-szabály alkalmazásával ahogy haladunk a véletlenszerű struktúra felől a skálafüggetlen struktúra felé, úgy egyre nagyobb együttműködés jön létre, sőt heterogén hálózatokban az együttműködés akár az evolúció uralkodó stratégiájává is képes válni (Santos–Pacheco, 2005). Míg homogén véletlen hálózatban az együttműködők több klaszterbe csoportosulnak, addig a heterogén skálafüggetlen hálózatokban mindig egy klasztert alkotnak, amely klaszter tartalmazza a legnagyobb foksámmal (legtöbb kapcsolattal) rendelkező csúcsokat. Az együttműködők aránya nagyobb skálafüggetlen hálózatban, amit a klaszterek mikroszkopikus szerkezete okoz, sőt a dezertálás kísértésére is robusztusabb a kooperáció a heterogén hálózatokban (Gómez-Gardeñes et al., 2007). Továbbá heterogén skálafüggetlen hálózatokban a foksám-korreláció és a klaszterezettség, mint topológiai jellemzők, jelentős mértékben képesek megváltoztatni a játék dinamikáját és nagymértékű defektálás esetén is elő tudják segíteni az együttműködést (Pusch–Weber–Porto, 2008). Ugyan az interakciók korlátozása és a skálafüggetlenség fokozza az együttműködést, Bravetti és Padilla (2018) egy újfajta megközelítést alkalmaztak teljes hálózatra, ahol mindenki kapcsolatban van mindenkivel. A szerzők úgy gondolják, hogy az evolúció két szinten zajlik: a populáción belül, valamint konkurens populációk között. Az általuk javasolt optimális replikátor egyenlet azt jósolja, hogy az önzésből fakadóan is kialakulhat az együttműködés, mert lehet, hogy a populáción belül lokálisan kifizetődő a D stratégia, de a populációk között ezzel az átlagos kifizetés csökken és így a teljes populáció rosszabbul jár a másikkal szemben.

Az eddig bemutatott irodalmak olyan kifizetés-alapú utánzási dinamikákat használnak, amelyeket kizárólag a kifizetések közötti különbség hajt. Emellett azonban kiemelt figyelmet kapnak a stratégia gyakoriságán alapuló dinamikák is, amelyek a konformitás jelenségéhez köthetők. A konformitás jegyében az egyének képesek elfogadni olyan stratégiákat, amik a saját interakciós tartományukon belül a leggyakoribbak, függetlenül a várható kifizetéstől (Henrich–

Boyd, 1998). Ennek megfelelően vannak olyan frissítési dinamikák, amelynél megkülönböztetik a kifizetésen és a konformitáson alapú döntéseket és az egyéneket e mentén a két csoport valamelyikébe sorolják. Ha jól kevert populációt, teljes hálózatot tételezünk fel, akkor a konformisták magas aránya lehetővé teszi a kooperáció fennmaradását. Szabályos térbeli struktúrákban (gyűrű, rács) szintén pozitív hatása van, mert elősegíti az azonos típusú egyedekből álló klaszterek kialakulását, amely klaszterek a C stratégiát játszóknak számára kedvezők, mivel $R > P$, továbbá a konformisták aránya a dezertálás kísértésének határát is kitolja (Pëna, 2008; Pëna et al., 2009a). Zhenxi et al. (2018) a racionális konformitás hatását vizsgálták egy rácsos PD játékban. A racionális konformista csak akkor viselkedett konformistaként, ha a múltbéli kifizetéséhez képest csökkent a kifizetése, minden más esetben úgy viselkedett, mint egy átlagos játékos, akit egy kifizetés-alapú dinamika vezérelt és arra jutottak, hogy a racionális konformisták elő tudják segíteni az együttműködést, mert megvédik a kooperáló játékosokat a teljes kihalástól.

Mindezek mellett néhány ellenpélda is látható az irodalomban, amikor is a konformitás negatívan hat az együttműködő magatartásra. Szolnoki és Perc (2015) azt találták, hogy négyzetes rácsos PD játékban a konformisták túl magas aránya ronthatja az együttműködést, mert ugyanakkora valószínűséggel lesz mindenki C vagy D. Összességében a szerzők arra jutottak, hogy a konformitás mind a gyenge és a standard fogolydilemmában is fokozza az együttműködést, viszont a konformisták magas aránya mellett fontos, hogy a másik típusú egyének is jelen legyenek a populációban. Ha eltekintünk a szabályos struktúráktól és a heterogén, skálafüggetlen hálózatokra tereljük a figyelmünket, akkor elmondható, hogy a konformitás bizonyos körülmények között korlátozza az együttműködést. Pëna et al. (2009b) megerősítik, hogy a konformitás kedvez a gyűrű struktúrában, azáltal, hogy a C stratégiát játszóknak klasztere könnyebben kialakul, azonban skálafüggetlen hálózatban a dezertálás közepes és nagy mértékű kísértése esetén a struktúra akadályozza a kooperációt, mert a csúcsok ki vannak téve a szomszédságukban lévő helyi többség véleményének. Megmutatják, hogy a skálafüggetlen hálózatok nem mutatnak olyan nagy javulást a szabályos struktúrákhoz képest. Ha az átlagos fokszám és a konformitás kisebb, akkor a skálafüggetlen struktúrában javul az együttműködés szintje, azonban ahogy minél nagyobb a konformitás mértéke és a fokszám, annál kisebb a kísértésnek az a szintje, amelynél a konformitás a standard esethez képest rosszabb a kooperálók számára. Mindezek alapján úgy tűnik, hogy a konformitás és a hálózati viszonyosság (nem teljes hálózati szerkezet, interakciók korlátozása) evolúciós keretek között egymástól függetlenül is képes fokozni az együttműködést, azonban, ha a két hatás egyszerre van jelen, akkor ezek eredő hatása nem feltétlen

az együttműködés irányába hat (Pëna et al., 2009a). Egy tanulmányban megnézték, hogy mi történik akkor, ha a konformista attitűdöt véletlenszerűen, a legnagyobb vagy a legkisebb fokszámúak között osztják szét, amelynek jelentősége abban rejlik, hogy skálafüggetlen hálózatban az egyének különböző mértékű befolyással bírnak. A legkedvezőbb eset az együttműködésre nézve az, amikor a tömeg, a kisfokszámú egyének konformisták. Ha a nagyfokszámú hubok konformisták, akkor az evolúció rosszabb eredményhez vezet, mintha véletlenszerűen osztanánk szét a tulajdonságot. A szerzők arra a következtetésre jutottak, hogy a vezetőknek képesnek kell lenniük követők létrehozására, ami homogén klasztereket eredményez, amelyek a populációban versenyeznek egymással. Ezt a versenyt aztán a hálózati kölcsönösség a kooperálók javára billenti. Ha ezzel szemben a vezetők követésre kényszerülnek, akkor a tömegektől elvárják, hogy mozdítsák elő az együttműködést, amit a korlátozott interakciós tartományuk és az ezzel kapcsolatos gyengeségük kizár, tehát végül akadályozza az együttműködést (Szolnoki–Perc, 2016).

Egy másik kutatási irány, ami a dolgozat témafelvetéséhez kapcsolódik az a jutalmazás kérdésköre. Ennek kapcsán nem talákoztam olyan kutatással, ami a konformitást is figyelembe vette volna, tehát azok a tanulmányok, amiket bemutatok ezt figyelmen kívül hagyták. Az irodalomban a jutalmazást gyakran a közjószág játékokban (public good game) vizsgálják. A játék lényege, hogy minden játékos hozzájárul egy közös alaphoz, majd az összegzett hozzájárulások egyenletesen visszaosztásra kerülnek a játékosok között – természetesen ennek a játéknak is számos formája megtalálható a szakirodalomban. Itt a dilemmát az okozza, hogy ha senki nem járul hozzá az alaphoz, akkor nem lesz mit visszaosztani, viszont az egyének ösztönözve vannak arra, hogy potyautasként viselkedjenek és anélkül részesüljenek az alaphoz, hogy ők maguk nem járultak ahhoz hozzá. Ezekben a játékokban az egyének dönthettek arról, hogy másokat jutalmaznak-e vagy sem. Sutter–Haigner–Kocher (2010) szerzőhármás egy ilyen játékban vizsgálták meg a jutalmazás hatását. Itt a játék során két szakaszt különítettek el: az első szakaszban a játékosok a hozzájárulásról döntöttek. A második szakaszban a játékosok begyűjtötték egymásról az információkat és dönthettek arról, hogy jutalmazzák-e a többieket vagy sem (endogén beavatkozás) és a szerzők egyértelműen azonosították a jutalmazás e típusának pozitív hatását az együttműködésre. További kutatások arra is rámutatnak, hogy rács struktúrában a magas jutalom kevésbé hatékonyan segíti elő az együttműködést, mint a mérsékelt jutalom (Szolnoki–Perc, 2010). Ezzel szemben arról is olvashatunk kísérleti eredményeket, hogy a jutalmazás önmagában nem elegendő a hozzájárulások fenntartásához (Sefton et al., 2007).

Egy másik út a jutalmazás együttműködésre gyakorolt hatásának vizsgálatára az, ahol van egy közös erőforrás, jutalom-alap, amiből a kooperálók részesülhetnek. Ami itt fontos, hogy a jutalom-alap exogén és ennek megfelelően minél több együttműködő részesül ebből az alapból, az egy kooperálóra jutó jutalom nagysága annál kisebb lesz. Jimenez et al. (2008) ilyen keretrendszerben nézték meg a jutalmazás hatását. Ebben az elemzésben egy négyzetes rácson helyezkednek el a szereplők, akik feltétel nélküli utánzás alapján választanak stratégiát, vagyis azt a szomszédot utánozzák, akinek a legnagyobb a kifizetése. A szerzők kutatási kérdése pedig, hogy a Nowak és May (1992) által megkövetelt magas kezdeti kooperátor-szint hogyan képes kialakulni. Az eredmények alapján látható, hogy a kooperálók akár 0,1%-os kezdeti sűrűsége mellett kis jutalom esetén is nagy együttműködés képes létrejönni. A kutatás legfőbb eredménye, hogy a jutalmazás következtében akár egyetlen együttműködő is képes úgy betörni a dezertálók társadalmába, hogy a játék előrehaladásával olyan egyensúly jöjjön létre, ami ellenálló marad akkor is, ha a jutalmazási mechanizmust kikapcsolják. Azonban a szerzők hangsúlyozzák, hogy a jutalmazást óvatosan kell megtervezni minden egyes alkalmazáshoz, mert nem mindig feltételezhető, hogy a jutalom növelése minden helyzetben az együttműködés növekedéséhez vezet. Továbbá a nagyon agresszív, magas jutalmazási politikából származó struktúrák kevésbé lehetnek ellenállóak a dezertőrök terjedésével szemben a kompenzáció visszavonása után, mint az alacsony jutalommal építettek (Jimenez et al., 2008). A jutalmazás pozitív hatását erősíti meg Cuesta et al. (2007) is, ahol egy egylövéses, szigorú PD játékban azt találják, hogy az egyének hajlamosak lehetnek a megosztott jutalom mellett dönteni annak ellenére, hogy egyrészt a dezertőrök kihasználhatják őket, másrészt pedig, ha túl sokan részesülnek a jutalmazásból, akkor a dezertőrök felülmúlhatják az együttműködők kifizetését. Szerintem egy érdekes elgondolás a történelmi hűség beépítése a modellbe, aminek lényege, hogy az egyén akkor részesül jutalomban, ha több perióduson keresztül is együttműködő magatartást tanúsít. Ezt a jutalmat a dezertőr szomszédok fizetik meg és az látható, hogy a jutalmazás e típusának bevezetése is képes fokozni az együttműködést (Fu et al., 2021).

A leírtak alapján is látható, hogy egyrészt az együttműködés mögött igen összetett mechanizmusok állhatnak, másrészt pedig, hogy számos kutató foglalkozik a kooperáció jelenségének megértésével, amelynek csak egy, a dolgozat módszertanához szorosabban kapcsolódó kis részét tárgyaltam. Hogy egy átfogó képet kaphassak és érzékeltetni tudjam az általam használt modell újdonságtartalmát, a következő 2.3. alfejezetben bemutatom, hogy a dolgozat hol helyezkedik el a szakirodalomban.

2. 3. A DOLGOZAT ELHELYEZÉSE A SZAKIRODALOMBAN

A dolgozat módszertanát tekintve a következőképpen pozicionálható a meglévő irodalomban. Vannak olyan elméleti eredmények, amelyek ismételt játékban vizsgálják az evolúció dinamikáját (Brandt–Sigmund, 2006; Seung–Su–Hyeong-Chai, 2017), azonban itt a bemutatott irodalomhoz hasonlóan egylövéses (one-shot) PD-t használok annyi különbséggel, hogy a standard kifizetésekre (true PD) felírt relációkat veszem alapul. Mivel a dinamikus hálózatok fokozzák az együttműködést (Pacheco et al., 2006; Li et al., 2020), ezért ennek a hatásnak a kiszűrése miatt statikus hálózati szerkezeteket veszek alapul. Ezen belül pedig az Erdős-Rényi-féle véletlen és a Barabási-Albert-féle skálafüggetlen hálózatokban vizsgálódok és hasonlítom össze az eredményeket. Henrich és Boyd (1998) alapján a konformista döntéshozatalt a stratégia gyakorisága alapján határoztam meg függetlenül a kifizetésektől és ennek következtében az egyéneket két csoportba sorolom: vannak a piac-orientált játékosok, akik a kifizetési mátrix, míg a társadalom-orientált egyének az adott stratégia gyakorisága alapján választanak stratégiát. A feldolgozott irodalomhoz illeszkedve a konformitás tekintetében érdemes kiemelni, hogy elemzésemben az 50%-os, széles körben használt küszöbértéket alkalmazom, vagyis egy konformista azt a stratégiát követi, amelyet a szomszédjainak többsége is követ. Láthatunk példát arra vonatkozóan is, ahol ettől eltérő küszöbértéket használnak (Liu et al., 2019), de ennek hatására nem kívánok kitérni. A jutalmazás tekintetében Jimenez et al. (2008) és Cueasta et al. (2007) munkájához hasonlóan jutalomban csak az együttműködők részesülnek, viszont a jutalom nagysága a hálózat legnagyobb foksámától függ – erre a 3. fejezetben részletesen is kitérek.

Összességében a dolgozat újdonságát 3 fő faktor adja. Az *első*, hogy a hivatkozott tanulmányokban az egyének attól függetlenül, hogy milyen attitűd jellemzi őket (konformisták vagy önérdékkövetők), mindannyian PD játékot játszanak és a kifizetésük ezekből a játékokból ered, tehát ezen a téren nincs különbség az egyének között. A konformista lét a kifizetések begyűjtése után az utánzási mechanizmus, az evolúciós dinamika során kap csak szerepet. A szakirodalomban mindezek alapján tehát kifizetés-alapú és a stratégia gyakoriságán alapuló evolúciós dinamikát is használnak az attitűdtől függően. Ezzel szemben a dolgozatban az attitűdök már a kifizetések realizálásakor különválnak és emiatt összességében egy „hamis” PD játékról van szó, mert csak a piac-orientált egyének játszanak PD játékot, a konformista egyének nem. Az általam használt evolúciós dinamika függetlenül az attitűdtől kifizetés-alapú, ahol a konformitás, a stratégia gyakoriságának hatása korábban, a kifizetések realizálásakor kap szerepet. Ehhez kapcsolódva pedig fontos megjegyezni, hogy az irodalomban a stratégiaválasztás valószínűségi-alapon, a frissítési dinamikák alapján dől el, míg a dolgozatban egyértelműen van

egy kritikus érték, ami bizonyosan meghatározza a stratégiaválasztást. Az evolúciós dinamika csak ezután lép életbe és ide köthető a *második* lényegi eltérés, hogy a feldolgozott szakirodalommal ellentétben az evolúciós dinamikát nem a C/D stratégiaválasztásra írom fel, hanem az attitűdök változására, egy úgynevezett módosított replikátor dinamika formájában. Továbbá a stratégiafrissítés dinamikáját az attitűdökhöz tartozó döntési mechanizmusok vezérlik hálózati szempontból lokálisan; ezt egy klasszikus játékelméleti keretben definiálom. Az attitűd evolúciója pedig a populáció szintjén érvényesül oly módon, hogy amelyik attitűd átlagos kifizetése magasabb, mint a populáció átlagos kifizetése, az a replikátor-egyenlet által meghatározott ütemben növekszik (szaporodik) a kevésbé sikeres attitűd rovására. Ez a logika hasonló a „halál-születés” frissítéshez (death-birth rule), ami azt mondja ki, hogy a teljes populációból véletlenszerűen meghal egy egyed és a szomszédok az üres helyért a kifizetéssel arányosan versenyeznek. A halál-születés dinamikájáról evolúciós környezetben azt lehet elmondani, hogy kedvez az együttműködésnek, ha az altruista cselekedet haszon-költség aránya meghaladja bármely szomszéd foksámát. A kisebb összekapcsolhatóság a kooperálóknak kedvez, mert ekkor a klaszterezés könnyebb, továbbá ez az összefüggés heterogén hálózatok esetén is érvényes (Ohtsuki-Nowak, 2006; Ohtsuki et al., 2006). Az utolsó, *harmadik* tényező pedig, hogy ebbe az egész keretrendszerbe egy ösztönzési rendszert illeszték és megnézem, hogy annak milyen következményei vannak az együttműködésre. Tudomásom szerint ez az első kísérlet, ahol egy ilyen modellkeretben kerül elemzésre a jutalmazás együttműködésre gyakorolt hatása.

Végül pedig fontosnak tartom megjegyezni, hogy a dolgozat megírásának motivációja és a kutatási kérdésfeltevés az első és a harmadik faktor kapcsán már egy korábbi munkában is megjelent, ami ennek a dolgozatnak az előzményének tekinthető (Braun-Sebestyén, 2022). Ebben az elemzésben azt találtuk, hogy a konformisták nagy aránya és a kezdeti együttműködési szint, valamint a kapcsolatháló szerkezete is jelentősen képes befolyásolni az egyensúlyi együttműködési arányt. Azonban az ösztönzési rendszer bevezetésekor az evolúciós dinamika hiánya miatt a jutalmazás csak akkor volt képes elősegíteni az együttműködést, ha a jutalom végig biztosítva volt. Amint a jutalmazás visszavonásra került, a PD játék visszakerült eredeti Nash-egyensúlyába, amikor mindenki dezertál. Jelen dolgozatban ezt az utóbbi gondolatot viszem tovább és teszek kísérletet arra, hogy az attitűdök evolúciója mellett nézem meg, hogy a jutalmazásnak milyen következményei lehetnek a kooperációra és ebben milyen szerepet játszik a hálózati struktúra.

3. MÓDSZERTAN

A következő fejezetben a dolgozatban használt modell részletes bemutatására kerül sor, ahol először is a hálózati szerkezetre, majd azt követően a fogolydilemma különböző eseteire térek ki, kezdve a standard fogolydilemma játéktól az attitűdök bevezetésén át egészen a jutalmazásig. A fejezet végén összegzem a szimuláció menetét és a modell fő gondolati ívét.

3. 1. HÁLÓZATI SZERKEZET

A dolgozatban nem teljes hálózati struktúrákat vizsgállok, ahol az információ nem áramlik tökéletesen, az egyének csak a velük közvetlen szomszédságban lévő néhány másik egyénnel vannak kapcsolatban és csak az ő viselkedésüket tudják megfigyelni, a hálózat többi szereplőjének viselkedését nem. Ehhez kapcsolódva modellhálózatokat fogok használni, azok közül is az Erdős-Rényi-féle (ER) véletlen hálózat (Erdős-Rényi, 1960) és a Barabási-Albert (BA) skálafüggetlen hálózat (Barabási-Albert, 1999) kerül előtérbe. Az előbbi esetében a kapcsolatok kialakulásának valószínűsége azonos (konstans) bármely két tetszőleges szereplő (csúcs) között, aminek következtében egy hasonló szereplőkből, egyénekből álló szimmetrikus minta kapható, tehát minden szereplő szinte ugyanannyi másik egyénnel van kapcsolatban. Ezzel szemben a BA modell a növekedésre és a preferenciális kapcsolódásra épül, ami a társadalmi hálózatokat jellemző aszimmetrikus (hatványfüggvényt követő) fokszámoszlást generál. Ami egyszerűen annyit jelent, hogy a hálózatban a „gazdag egyre gazdagabb” elv érvényesül, vagyis akinek eleve sok barátja/ismerőse van, az könnyebben tud új kapcsolatokra szert tenni. Ennek következtében a hálózatban van néhány olyan egyén, akinek nagyon sok kapcsolata van, míg számos olyan, aki kevés kapcsolattal rendelkezik. A hálózatok közti strukturális különbség az 1. ábrán is látható.

Ahogy már írtam, az ER hálózat a kapcsolatok teljesen véletlenszerű kialakulását foglalja magába és a hálózattudományban emiatt gyakran viszonyítási alapként használják, ami az én elemzésemben sem lesz másképp. Azért van szükségem az ER hálózatra, hogy a BA, realisztikus társadalmi hálózatokat közelítő modellhálózatban kapott eredményeket hatékonyabban tudjam értékelni, mert önmagában nem tudnám eldönteni, hogy az adott mutató értéke éppen magas vagy alacsony, szükség van egy viszonyítási alapra.



1. ábra: ER (bal) és BA (jobb) hálózat

Forrás: saját szerkesztés

Azért, hogy közelebb kerüljek a realisztikus hálózatok modellezéséhez nem mehetek el amellett, hogy a Földön kb. 7,75 milliárd ember él, ahol az embereknek átlagosan csak néhány 100 ismerőse van, emiatt a valós társadalmi hálózatok sűrűsége alacsony. A sűrűség azt adja meg, hogy a hálózatban az összes lehetséges kapcsolatnak hány százaléka van ténylegesen jelen. A szimuláció elvégzéséhez összefüggő hálózatra van szükségem, ami annyit jelent, hogy a hálózat bármely pontjából eljuthatunk a hálózat egy bármely más pontjába. Mindezek és a rendelkezésre álló számítási kapacitások alapján az elemzésben 2%-os sűrűségű 100 elemű hálózatokat használok, ami az ER hálózat tekintetében azt jelenti, hogy minden egyénnek átlagosan 2 kapcsolata van.

3. 2. FOGOLYDILEMMA JÁTÉK

A klasszikus egylövéses PD játék egy két játékosból és két stratégiából álló szimmetrikus játék, ahol a két választható stratégia az együttműködés (cooperation, C) és a versengés (defect, D). Ha a két játékos kölcsönösen együttműködik, akkor egyaránt R, míg kölcsönös versengés esetén P kifizetésben részesülnek. Ha az együttműködés egyoldalú, akkor az együttműködő S, míg a versengő T kifizetést kap. A kifizetésekre igaz, hogy $T > R > P > S$. A PD játék többszereplős kiterjesztése során nem teljes hálózati struktúrát feltételezve az i -edik egyén kifizetése a k_i db, tehát minden szomszédal szemben játszott, kétszemélyes játékból eredő kifizetések összege (Okada, 1993), amelyet az (1) és (2) egyenletek írnak le.

$$\pi_{i_C} = R \cdot N_{i_C} + S \cdot N_{i_D} \quad (1)$$

$$\pi_{i_D} = T \cdot N_{i_C} + P \cdot N_{i_D} \quad (2)$$

π_{i_C} és π_{i_D} az i -edik egyén C és D stratégiájának kifizetése, a T, R, P, S paraméterek a kifizetési mátrix elemei, ahogyan korábban már definiáltam, valamint $k_i = N_{i_C} + N_{i_D}$, ahol N_{i_C} és N_{i_D} rendre az i -edik egyén C és D stratégiát játszó szomszédjainak száma. A szereplők számától és a hálózati szerkezettől függetlenül ennek az egyszerű n -szereplős, egylövéses PD játéknak a kimenetele a domináns stratégiákat követő, a Pareto-optimumhoz képest szuboptimális Nash-egyensúly: a $T > R > P > S$ kikötésből következően $\pi_{i_D} > \pi_{i_C}$ minden i -re, tehát minden egyén D stratégiát játszik.

A klasszikus PD-ben az egyének homogének, ugyanazon mechanizmus mentén választanak stratégiát. Ezt a feltételt feloldva, a dolgozatban felteszem, hogy az egyének attitűdje lehet piac-orientált (p-típus) vagy társadalom-orientált (t-típus). A klasszikus PD játékban az egyének a kifizetési mátrix alapján, a többi egyéntől függetlenül, mindig D stratégiát választanak – ez a piaci elveken alapuló gondolkodás jellemzi a p-típust. Ezzel szemben a t-típusú egyének konformista módon döntenek, a szomszédjaik többsége által elfogadott stratégia biztosít számukra nagyobb kifizetést. A két attitűd kifizetése a két választható stratégia függvényében a következőképpen alakul, ha t-típusú ($\beta_i = 1$), vagy ha p-típusú ($\beta_i = 0$) játékosról van szó:

$$\pi_{i_C} = \beta_i \cdot N_{i_C} + (1 - \beta_i) \cdot \frac{R \cdot N_{i_C} + S \cdot N_{i_D}}{T} \quad (3)$$

$$\pi_{i_D} = \beta_i \cdot N_{i_D} + (1 - \beta_i) \cdot \frac{T \cdot N_{i_C} + P \cdot N_{i_D}}{T} \quad (4)$$

$$\beta_i = \{0; 1\}$$

A kifizetéseket normáltam, ami azt jelenti, hogy egy egyén maximális kifizetése mindig a szomszédjainak, kapcsolatainak száma lehet, függetlenül az egyén saját attitűdjétől (tehát ilyen értelemben egyik attitűd kifizetése sem dominálja a másikat). Az adott egyén azt a stratégiát választja, amelyiknek nagyobb a kifizetése. Ha a két stratégia kifizetése megegyezik, ami csak t-típusú egyén esetében lehetséges, akkor az adott t-típusú nem változtat a stratégiáján. A játékot a (3) és (4) egyenletek alapján addig iterálom, amíg már egyik játékos sem szeretne változtatni a stratégiáján. Erre a részfolyamatra a későbbiekben alapjáteként fogok hivatkozni, amelynek részletes elemzése korábbi munkánkban olvasható (Braun-Sebestyén, 2022).

Ha az alapjáték elérte egyensúlyát, akkor a következő lépés a kifizetések összegzése és a *módosított replikátor dinamika* felírásával annak a növekménynek a meghatározása, amennyivel az adott attitűd aránya változni fog a társadalmon belül. A sztenderd replikátor dinamika alap gondolata, hogy ha egy C stratégiát játszó egyén véletlenszerűen találkozik egy másik játékosal és játszik vele egy PD játékot, akkor várhatóan mekkora lesz a kifizetése. Ez alapján

mind a C és D stratégia, valamint a társadalom várható kifizetése is meghatározható. Ha a D stratégia várható kifizetése magasabb, mint a társadalom várható kifizetése, akkor a dinamika a D stratégia irányába hajtja a játékot, egyre többen fognak dezertálni. Ezzel a szemléletmóddal szemben, a dolgozatban a replikátor dinamikát más kontextusban és szemléletben használom, így módosított replikátor dinamikaként hivatkozok rá. Az eltérés a sztenderd megoldástól alapvetően két dimenzióban jelentkezik.

Egyrészt a dinamikát nem a játékosok által választható stratégiára írom fel, hanem az attitűdre, ami rövid távon adott, az alapjátékon belül nem változik. Ez a megoldás azt a szemléletet követi, hogy a társadalom tagjai által követett együttműködő vagy nem együttműködő viselkedés (a választott stratégia) rövid távon változhat. Az attitűd változása ezzel szemben hosszabb távú folyamat. Úgy is felfogható ez a kettősség, hogy a modellben szereplő alapjáték (egylövéses PD játék) egy adott generáció viselkedését írja le a társadalomban, míg a módosított replikátor dinamika a generációk között „öröklődő”, de evolúciós dinamikát követő attitűdök mozgását adja meg. Másrészt a módosított replikátor dinamika felírásakor nem a várható kifizetéseket veszem alapul, hanem az adott attitűd, illetve a társadalom megfigyelt átlagos kifizetését a megelőző alapjátéokra vonatkozóan. Ez a megoldás azért is célszerű, mivel a komplex hálózati struktúra, az attitűdök és stratégiák kölcsönhatásában a várható kifizetések meghatározása általános esetben problémás, viszont az ex post átlagos kifizetésekre építve iteratív szimulációk lebonyolíthatóak. Ugyanakkor az is fontos szempont, hogy az átlagos ex post kifizetések már tükrözik ezt a kölcsönhatás-rendszert a hálózati szerkezet, az attitűdök és a stratégiák között, tehát jó közelítést adják a várható kifizetéseknek.

Az attitűdök átlagos kifizetése és a társadalom átlagos kifizetése alapján a módosított replikátor dinamikát az (5) egyenlet írja le.

$$\dot{N}_{t,1} = \frac{N_{t,1}}{N} \cdot \left(\frac{\pi_{t,1}}{\pi_1} - 1 \right) \quad (5)$$

$$\dot{N}_t = -\dot{N}_p \quad (6)$$

$$\frac{N_{t,2}}{N} = \frac{N_{t,1}}{N} + \dot{N}_{t,1}, \text{ ami egyszerűbb alakra hozva } \frac{N_{t,2}}{N_{t,1}} = \frac{\pi_{t,1}}{\pi_1} \quad (7)$$

Ahol π_t a t-típusúak átlagos kifizetése, π pedig a társadalom átlagos kifizetése, míg N_t a t-típusúak száma az adott periódusban. Matematikailag, ha $\dot{N}_t > 0$, akkor a t-típusúak aránya növekedni fog, mert a t-típusúak átlagos kifizetése nagyobb, mint a társadalom átlagos kifizetése, míg $\dot{N}_t < 0$ esetben csökken. Ha $\dot{N}_t = 0$, akkor az attitűdök aránya nem változik. A dinamikára igaz, hogy amennyivel a t-típusúak száma nő, annyiival fog csökkenni a p-típusúak száma

a társadalomban ((6) egyenlet), illetve a növekmény értékének megfelelően ceteris paribus, az egyéneknek csak az attitűdje változik meg, az együttműködő/versengő stratégia, mint kiinduló állapot továbböröklődik a következő alapjátékra. A t-típusúak száma a következő időszakban a (7) egyenlet szerint alakul, ahol az látható, hogy a konformisták számának növekedése arányos azzal, hogy mennyivel nagyobb átlagos kifizetést tud elérni a t-típusú egyén a társadalmi átlaghoz képest. Ha a növekedés pozitív, akkor akik eredetileg is t-típusúak voltak ők továbbra is azok maradnak. A p-típusúak közül pedig véletlenszerűen választok ki annyi egyént, amennyinek még t-típusúnak kellett lennie ahhoz, hogy a t-típusúak aránya a hálózatban elérje a replikátor által meghatározott arányt. Ha a t-típus növekménye negatív, akkor a t-típusúak közül a véletlenszerűen kiválasztott csúcsok a meghatározott aránynak megfelelően p-típusúak lesznek. Fontos kiemelni, hogy a szimuláció és a módszertan sajátosságai miatt végül szükség volt arra, hogy a t-típusúak száma egész szám legyen, ezért az általános kerekítési szabályok szerint kerekítettem. Ennek megfelelően a dinamikának van egy inaktivitási tartománya, a $-\frac{0,5}{N} < \dot{N}_t < \frac{0,5}{N}$ intervallum, amikor nem változik az attitűdök aránya és kialakul az adott szakasz egyensúlya. Ha a növekmény értéke az inaktivitási tartományon kívülre esett, akkor az új attitűd arányok kialakulását követően újrajátszottam az alapjátékot, ahol az egyének a C és D stratégia közötti választásról döntöttek. Ha az alapjáték elérte az egyensúlyát, újra kiszámoltam a növekmény értékét, melynek megfelelően változtak az attitűd-arányok és így ment tovább a játék mindaddig, amíg a t-típusúak új aránya kerekítve változatlan nem maradt. Amikor ez bekövetkezett, akkor az evolúciós dinamika és így az 1. szakasz is egyensúlyba került.

A következő, a 2. szakasz a jutalmazás bevezetését foglalja magába, ahol a kifizetőfüggvények Braun-Sebestyén (2022) alapján a következőkre módosulnak:

$$\pi_{i_C} = \beta_i \cdot N_{i_C} + (1 - \beta_i) \cdot \frac{k_i \cdot (R \cdot N_{i_C} + S \cdot N_{i_D} + \delta)}{\pi_{max}} \quad (8)$$

$$\pi_{i_D} = \beta_i \cdot N_{i_D} + (1 - \beta_i) \cdot \frac{k_i \cdot (T \cdot N_{i_C} + P \cdot N_{i_D})}{\pi_{max}} \quad (9)$$

$$\delta \geq 0, \pi_{max} > 0$$

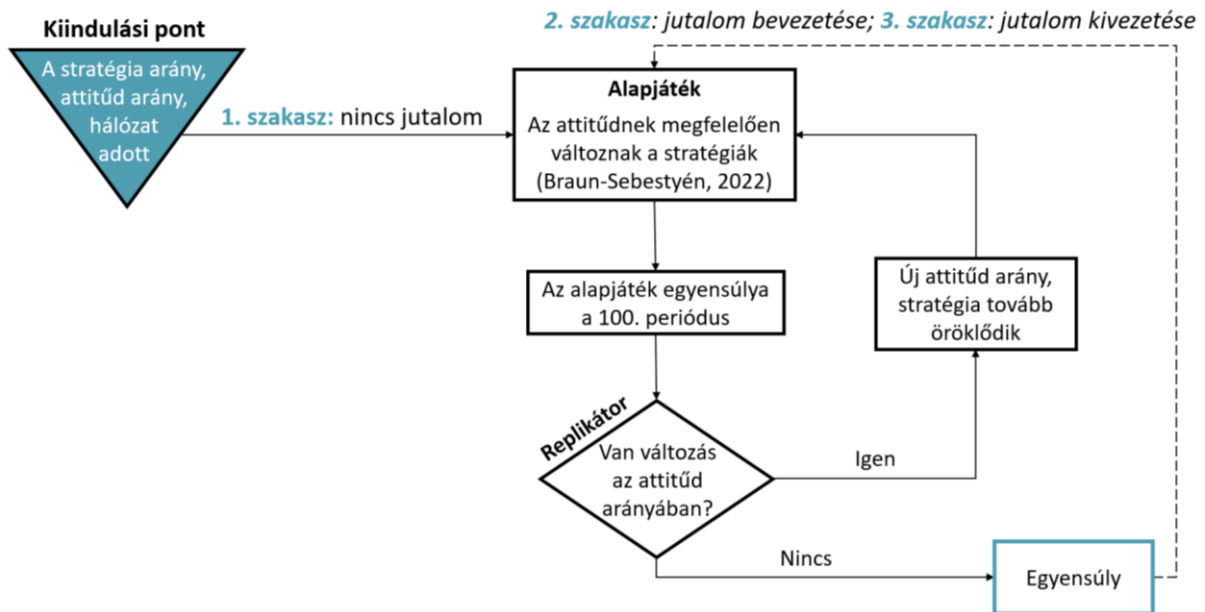
Jutalomban (δ) csak az együttműködők részesülhetnek és az attitűdök definíciójából adódóan a konformista egyének döntését ez nem képes befolyásolni. Tehát a jutalom csak a p-típusúak stratégiaválasztására van közvetlen hatással, a t-típusúak döntésére csak közvetetten tud hatni. A korábbiakhoz hasonlóan itt is normálva vannak a kifizetések, ahol k_i az i -edik egyén foksámát, szomszédjainak számát jelenti a hálózatban. Ha δ nem elengedő nagyságú,

akkor a p-típusú egyén nem vált C stratégiára és ekkor $\pi_{\max} = k_i \cdot T$, viszont, ha δ elegendően nagy, akkor $\pi_{\max} = k_i \cdot R + \delta$. Ahhoz, hogy egy p-típusú egyén együttműködjön, a következő (10) feltételnek kell teljesülnie.

$$\delta > (T - R) \cdot N_{i_C} + (P - S) \cdot N_{i_D} \quad (10)$$

A teljes elemzésnél a $T = 3$, $R = 2$, $P = 1$, $S = 0$ értékadásokat használom, ami egy olyan speciális eset, ahol $(T - R) = (P - S) = 1$, vagyis a (10) feltétel $\delta > N_{i_C} + N_{i_D}$, tehát $\delta > k_i$ alakra egyszerűsödik. A delta paraméter értékét az adott szimulációban az adott hálózat legnagyobb fokszáma határozza meg, vagyis $\delta = k_{i_{\max}} + 0,001$. Ekkor minden p-típusú játékos mindenféleképpen C stratégiát fog választani.

A 2. szakaszban módosultak a kifizetőfüggvények, de a replikátor-egyenlet a korábbiakban felírt (5)-(7) egyenletek szerint van érvényben. Ha az evolúció megáll, akkor a 2. szakasz is egyensúlyba kerül. A 3., utolsó szakaszban megvonjuk a jutalmat a játékosoktól, így visszkapjuk az 1. szakaszban látott kifizetőfüggvényeket és addig iteráljuk a játékot, amíg az evolúció véget nem ér. A 3. szakasz egyensúlya a teljes játék végső egyensúlyát is jelenti. Összefoglalásként a 2. ábra szemlélteti a szimuláció menetét.



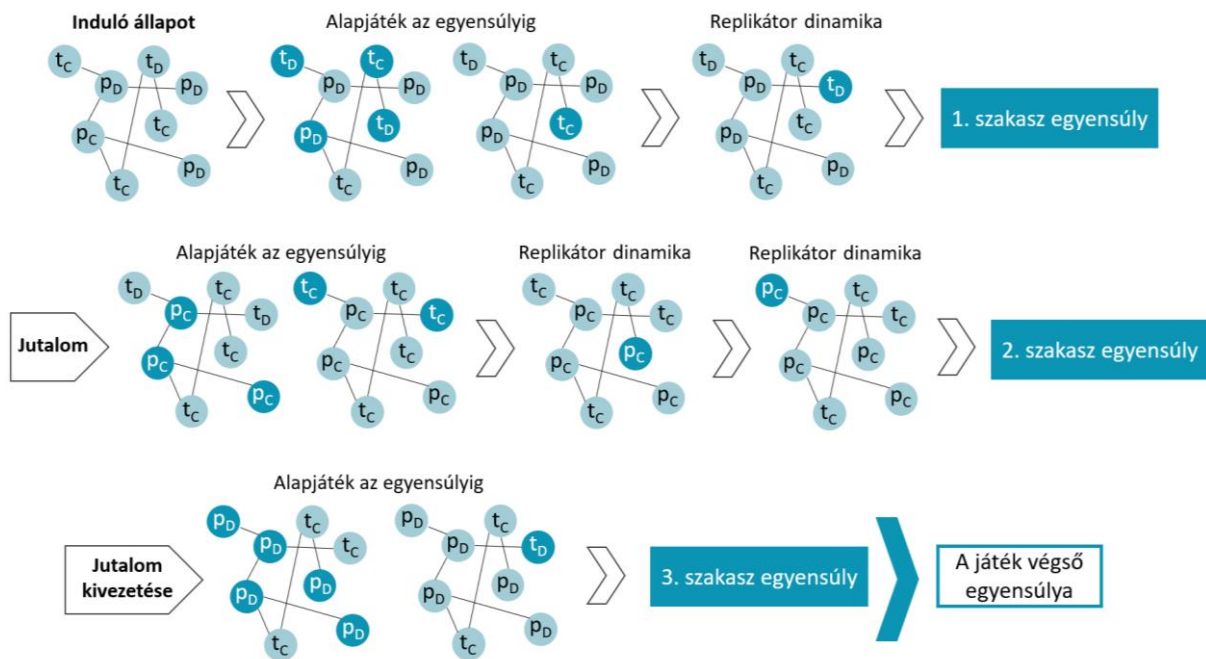
2. ábra: A modell folyamatábrája

Forrás: saját szerkesztés

A modellben mind a hálózati szerkezet és a hozzá tartozó sűrűség, a kifizetések paraméterei és a módosított replikátor dinamika adott. A szimulációban két változtatható paraméter van, ez pedig az, hogy az első alapjátékot milyen (i) stratégia és (ii) attitűd elosztással, aránnyal

kezdem meg. Adott kezdeti együttműködési és attitűd arány mellett 100 független szimulációt futtatok. Az alapjátékban vannak olyan esetek, amikor nem beszélhetünk állandó, statikus egyensúlyról, mert vannak olyan állapotok, ahol az egyensúly dinamikus, oszcillál egy érték körül. Ez annyit jelent, hogy ekkor az egyének stratégiája iterációról-iterációra változik úgy, hogy minden második iterációban ugyanazt az állapotot kapjuk meg. Azonban ennek az oszcillációnak a gyakorisága elhanyagolható (Braun-Sebestyén, 2022) és mivel a stratégiák öröklődnek, ezért azt nem is vettem figyelembe az elemzés során, tehát az alapjáték egyensúlya minden esetben a 100. periódus volt. Azt, hogy az egyes szakaszok mennyi periódus alatt jutnak egyensúlyba, a replikátor dinamika határozza meg. A dolgozat fókuszában a kompenzáció együttműködésre gyakorolt hatása áll, ezért az elemzés során a jutalom rövid távú hatása alatt a 2. szakasz egyensúlyát, míg hosszú távú hatása alatt az azt követő 3. szakasz egyensúlyát értem.

A 3. ábra kiegészítésképpen egy néhány elemű mintahálózaton keresztül mutatja be a teljes folyamatot, ahol t_c jelöli a C stratégiát játszó t-típusú egyént, ennek megfelelően értelmezhető a többi jelölés is. A sötétebb színű csúcsok azok a csúcsok, ahol valamilyen változás következett be az adott fázisban.



3. ábra: A szimuláció menete egy mintahálózat példáján

Forrás: saját szerkesztés

4. EREDMÉNYEK

A módosított replikátor dinamika egy nagyon fontos szerepet tölt be abban, hogy milyen együttműködési szint jön létre a társadalomban. Jutalom nélkül csak a t-típusúak tudják fenntartani a kooperációt és az egész elemzés célja végső soron az, hogy megnézzem, hogy hosszú távon, a jutalmazás visszavonásával létre lehet-e hozni egy olyan állapotot, ahol az egyének nagyobb része működik együtt, mint korábban. Emiatt pedig kiemelt szerepet kapnak az attitűdök, amelyek a 3. fejezetben leírtak szerint hozzák meg döntéseiket és képesek befolyásolni egymás viselkedését, valamint megváltoztatni a társadalom stratégiai összetételét. Mindezek alapján az egész elemzést azzal kezdem, hogy megnézem, hogy az attitűdök aránya és a hozzá tartozó egyensúlyi állapotok hogyan alakulnak a szimulációk során, hiszen ők a kulcsszereplői az egésznek. Ezt követően bemutatom a háttérben lejátszódó folyamatokat és végül rátérek a kutatás fő eredményére, a jutalmazás együttműködésre gyakorolt hatására.

4. 1. AZ EGYENSÚLY KIALAKULÁSA

Ahhoz, hogy megértsük, hogy pontosan mit is jelent az egyensúly jelen esetben, szükséges közelebbről is megnézni, hogy a 100 független szimuláció során a játék hogyan alakul és milyen végeredményre jut az egyes esetekben.

A két hálózatban eltérő mintázatot tapasztaltam az egyensúlyok tekintetében. ER hálózatban amikor a C stratégia aránya vagy a kezdeti konformista arány alacsonyabb, mint 50%, akkor a jutalom előtti időszakban a t-típus mind a 100 független szimuláció során szinte teljesen elterjed. A futtatások többségében ez nem is változik a játék végső egyensúlyának kialakulásáig. Ezzel szemben BA hálózatban ez a jelenség csak 0%-os kezdeti C stratégia arány mellett tapasztalható. ER struktúra esetén, ha a kezdeti együttműködési és t-típus arány 50% felett van, akkor látható, hogy nagyobb lesz a 100 szimuláció eredménye közötti szóródás. BA hálózatban ez a szóródás már legalább 10%-os kezdeti együttműködés mellett is látható, függetlenül a kezdeti konformista aránytól. Ez pedig magával hozza, hogy a skálafüggetlen hálózatban amikor mindkét paraméter magas, akkor az eredmények szórása is magasabb, mint az ER esetében. Ha a 3 szakasz összevetését nézem meg, akkor azt találtam, hogy a 2. szakaszban a legnagyobb ez a szóródás, mert akkor egyszerre vannak olyan lefutások, ahol a t-típus nagyon magas arányban fennmarad, míg emellett vannak olyanok is, ahol a p-típus elkezd terjeszkedni a konformisták rovására. Sőt, amikor a t-típus aránya csökken, az rendkívül változó, kisebb-nagyobb mértékben tud végbe menni, tehát az egyes futtatások igen különböző eredményeket is adhatnak. A 3. szakaszban a kompenzáció visszavonásával ez a szóródás mérséklődik és a játék visszatér egy,

az 1. szakaszhoz közeli állapotba. Mindezek alapján megállapítható, hogy a futtatások átlagolt értéke azt mutatja meg, hogy *jellemzően* milyen t-típus arány jön létre az adott periódusban vagy éppen a játék végállapotában (1. és 2. melléklet). Ugyanerre a következtetésre jutnánk akkor is, ha a modell összes paraméterére megnéznénk ezeket a futtatásokat és ennek megfelelően minden esetben az egyensúlyt várható értéken értelmezem.

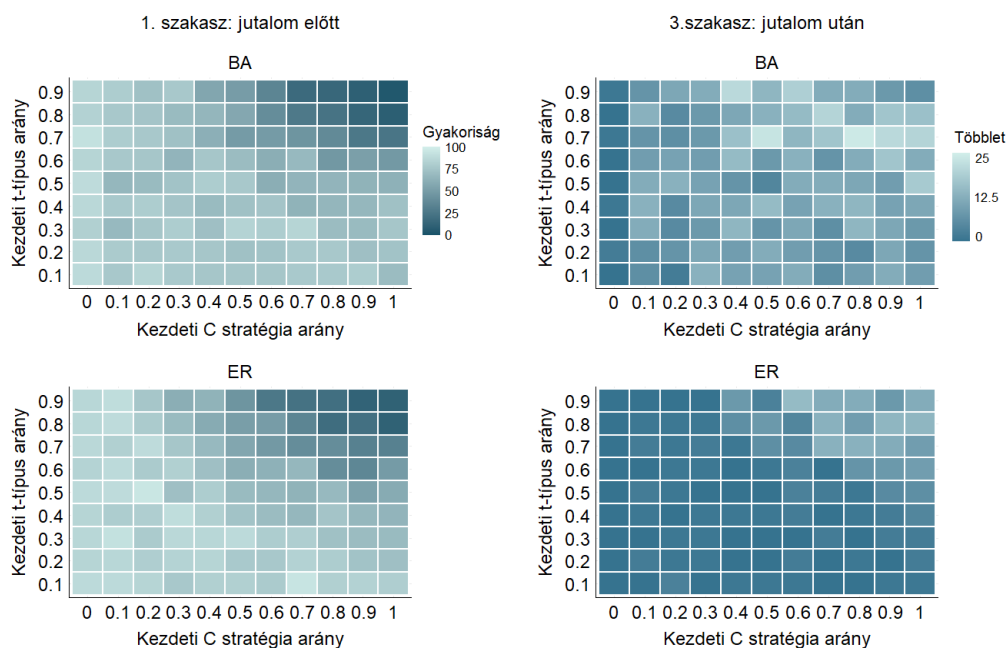
Rátérve kicsit az egyensúly időbeliségére, az látható, hogy az 1. szakaszban az egyensúly eléréshez szükséges periódusok száma a kezdeti C stratégia arány növekedésével nő, míg a kezdeti t-típus arány növekedésével csökken. Azonban a t-típus aránya jelentősebben képes befolyásolni a periódusok hosszát, mint a C stratégia arány. Alacsony kezdeti t-típus és C stratégia arány mellett a hálózatok között átlagosan nincs szignifikáns eltérés, míg magas kezdeti értékek mellett BA hálózatban átlagosan 0,79 periódussal kevesebbre van szükség, mint ER hálózatban az egyensúly kialakulásához. A 2. szakasz ott kezdődik, ahol az első véget ér annyi különbséggel, hogy bekerül a jutalom a rendszerbe, ami megbontja az egyensúlyt. Megállapítható, hogy a kezdeti C stratégia és t-típus arány is pozitív kapcsolatban áll a periódusszámmal, ami ennek köszönhetően jelentős mértékben képes megnövekedni. Ezt jól szemlélteti, hogy alacsony kezdeti értékek mellett BA hálózatban átlagosan 1,2, míg ER hálózatban 0,08 periódus szükséges az új egyensúly kialakulásához, azonban a magasabb kezdeti értékek esetén már ez 3,5 periódusra növekszik. Továbbá a hálózatok között is jelentősebb a különbség, BA hálózatban átlagosan 1,2 periódussal több időre van szükség az egyensúly kialakulásához, amikor vagy a kezdeti C stratégia, vagy t-típus arány alacsony. A 3. szakaszban a jutalom kivezetésével továbbra is igaz mindkét hálózatra, hogy a két kezdeti paraméterérték növekedésével a periódusok száma is nő. Alacsony paraméterértékek mellett ER hálózatban átlagosan 0-0,05 közötti, BA hálózatban pedig 0,5 körüli periódusszámok tapasztalhatók, míg a magasabb tartományokban átlagosan 1,3-1,7 periódusra van szükség a hálózatokban.

Ha a teljes játékot nézzük, akkor az látható, hogy mindkét hálózatban a végső egyensúly akkor alakul ki a legrövidebb idő alatt, amikor a C stratégia aránya 10-30% között van, míg a kezdeti t-típus arány 70-90%, ekkor átlagosan ER hálózatban 3,92, BA-nál pedig 5,26 periódusra van szükség. A periódusszám akkor a legnagyobb mindkét hálózatban (átlagosan 12,3), amikor a t-típus aránya kezdetben 60-80% és a C stratégia arány 80-100%. Közvetlenül összevetve a hálózatokat az látszik, hogy ha a C stratégia vagy t-típus arány kezdetben alacsony, akkor ER hálózatban átlagosan 1,5 periódussal hamarabb alakul ki az egyensúly, mint BA hálózatban, míg akkor, amikor mindkét paraméter kezdeti értéke magas (legalább 70%), akkor BA hálózatban átlagosan 0,5 periódussal kevesebbre van szükség.

4. 2. A HÁTTERBEN LEJÁTSZÓDÓ FOLYAMATOK

Az egyensúly kialakulását befolyásolja, hogy vannak olyan esetek, amikor az adott szakasz induló állapota egyben egyensúly is, aminek két fajtája van. Egyrészt van, amikor mindkét típusú attitűd jelen van a hálózatban és az átlagos kifizetések úgy viszonyulnak egymáshoz, hogy a dinamika az inaktivitási tartományban ragad. Általánosságban ilyen akkor fordul elő, amikor a t-típus arány kellően magas a társadalomban. Az 1. szakasz tekintetében, amikor kezdetben a t-típus aránya 90% és a C stratégia aránya is legalább 60%, akkor BA hálózatban 5,4%, míg ER-nél 9,4%-os valószínűséggel az induló állapot egyben egyensúly is. A 2. szakaszban ennek a jelenségnek a gyakorisága jelentősebb mértékű, a jutalom nem mindig volt hatással az evolúciós dinamikára, látszólag nem tudta kimozdítani a társadalmat az 1. szakaszbéli egyensúlyából az attitűd-arányok vonatkozásában (a stratégiák ettől függetlenül még változhattak/változtak). Ha a társadalomban kezdetben sok p-típusú és D stratégiát játszó egyén volt jelent, akkor BA-ban átlagosan 10%, ER-ben átlagosan 18%-ban, míg a 90%-os kezdeti t-típus és 100%-os induló C stratégia arány mellett a szimulációk közel felénél volt ez jellemző. A 3. szakaszban elvértve, hasonlóan a korábbiakhoz, csak a magasabb tartományokban volt látható ez a jelenség, kb. 5-7%-os valószínűséggel.

A másik típusú jelenség, ami befolyásolja az egyensúly kialakulását, ha az egyik attitűd teljesen elterjed a társadalomban, mert akkor a replikátor dinamika megáll és kialakul a játék végső egyensúlya az evolúció tekintetében (4. ábra).



4. ábra: A t-típus elterjedésének gyakorisága

Forrás: saját szerkesztés

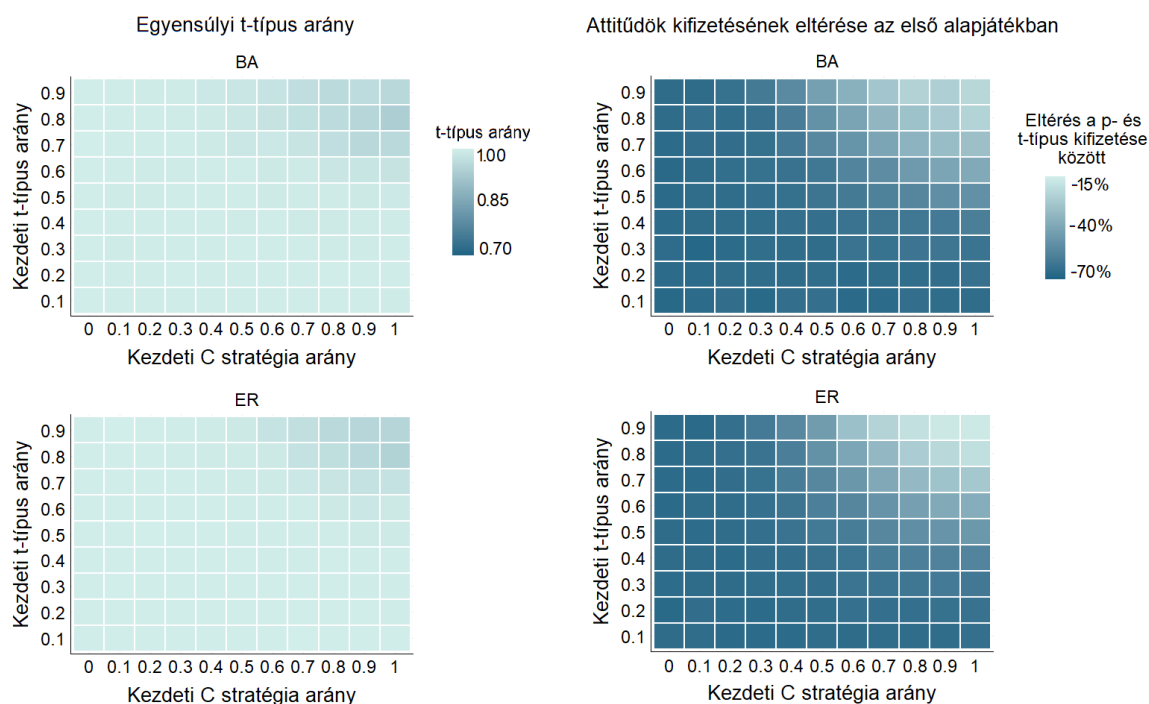
A jutalom bevezetése előtti 1. szakaszban a t-típus és C stratégia arány kezdeti 0-10%-os értéke mellett 75-85%-ban a p-típus eltűnik a társadalomból, vagyis az esetek 75-85%-ban már létre is jön a végső egyensúly. Egy speciálisabb eset, amikor kezdetben nincs kooperáció a társadalomban, mert ekkor az 1. szakaszban mindenki D stratégiát játszik és ennek hatása a későbbiekben is vissza fog térni, viszont most még csak az látható, hogy BA hálózathoz ekkor terjed el legtöbbször a t-típusú attitűd. Visszatérve az általános képhez, a kezdeti paraméterek együttes növekedésével a p-típusúak is egyre nagyobb, legalább 80-90%-os valószínűséggel képesek fennmaradni. A 2. szakaszban ez a jelenség nem jellemző, mert a jutalmazás a p-típusúakat ösztönzi a terjeszkedésre, erre a későbbiekben fogok részletesen kitérni. A 4. ábra jobb oldali hasábjában azt mutatja meg, hogy a korábbiakon felül, csak a 3. szakaszban hányszor jött létre teljesen t-típusú társadalom. Ahol jutalom előtt kisebb gyakorisággal terjedt el a t-típus, ott a jutalom kivezetését követően ez már gyakrabban előfordult, mint más esetekben. Továbbá a jutalom előtti esetben elég hasonló eredményeket láthattunk, addig most megfigyelhető, hogy BA hálózatban a kompenzáció visszavonása jobban elbillenti az evolúciót a t-típusúak felé, mint ER hálózatban. Az utóbbinál csak magas kooperáció és t-típus arány mellett van változás, ahol további, maximum 10 alkalommal terjedt el a t-típus, míg skálafüggetlen struktúrában ez akár 24 is lehet. Nem volt olyan kezdeti t-típus és C stratégia arány kombináció, ahol mind a 100 szimuláció során elterjedt volna teljesen a t-típusú attitűd.

A jobb átláthatóság végett a fejezet további részében a szimuláció szakaszait különböző kisebb részekben tárgyalom.

4. 2. 1. A jutalmazás előtti 1. szakasz

A jutalmazás előtti 1. szakasz vonatkozásában az 5. ábra azt mutatja meg, hogy egyrészt a hálózatokban hogyan alakul a 100 független szimulációban átlagosan a különböző induló paraméterek mellett a szakasz egyensúlyi attitűd aránya (bal oldal). Másfelől pedig az is látható, hogy a szakasz első alapjátékának egyensúlyában hogyan viszonyultak egymáshoz az attitűdök kifizetései, vagyis, hogy a p-típus átlagos kifizetése hány százalékkal nagyobb/kisebb a t-típus átlagos kifizetésénél (jobb oldal). Ezen kifizetések függvényében határozódik meg az attitűd-arányok változásának iránya, valamint az első periódus elemzésével következtetni tudok arra, hogy miért az jellemzi az egyensúlyt, ami. Megjegyzem, hogy a p-típus kifizetése csak akkor értelmezett, amikor a p-típus fenn is maradt, viszont azt tudható, hogy mindegyik kezdeti C stratégia és t-típus arány mellett, mindegyik szakaszban voltak ilyen futtatások. További megjegyzésem, hogy az evolúciót az attitűd kifizetésének a társadalom kifizetésétől vett különbsége vezeti, ahol az utóbbi a két attitűd átlagos kifizetése közé esik. Ezen túl, az evolúció során a

kifizetéseken kívül az adott attitűd aránya is szerepet kap, de összességében az attitűdök kifizetése közötti különbségek elemzése során is tetten érhetőek azok a folyamatok, amik az evolúciót hajtják.



5. ábra: Az 1. szakaszban lejátszódó főbb folyamatok

Forrás: saját szerkesztés

Kezdve tehát a jutalmazás előtti esettel, ekkor átlagosan 99,07%-os arányban terjedt el a t-típus, tehát az egyensúlyra csak néhány esetben és csak néhány p-típusú maradt a társadalomban. Mindkét hálózatban hasonlóan alakult a mutató, legalább 70%-os kezdeti C stratégia és t-típus arány mellett kisebb csökkenés látható, előbb 97,6%, majd a paraméterek növekedésével 95,2%-re mérséklődött a t-típus aránya átlagosan, ami még így is jelentős maradt.

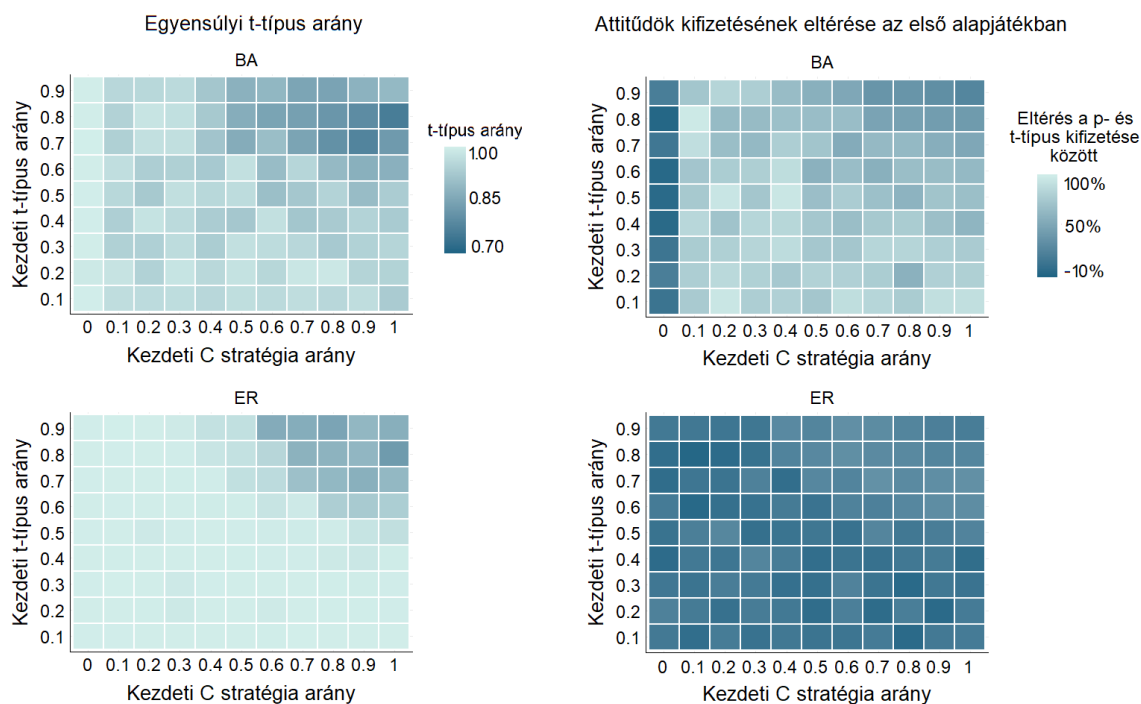
A korábbi munkánkból kiderül, hogy ha a kezdeti C stratégia vagy t-típus arány alacsony, akkor az együttműködés alacsony arányban marad fenn az alapjáték egyensúlyára (Braun-Sebestyén, 2022). Emiatt a p-típusúak szomszédságában főként D stratégiát játszóknak vannak és ekkor kevésbé kedvező p-típusúnak lenni az alacsonyabb kifizetés miatt (a maximális kifizetésének többnyire csak az egyharmad részét szerzi meg). A t-típusnak mindegy melyik stratégiáról van szó, számára egyértelműen kedvező, ha a hálózat a stratégiák szempontjából homogén, mert akkor a kifizetése a maximálishoz tart. Mivel semmilyen mechanizmus nem tudja növelni már a C stratégia arányát, ezért ez igaz lesz minden alapjátékra és így az 1. szakasz egyensúlyára szinte csak t-típusúak lesznek a közösségben.

Jelentősebb együttműködés az alapjátékban ($>60\%$) legalább 80% -os kezdeti együttműködés és konformista arány mellett képes kialakulni (Braun-Sebestyén, 2022). Ennek megfelelően legfeljebb 20% -nyi p-típusú egyén van a társadalomban, akiknek, ha van egy C stratégiát játszó szomszédja, akkor képes lehet a kizsákmányolásra és úgy D stratégiát játszani, hogy az nem befolyásolja a vele szemben álló t-típusút, ezzel jelentősen növelve a saját kifizetését. T-típusú egyénnél, a stratégiák szempontjából most heterogénebb a hálózat és a kifizetés kis mértékben csökken. Habár összességében a kifizetések közelebb kerülnek egymáshoz, ez mégsem elég ahhoz, hogy az evolúció ne részesítse előnyben a konformista egyéneket. Az 5. ábra jobb oldali hasábjára jól mutatja, hogy ha valamelyik kezdeti paraméter alacsony, akkor az első alapjáték egyensúlyában a p-típus átlagos kifizetése 70% -kal kisebb a t-típus átlagos kifizetésénél és ahogy mindkét paraméter növekszik, úgy a kifizetések közötti távolság is csökken. A 15% -os eltérés a replikátor dinamika tekintetében még kellően nagy ahhoz, hogy a t-típus terjeszkedjen, kicsivel nagyobb teret hagyva a kizsákmányolásra képes p-típusúaknak (5. ábra bal oldali hasábjára).

4. 2. 2. A jutalmazás melletti 2. szakasz

Értelemszerűen az 1. szakasz egyensúlyában az attitűdök átlagos kifizetései közel kerültek egymáshoz oly annyira, hogy a replikátor dinamika az inaktivitási tartományon belül legyen – innen veszi kezdetét a 2. szakasz. Természetesen a jutalomnak csak azokban az esetekben van relevanciája, ahol a t-típus nem terjedt el teljesen, mivel a jutalom közvetlenül csak a p-típus döntésére van hatással. A 6. ábra az 5. ábrához hasonlóan mutatja be a háttérben meghúzódó folyamatokat a jutalom melletti 2. szakaszban.

Az ösztönző bevezetésével egyértelműen látható, hogy a p-típus elkezd terjeszkedni és az egyensúlyra 5% -ról akár 30% -ra is megnövekedhet az arányuk átlagosan. A jutalom minden p-típusú egyént arra sarkall, hogy kooperatív magatartást válasszon, ami nagyobb kifizetést biztosít a számára, mintha továbbra is D stratégiát játszana. Ebből kifolyólag a korábbiakhoz képest már jobban megéri p-típusúnak lenni. Ha abszolút értelemben nézzük a p-típus kifizetését, akkor számukra a kooperáció akkor éri meg a legjobban, ha a szomszédjaik is kooperatívak.



6. ábra: A 2. szakaszban lejátszódó főbb folyamatok

Forrás: saját szerkesztés

Ezen a ponton érdemes kitérni a hálózatok közötti szignifikáns eltérésre. A differencia titka a fokszámban rejlik, mert egyrészt minél nagyobb az egyén fokszáma, annál nagyobb kifizetést képes elérni (lásd a (8) és (9) kifizetés-függvényeknél). Továbbá a skálafüggetlen hálózat sajátossága, hogy van néhány olyan csomópont (hub) a hálózatban, amelyeknek nagyon sok kapcsolata van, magas a fokszáma. Véletlen hálózatban pedig a csomópontok nagyon hasonlóak a fokszám tekintetében. Ez a tény abban mutatkozik meg, hogy egy BA hálózatban emiatt a rendszerbe jutott jutalom nagysága jelentősen nagyobb, mint ER hálózatban. Ehhez hozzátársul, hogy BA hálózatban a csúcsok nagyrésze kisfokszámú, vagyis számukra egy kisebb jutalom is már kielégítő lenne, hogy kooperáljanak. Minél nagyobb a jutalom ahhoz képest, mint amekkora alapból szükséges lenne az együttműködéshez, annál inkább közelíti az adott p-típusú egyén kifizetése a maximumát. Ha minden szomszéd kooperál, akkor ennek nincs jelentősége, viszont, ha van olyan szomszéd, aki D stratégiát játszik, akkor a BA hálózat ezt jobban kompenzálja a játékosok felé, mint az ER szerkezet.

A háttérben zajló folyamatokat egy egyszerűbb példán keresztül szemléltetem, amely az 1. táblázaton alapul. A táblázat azt mutatja meg, hogy ha az 1. szakasz egyensúlyában egyetlen p-típusú maradt fenn a társadalomban, akkor az ő kifizetésére hogyan hat egyrészt a hálózat legnagyobb fokszámatól függő jutalom nagysága, másrészt a saját fokszáma, illetve ez a kifizetés mennyivel tér el relatíve a t-típus kifizetésétől. Ezek a fokszámszámok és jutalom nagyságok

reálisak az adott hálózat szempontjából. Továbbá az egyetlen p-típusú C stratégiára való átállása nem okoz változást a t-típus kifizetésében, ezért ez a kifizetés az 1. szakasz egyensúlyi kifizetésével szinte azonos, ami 1,9 körül mozgott, ezért ezt vettem alapul mindkét hálózatban. Továbbá feltételeztem, hogy az egyetlen p-típusú minden szomszédja D stratégiát játszik, tehát a 6. ábra kapcsán az alacsony kezdeti C stratégia vagy t-típus arány kombinációkról van szó.

1. táblázat: A hálózati szerkezet és a p-típus kifizetése közötti kapcsolat

BA hálózat						
Jutalom	Fokszám			% -os eltérés		
	5	6	7			
10	2,50	2,73	2,92	31,6%	43,5%	53,5%
11	2,62	2,87	3,08	37,8%	51,0%	62,1%
12	2,73	3,00	3,23	43,5%	57,9%	70,0%
15	3,00	3,33	3,62	57,9%	75,4%	90,6%

ER hálózat*						
Jutalom	Fokszám			% -os eltérés		
	4	5	6			
4	-	-	-	-	-	-
5	1,54	-	-	-23,1%	-	-
6	1,71	1,88	-	-9,8%	-1,3%	-
7	1,87	2,06	2,21	-1,8%	8,4%	16,3%

*A kifizetés jelen esetben nem értelmezett ott, ahol a jutalom kisebb, mint a fokszám.

Forrás: saját szerkesztés

Hálózati struktúrától függetlenül a p-típusú egyén kifizetése a jutalmazás előtt a fokszámának a harmada lesz és a jutalmazás következtében a kifizetés egyértelműen a korábbi érték fölé fog emelkedni, másképpen nem váltana C stratégiára. Az első dolog, amire felhívnom a figyelmet az az, hogy a táblázatban nem véletlen, hogy a BA hálózatban nagyobb fokszámokkal és jutalmakkal számoltam, mint ER hálózatban. A 2%-os sűrűségű ER hálózatban a maximális fokszám kb. 5-6, míg BA hálózatban ez akár 15 is lehet és ennek megfelelően a jutalom nagyságrendje is más. A BA hálózat magasabb kompenzációja a magasabb jutalom miatt jól tetten érhető az eredményekben. Ahogy az 1. táblázat is mutatja, egy 5 szomszéddal bíró p-típusú 6 egységnyi jutalom mellett 1,88 kifizetést kap, míg 12 egységnyi jutalom mellett 3 egységnyi kifizetést kap. A struktúra ott kap szerepet, hogy ez a jutalom mekkora az adott hálózatban és lényegében ez jelenti a különbséget, merthogy BA szerkezetnél a rendszerbe vezetett jutalom magasabb. Amit még kiemelnék, hogy ha a jutalom adott, akkor az is látható, hogy minél na-

gyobb az egyén fokszáma, annál nagyobb lesz a kifizetése, ami szintén a skálafüggetlen szerkezetnek kedvez. Mivel a t-típus kifizetését adottnak tekinthetem, ezért a BA hálózatban látható módon a p-típus kifizetése a foksám növekedésével egyre nagyobb lesz a t-típus kifizetéséhez képest. Azonban ez az eltérés az iterációk során mérséklődik, az új p-típusúak véletlenszerűen fognak elhelyezkedni a hálózatban és a két attitűd kifizetése közötti eltérés átlagosan folyamatosan csökken, így a p-típusúak ekkor továbbra sem kapnak túl nagy teret a terjeszkedésre. Ezzel szemben ER hálózatban a p-típus kifizetése inkább csak közelíti a t-típus kifizetését, mintsem elszakadna tőle pozitív irányba – ez látható a 6. ábra jobb oldalán. A 6. ábra bal oldali hasábjára pedig igazolja, hogy ekkor ER hálózatban kevésbé kezd el terjedni a p-típus, mint BA hálózatban. Ezen a pontot felhívnám a figyelmet arra, hogy az utóbbi ábrarészlet a 100 független szimuláció átlagos t-típus arányát mutatja, ami azt is tartalmazza, amikor a t-típus teljesen elterjedt a társadalomban (4. ábra).

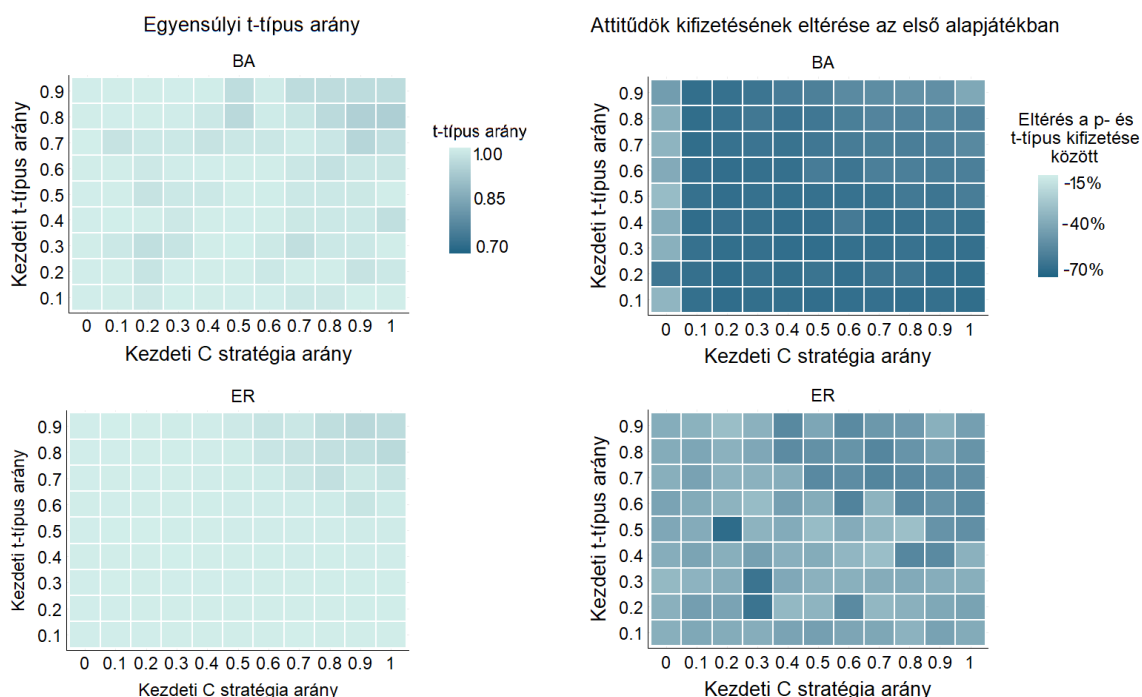
Amiről még nem szóltam, de szembetűnik a 6. ábrán az az, hogy BA hálózatnál 0%-os kezdeti együttműködési aránynál a jutalom bevezetésével a p-típus kifizetése vagy alulmarad a t-típushoz képest, vagy épphogy, 4-5%-kal meghaladja azt. Mivel az 1. szakaszban mindenki D stratégiát játszott, ezért a t-típusúak itt múlták a leginkább felül a p-típusúakat (6. ábra bal oldal) és terjedt el leginkább a t-típusú attitűd, átlagosan 99,86%-ban. Tehát ekkor csupán néhány olyan futtatás volt, ahol 1 p-típusú egyén maradt fenn. Ezzel szemben az 1. szakasz egyensúlyában 10%-os kezdeti C stratégia aránynál több olyan futtatás is volt, ahol a p-típus egyrészt fennmaradt, másrészt az arányuk is kicsit magasabb volt és így a jutalmazás lehetőséget biztosított a p-típusúak számára, hogy terjeszkedjenek. Amikor senki nem kooperált a társadalomban, akkor erre nem volt lehetőség, ezért ott a p-típus kifizetése ugyan megnövekedett a kompenzáció miatt, de nem volt elegendő hatása ahhoz, hogy bármilyen változást okozzon a struktúrában. Ez a jelenség ER hálózatban nem játszik szerepet, ott nagyon hasonló képet kapunk akkor, amikor a kezdeti C stratégia aránya 0% és 10% (1. és 2. melléklet).

Az elemzésből eddig kimaradt, hogy mi történik akkor, amikor a kezdeti C stratégia és t-típus arány is magas. Ekkor tudjuk, hogy az 1. szakasz egyensúlyára érdemi kooperáció marad fenn és az 1. táblázatban bemutatott fokszámmal és jutalommal kapcsolatos hajtóerők pedig továbbra is érvényesek. A különbség az, hogy ebben az esetben a p-típusúak képesek a kizsákmányolásra és emiatt akár kisebb foksámú p-típusú egyének is fennmaradhattak a társadalomban. Az 1. táblázatban látható, hogy ha az egyén fokszáma egységnyivel nő, annak nagyobb a hatása a kifizetésre, mint a jutalom egységnyi növekedése. Tehát a foksám a kifizetések alakulásában egy erősebb hajtóerő. A nagyobb foksámú p-típus egyének inkább a BA hálózatban

voltak jellemzőek, ahol most a p-típusúak között megjelennek a kisebb fokszerűak és így az átlagos kifizetés a jutalom következtében kevésbé olyan hatásos. Ez az oka annak, amit a 6. ábrán láthatunk, hogy a p-típus kifizetése, ugyan még mindig jelentős, de már kisebb mértékben haladja meg a t-típus kifizetését a magasabb kezdeti paraméterek tartományában. ER hálózatban a csúcsok nagyon hasonlóak egymáshoz, nem nagyon van különbség a hálózati pozíció tekintetében, ezért ott ez a jelenség kevésbé húzza vissza a kifizetéseket, mint amennyi előnyt ebből a p-típusúak szereznek azáltal, hogy van C stratégiát játszó szomszédjuk is. Az pedig egy ráadás az egészre, hogy azzal, hogy a p-típusúak C stratégiát játszanak, a hálózatok elkezdnek homogénebbek lenni a stratégia szempontjából, ami minimálisan, de kedvez a t-típusúaknak is.

4. 2. 3. A jutalom kivezetését követő 3. szakasz

A kifizetések kapcsán az utolsó rész, ami még nem került szóba és röviden kitérünk rá, az a jutalom kivezetésének hatása. A 3. szakasz lényegében ugyanaz, mint az 1. szakasz, annyi különbséggel, hogy nem a kezdeti szintről indul a kooperálók és konformisták aránya, hanem onnan, ami létrejött a 2. szakasz egyensúlyában. A jutalom kivezetése már az első alapjátékban befolyásolja az egyéni döntéseket, minden p-típusú D stratégiára vált át és ezáltal közvetett módon tudja befolyásolni a t-típusú szomszédok magatartását. A folyamatokat a 7. ábra mutatja be részletesen a már megszokott formában.



7. ábra: A 3. szakaszban lejátszódó főbb folyamatok

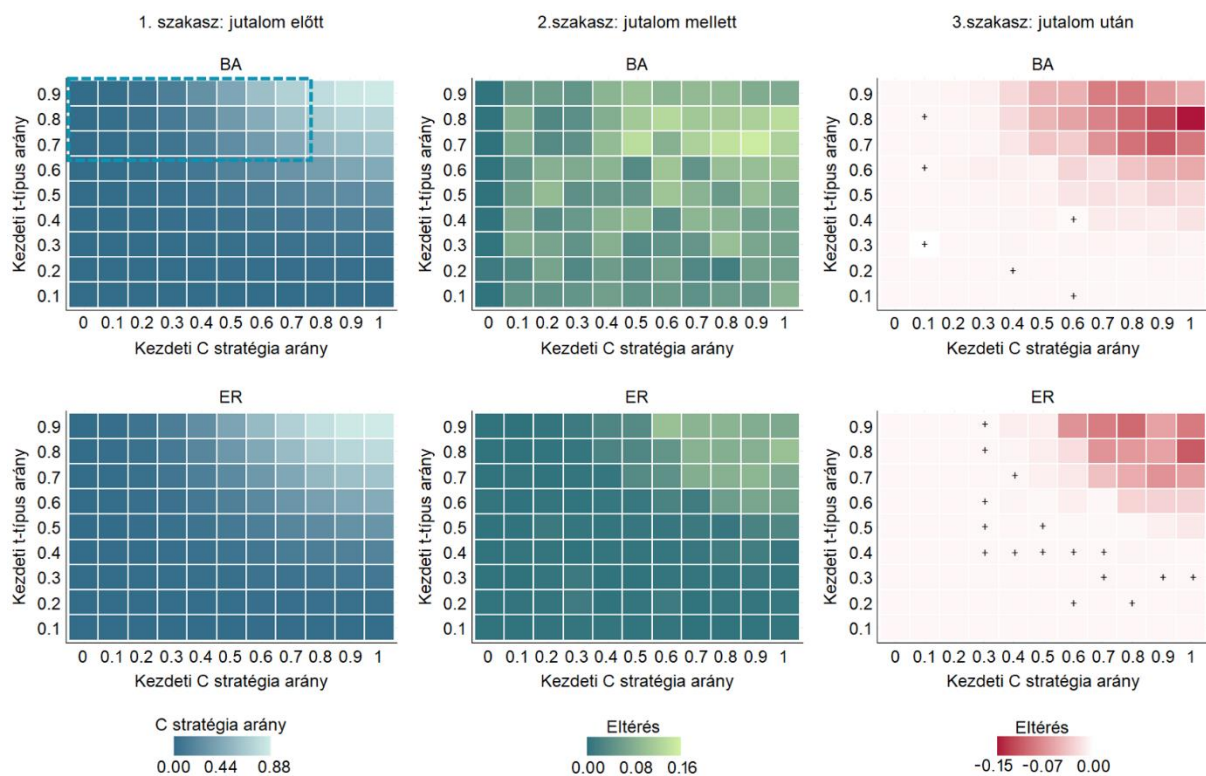
Forrás: saját szerkesztés

BA hálózatban azt kivéve, amikor a kezdeti C stratégia arány 0%, hasonló mintázatot láthatunk, mint az 1. szakaszban, annyi különbséggel, hogy a magasabb induló paraméterek mellett nem nagyon csökken a kifizetések közötti különbség. Az 1. szakaszban a magas induló paramétereknek köszönhetően fennmarad a kooperatív stratégia és ez tette lehetővé a kizsákmányolást a p-típusúak számára. Viszont a jutalom hatására az együttműködés nőtt, de a t-típus arány csökkent. A jutalom kivezetésével a p-típusúak D stratégiára váltanak és ezzel az alapjáték úgy veszi kezdetét, hogy alacsonyabb a t-típus arány és a C stratégia aránya is, aminek következtében az alapjáték végére is alacsonyabb szinten ragad a C stratégia aránya és a kizsákmányolásra is kevesebb lehetőség adódik. Ez okozza tehát, hogy az 1. szakasztól eltérően a magas induló paraméterek mellett nem csökken a kifizetések közötti eltérés. Alacsony induló paramétereknél pedig ugyanazt magyarázza a kifizetések közötti különbséget, mint az 1. szakaszban.

ER-féle szerkezetben, ha a kezdeti C stratégia vagy t-típus arány alacsony, akkor a 2. szakaszban is látható volt, hogy a jutalmazásnak sok hatása nem volt a kifizetésekre és az evolúcióra sem. Mivel a jutalom nem nagyon hozott változást az evolúció tekintetében, ezért a jutalom kivezetése is hasonlóan hat és a kifizetések közel maradnak egymáshoz. A magas kezdeti C stratégia és t-típus aránynál az eltérés a kifizetések között a BA hálózat példáján leírtak magyarázzák. Összességében pedig ez a folyamat-sorozat okozza a 4. ábra jobb oldalán látottakat is, vagyis, hogy mindkét hálózatban a 3. szakaszban is előfordulnak olyan esetek, amikor a t-típus teljesen elterjed a társadalomban. ER hálózatban ez csak a magasabb induló paraméterek mellett jellemző, míg BA hálózatban az egész tartományban látható ez a jelenség.

4. 3. A JUTALMAZÁS HATÁSA AZ EGYÜTTMŰKÖDÉSRE

A 4.2. alfejezetben részletesen áttekintésre kerültek az alapvető folyamatok és ezáltal érthetjük meg, hogy az együttműködési arány az egyensúlyban miért alakul úgy, ahogy. Mindezek tükrében pedig rá is térek a kutatás fő eredményének a tárgyalására. A 8. ábra egyrészt megmutatja, hogy a beavatkozás előtt mekkora együttműködési arány jött létre az egyensúlyban. Másrészt látható, hogy a jutalom bevezetésével az 1. és 2. szakasz egyensúlyában mekkora volt a különbség a kooperálók arányában, vagyis, hogy a jutalom végső soron, rövid távon hogyan hatott az együttműködésre. Harmadszor pedig feltüntettem, hogy az 1. és 3. szakasz egyensúlya között mekkora volt az eltérés, vagyis, hogy a jutalom hosszú távon hogyan befolyásolta a stratégiák egyensúlyát.



8. ábra: A jutalmazás hatása az együttműködésre

Forrás: saját szerkesztés

Mind ER és BA hálózatban a jutalom bevezetése előtt hasonló eredményeket kaptam, miszerint az együttműködés annál nagyobb mértékben marad fenn az egyensúlyi állapotban, minél nagyobb a t-típus és C stratégia aránya kezdetben. Ez az eredmény lényegében megegyezik azzal, amit a korábbi munkánkban tapasztaltunk, hogy érdemi kooperáció csak akkor képes fennmaradni, ha a kezdeti paraméterek értéke legalább 50-60%, minden más esetben a dezertálás van fölényben a társadalomban (Braun-Sebestyén, 2022). Ez a korábbi elemzés rámutat arra, hogy mi is történik az alapjátékban és látható, hogy az alapjáték kimenetelét az itt bekapcsolt evolúciós dinamika sem képes jelentősen megváltoztatni. A t-típusúak kölcsönös együttműködése képes csak fenntartani a C stratégiát a társadalomban. Ha ez már kezdetben is adott, akkor képes fennmaradni, mivel az evolúció a t-típusúakat részesíti előnyben. Viszont, ha az evolúció a p-típusúak felé vezetné a játék dinamikáját, akkor az együttműködés valószínűleg csökkenne a magas kezdeti paraméterek ellenére is. Amikor pedig a kezdeti paraméterek alacsonyak, akkor már az első alapjátékban a C stratégia szinte eltűnik és az evolúció miatt hiába lesz egyre több t-típusú, a maradék C stratégiát játszó egyénnek nincs meg az ereje ahhoz, hogy azt elkezdjék terjeszteni a hálózatban. A 8. ábra vonatkozásában a struktúrák közötti különbségek terén összességében azt mutatják az eredmények, hogy BA hálózatban csak akkor alakult ki átlagosan

nagyobb kooperáció, amikor a kezdeti t-típus arány legalább 70%, míg a C stratégia arány legfeljebb 70% közötti. Szinte minden más esetben ER hálózatban volt nagyobb a fennmaradt kooperálók aránya. A legnagyobb különbség a két hálózati szerkezet között 4,2% az ER javára, amikor a kezdeti t-típus arány 0,5, míg a C stratégia arány 0,9.

Összességében egy egymáshoz nagyon hasonló egyensúlyi helyzetben lévő, azonban szerkezetében mégis eltérő struktúrába került bevezetésre a jutalmazás. ER hálózatban jól látható, hogy a jutalomnak szinte semmilyen ($<1\%$) pozitív hatása nem volt az együttműködésre akkor, amikor a kezdeti paraméterek értéke kisebb, mint 60%, tehát amikor a leginkább szükség lenne rá. Amikor mindkét induló paraméternek az értéke e felett van, akkor az ösztönzési rendszernek köszönhetően átlagosan kb. 8 százalékponttal lett magasabb a kooperálók aránya a társadalomban. A jutalomnak a legnagyobb hatása akkor volt tapasztalható, amikor kezdetben a C stratégia aránya 100%, a t-típus aránya pedig 80%, ekkor 77,6%-ról 88,25%-ra növekedett a kooperálók aránya (a jutalmazás előtt a kezdeti 100%-ról 77,6%-ra csökkent a kooperálók aránya). Ha megnézzük, hogy mi történt BA hálózatban, akkor általánosságban megállapíthatjuk, hogy a jutalmazás ebben a szerkezetben sokkal hatékonyabbnak bizonyult, mert egy kivétellel, amikor a kezdeti C stratégia arány 0%, minden más esetben jelentősebb a növekedés. Itt is látható, hogy az induló paraméterek növekedésével a jutalom egyre nagyobb pozitív tovaryűző hatással bír, azonban ER hálózattal szemben, az alacsony paramétertartományban is már magasabb a növekedés. Ha nem vesszük figyelembe azt a speciális esetet, ahol kezdetben nem volt jelen a kooperáció, akkor az látható, hogy BA szerkezetben a legkisebb hatás is 1,72, míg a legnagyobb 16,12 százalékpont, ahol az együttműködés 57%-ról 73,12%-ra növekedett, ami jelentős mértékű. A jutalmazás hatékonysága a foksámokban rejlik, amiről már korábban írtam a 4.2. alfejezet 1. táblázata kapcsán. Amikor a kezdeti t-típus és C stratégia arány alacsony, akkor az ER szerkezettel szemben BA hálózatban a jutalmazás következtében a p-típus elkezd terjeszkedni és mivel ekkor minden p-típusú C stratégiát játszik, ezért a p-típussal együtt a társadalomban a kooperálók aránya is növekszik. Ez a hatás ER-ben nem tapasztalható. A magasabb paramétertartományban pedig mindkét hálózatban azért nagyobb a jutalmazás hatása, mert ott átlagosan nagyobb mértékben marad fenn a p-típus az egyensúlyra. Amikor a kezdeti C stratégia arány 0%, akkor ER hálózatban a mintázat beleillik az összképbe, míg BA szerkezetnél ezzel szemben kitűnik. Már korábban kifejtettem, hogy ilyenkor BA hálózatban a p-típusúak nem tudnak teret nyerni maguknak és ez magyarázza, hogy ekkor a jutalomnak kisebb, szinte semmilyen hatása nincsen az együttműködésre, míg már 10%-os kezdeti C stratégia arány mellett már egy jelentősebb hatás tapasztalható. Összességében rövid távon a jutalomnak

van, hogy igen jelentős, de olykor igen elenyésző hatása van a kooperációra. Az előbbi esetben nem csak közvetlen, hanem közvetett hatásról is beszélhetünk. Azzal, hogy a p-típusúak kooperálnak, az ő t-típusú szomszédjaikat is képesek kooperációra bírni, hiszen a t-típusúak a szomszédságukban gyakrabban előforduló stratégiát részesítik előnyben.

A jutalmazás együttműködésre gyakorolt hosszú távú hatását a 8. ábra jobb oldali hasábjára mutatja. A 3. szakasz azért értelmezhető hosszú távként, mert egy ösztönzési rendszert nem lehet a végtelenségig fenntartani és végső soron emiatt elemezni szükséges azt is, hogy mi történik akkor, ha ez az ösztönző kikerül a rendszerből. A 8. ábra azt mutatja meg, hogy a jutalom előtti egyensúlyhoz képest a jutalom kivezetése következtében hogyan változott az egyensúlyban az együttműködés aránya. Mindkét hálózatban hasonló tendencia látható, ha a kezdeti paraméterek magasak, akkor az együttműködés csökken. Ez azt jelenti, hogy a jutalmazás visszavonása után az együttműködési szint kisebb lett, mint ami a rendszerben a beavatkozás (jutalom) nélkül létrejött, tehát a jutalmazás hosszú távon negatívan hatott a kooperációra. Hogy ez miért alakul így, arról korábban már írtam a 4.2.2. alfejezet végén, csak más kontextusban. A C stratégia aránya azért fog ilyenkor az eredeti szint alá csökkenni, mert a 2. szakaszban az ösztönzési rendszer a p-típusúak terjeszkedését támogatta. Ha az alapjátékról van szó, akkor már többször is írtam róla, hogy érdemi kooperáció csak akkor jön létre, ha mindkét kezdeti paraméter magas. A 2. szakaszban a C stratégia aránya ugyan növekszik, de a t-típus aránya csökken az egyensúlyra és egy ilyen helyzetben kerül sor a jutalom visszavonására is. Ennek hatására a p-típusúak rögtön átváltanak a D stratégiára és így egy olyan helyzetben találja magát a társadalom, ahol kisebb a t-típus és a C stratégia arány is, mint amekkora szükséges lenne ahhoz, hogy az 1. szakasz egyensúlyi kooperációs arányát fenn tudja tartani. Emiatt tehát a jutalom kivezetése kontraproduktívnak bizonyul hosszú távon. A 8. ábra egy további tanulsága, hogy amikor kezdetben nem volt jelen a kooperáció a társadalomban, akkor a jutalmazás rövid távon csak igen minimális hatást fejtett ki, ami a kompenzáció kivezetése után teljesen el is tűnt. Tehát a jutalmazás nem volt képes egy ilyen helyzetben olyan strukturális változásokat előidézni, aminek következtében az együttműködés fennmaradt volna.

Az eredmények tekintetében érdemi eltérés van a hálózati szerkezetek között, mint ahogy az az ábrán is látható. Egyrészt BA hálózatban a piros árnyalatú terület nagyobb, vagyis nagyobb az a tartomány, ahol már átlagosan érdemi visszaesés következik be. Másrészt a magasabb paramétertartományban a visszaesés, a különbség mértéke is jelentősebb, akár -15 százalékpont is lehet, míg ER-ben csak -11,3 százalékpont. Harmadrészt pedig a kis pluszjelek az ábrán a pozitív értékeket mutatják, ami látható, hogy ER hálózatban gyakrabban fordult elő.

Ekkor, ugyan nagyon kis mértékben (ER-ben $<0,1$, BA-ban $<0,5$ százalékpont), de a jutalmazás kivezetése következtében átlagosan növekedett az együttműködés a beavatkozás előtti esethez képest. Tehát ER hálózatban a jutalmazás kivezetése átlagosan kevésbé befolyásolta negatívan az egyének viselkedését, mint BA hálózatban.

Összességében rövid távon igen kedvezően befolyásolta az egyének viselkedését a harmadik fél általi beavatkozás, amikor a kezdeti t-típus vagy C stratégia arány alacsony volt, ahol a skálafüggetlen szerkezet előnyösebbnek bizonyult. Azonban hosszú távon a jutalmazásnak vagy nem volt szignifikáns hatása egyik hálózatban sem, vagy kontraproduktív volt, amely nagyobb mértékű volt BA hálózatban. A kompenzáció előtti eset eredményeit látva a korábbi kutatások kapcsán tovább tudtam erősíteni azt a tényt, hogy a konformitás elősegíti az együttműködést (Pena et al., 2009a; Szolnoki–Perc, 2015), azonban ehhez továbbra is szükség van arra, hogy a társadalomban már kezdetben magas legyen a kooperáció szintje (Braun-Sebestyén, 2022). A kapott eredmények azonban ellentmondanak annak, hogy a skálafüggetlen struktúra hatékonyabb lenne olyan értelemben, hogy magasabb együttműködést képes elősegíteni. Láthattuk, hogy néhány esetet leszámítva ER hálózatban átlagosan nagyobb együttműködés jött létre. Ettől eltekintve a korábbi kutatásokhoz hasonlóan én is arra jutottam, hogy a jutalmazás önmagában támogatja a kooperáció kialakulását (Cuesta et al., 2007; Sutter–Haiger–Kocher, 2010), de csak rövid távon. A dolgozat célja az volt, hogy megnézzem, hogy az általam javasolt modellkeretben egy jutalmazási mechanizmus képes-e úgy elősegíteni az együttműködést, hogy az ellenálló maradjon. Az intuícióval némileg ellentétesen, de a modell logikájából jól követhető módon arra jutottam, hogy a jutalom hosszú távon éppen, hogy kedvezőtlen a kooperáció szempontjából, mivel az attitűdöket éppen olyan irányba változtatja meg, amely kedvezőtlen a kooperáció jutalmazás nélküli kialakulása/fennmaradása szempontjából. A dolgozatban használt módszertan lényegesen eltér Jimenez et al. (2008) által használt módszertantól, azonban mégis párhuzamot lehet vonni. A szerzők arra jutottak, hogy akár egyetlen kooperátor is képes a jutalmazás következtében úgy betörni a társadalomba, hogy a jutalmazás visszavonása után is fennmaradt az együttműködés, tehát összességében növekedett a kooperáció. Ezzel szemben az általam kapott eredményekben a jutalmazás inkább volt hatástalan, vagy kontraproduktív az eredeti állapothoz képest, tehát a társadalom a jutalmazás visszavonásával ebben az esetben nem bizonyult ellenállónak. Habár néhány esetben kisebb, $0,1$ vagy $0,5$ százalékpontos növekedés tapasztalható volt, de ez igen csekély mértékű.

5. ÖSSZEGZÉS

A dolgozat középpontjában a kooperatív magatartás és az önérdékkövetés közötti kapcsolat megértése áll a fenntarthatóság vonatkozásában, ahol egy többszereplős fogolydilemma játékból indulok ki. A fenntarthatóság egy mindenki felett álló cél, mert csak egy Földünk van és emiatt a fenntarthatóság napjainkban egy rendkívül aktuális téma. A kutatás kulcskérdessé emeli egyrészt a kooperáció jelentőségét, másrészt pedig az önérdékkövető magatartásra épülő ösztönzési rendszerek tervezését és működtetését egyaránt.

Az elemzés során megkülönböztettem két típusú attitűdöt, a társadalom-orientált és a piac-orientált attitűdöt. Az előbbit a konformizmus jellemzi és a hálózati szomszédjainak többsége által választott stratégiát követi, míg az utóbbi a standard fogolydilemma játék racionalista játékosaként viselkedik, vagyis alapesetben D stratégiát játszik. Az attitűdök kapcsán figyelembe vettem, hogy azok mennyire sikeresek és amelyik attitűd sikerebbnek bizonyult, az elkezdett terjeszkedni a társadalomban a sikertelenebb attitűd rovására. Ezt egy evolúciós dinamika, pontosabban a módosított replikátor dinamika vezérelte, ami az attitűd és a társadalom átlagos kifizetését vette figyelembe. Továbbá azért, hogy a t-típusú egyének viselkedése realisztikusabb legyen nem teljes kapcsolathálókat vettem alapul és az elemzést elvégeztem Erdős-Rényi-féle véletlen (ER) és Barabási-Albert-féle skálafüggetlen (BA) hálózatban is. Az ER hálózat egy viszonyítási alapot ad ahhoz, hogy a realisztikusabb, valós társadalmi hálózatokat leíró BA hálózatban kapott eredményeket értékelni tudjam. Végezetül pedig ebben a keretrendszerben egy harmadik fél általi ösztönzési, jutalmazási rendszer bevezetésének rövid és hosszú távú hatásait néztem meg a kooperatív viselkedésre nézve. Tudomásom szerint ez az első kísérlet, ahol egy ilyen modellkeretben kerül elemzésre a jutalmazás és annak kivezetésének együttműködésre gyakorolt hatása.

Az ösztönzési rendszer bevezetése előtt a t-típusú attitűd átlagosan 99,07%-os arányban maradt fenn a társadalomban, ami azt jelenti, hogy több generáción keresztül a t-típus kifizetése jelentősen magasabb volt, mint a társadalom átlagos kifizetése. Ennek ellenére érdemi együttműködés csak akkor jött létre, ha a kezdeti t-típus és C stratégia arány is magas volt. ER hálózatban szinte minden esetben átlagosan magasabb kooperáció jött létre ekkor az egyensúlyban, mint skálafüggetlen szerkezetben. Mivel a jutalmazás közvetlenül az önérdékkövető egyének magatartását befolyásolta, ezért jelentős szerepe van annak, hogy azok mekkora számban voltak képesek fennmaradni az azt megelőző időszakban. Ha kezdetben magas volt az aránya a C stra-

tégiát játszóknak és a t-típusúaknak, akkor a p-típusúak hálózati szerkezettől függetlenül átlagosan nagyobb arányban tudtak fennmaradni. Ebből következik, hogy a jutalmazás bevezetésekor, ahol több p-típusú maradt fenn, ott a jutalmazás is többnyire hatékonyabbnak bizonyult, nagyobb mértékben volt képes növelni az együttműködők arányát. A jutalmazás közvetlen hatása miatt minden p-típusú C stratégiára váltott át, míg közvetetten ez a t-típusú szomszédok stratégiaváltását is képes volt megváltoztatni. A jutalmazás bevezetése és fenntartása az elemzésben rövid távként van definiálva és rövid távon a jutalmazás teljes mértékben pozitív hatással volt az együttműködésre. A beavatkozás BA hálózatban hatékonyabb volt az ER-hez képest, melynek oka egyértelműen a struktúrák közötti különbségből fakad a fokszámok tekintetében. BA szerkezet esetében a jutalom mértéke, valamint a fennmaradó p-típusúak száma és azok fokszáma is átlagosan magasabb volt, mint ER hálózatban. Emiatt a jutalmazás a skálafüggetlen struktúrában elhelyezkedő p-típusúak kifizetését nagyobb mértékben növelte és így az evolúciós dinamika jobban a p-típusúak irányába hajtotta a játékot. Végző soron ennek következtében mindkét hálózati szerkezetben nagyobb teret kaptak az önérdékkövető p-típusú egyének, ami BA-nál jelentősebb volt. Ez pedig előrevetíti a harmadik fél általi beavatkozás hosszú távú hatásait. A jutalmazás kivezetésével a megnövekedett arányú p-típusúak D stratégiára váltanak és emiatt mindkét hálózatban egy olyan helyzet alakul ki, ahol a beavatkozás előtti állapothoz képest alacsonyabb a t-típusúak aránya és a C stratégia arány is, így veszi kezdetét a 3. szakasz. Mivel érdemi kooperáció akkor jön létre, ha a kezdeti C stratégia és t-típus arány is magas és ezek a paraméterek a jutalmazás kivezetésével alacsonyabbak lesznek, mint a beavatkozás előtt, ezért az eredeti állapothoz képest alacsonyabb lesz a kooperáció szintje a társadalomban, tehát a jutalmazás kontraproduktív. A korábbiakban leírt gondolatmenet alapján pedig, mivel BA hálózatban több p-típusú egyén volt, ezért ott a jutalmazás visszavonása erőteljesebben hatott az együttműködés alakulására. Tehát BA hálózatban végül a kooperáció szintje nagyobb mértékben esett vissza az eredeti, beavatkozás előtti állapothoz képest, mint ER hálózatban. Azonban fontos megjegyezni, hogy hosszú távon bármelyik hálózati szerkezetről is legyen szó, ha alaphelyzetben a beavatkozás előtt nem jött létre érdemi együttműködés a társadalom tagjai között, akkor arra a jutalmazásnak nem volt szignifikáns hatása. Viszont, ha egy olyan társadalomban került bevezetésre a jutalmazás, ahol eleve magas volt az együttműködés és a konformisták aránya, akkor ott hosszú távon jelentős mértékű visszaesés következett be.

Ezek az eredmények rámutatnak arra, hogy egy ösztönzési rendszer vagy egy konkrét program, legyen szó például állami támogatásról, nem feltétlenül vezet olyan irányba a társa-

dalmat, amilyen irányt a gazdaságpolitika szereplői célként tűztek ki. A kutatás fő mondanivalója, hogy a döntéshozóknak nem csak a rövid távú hatásokkal, hanem a hosszú távú következményekkel is számolnia kell, mert ezek a beavatkozások megváltoztatják a gazdasági szereplők magatartását. A rövid távon elért eredmények egy olyan látszatot kelthetnek, hogy a beavatkozás sikeres volt, azonban az ösztönzési rendszer eredményeinek értékelésében a hosszú távú hatásokat is figyelembe kell venni, ami a társadalom gondolkodásában, hozzáállásában bekövetkezett változásokból ered.

A dolgozatban bemutatott modellnek és a hozzá tartozó elemzéseknek több ponton mutatkoznak korlátjai. Egyrészt a modell érzékeny a kifizetésekre, hogy azok hogyan viszonyulnak egymáshoz. Habár az attitűdök kifizetéseit normáltam, mégis látható különbség van a kifizetése között, ami a dolgozatban egyértelműen torzít a t-típusúak felé. A jövőben érdemes lenne megnézni azokat az eseteket is, amikor az 1. szakaszban, a beavatkozás előtt a módosított replikátor dinamika hatástalan, illetve amikor a játék a p-típusúak felé torzít. Ekkor egy tisztább képet kaphatnánk az eredményekről, ahol a megválasztott kifizetés-paraméterek torzításának kiszűrésével össze tudnám hasonlítani, hogy a jutalmazás mikor hogyan változtatja meg a játék kimenetelét. További fejlesztési irány, hogy modellhálózatok helyett egy realisztikus társadalmi hálózatban is el lehetne végezni a szimulációkat és lehetne értékelni az eredményeket. A BA hálózat a hatványtörvény tulajdonsága miatt ugyan jól közelíti a társadalmi hálózatok szerkezetét, mégis érdemes lenne egy létező, valós társadalmi hálózatban is elvégezni az elemzéseket, hogy egy realisabb képet kaphassunk. A hálózatok tekintetében a szimulációkat jól kiegészítené, ha lennének analitikusan végigvezetett esetek is, pl. teljes hálózatban. Mindemellett érdemesnek tartom feloldani azt a feltételt, miszerint olyan mértékű jutalmat juttatok a rendszerbe, melynek következtében minden p-típusú C stratégiára vált át. Ennek kapcsán Jimenez et al. (2008) munkája hívja fel a figyelmet arra, hogy a jutalmazást óvatosan kell megtervezni az egyes alkalmazásokhoz, mert ahogy Szolnoki és Perc (2010) is rámutatnak, a magas jutalmazási politikáról nem mindig feltételezhető, hogy az együttműködés növekedéséhez vezetne.

IRODALOMJEGYZÉK

- Axelrod, R. (1980): Effective choice in the prisoner's dilemma. *The Journal of Conflict Resolution*, 24(1) pp. 3-25.
- Axelrod, R. (2000): On Six Advances in Cooperation Theory. *Analyse & Kritik*, 22(1) pp. 130-151.
- Barabási Albert-László – Albert Réka (1999): Emergence of scaling in random networks. *Science*, 286(5439) pp. 509-512.
- Brandt H. – Sigmund, K. (2006): The good, the bad and the discriminator - Errors in direct and indirect reciprocity. *Journal of Theoretical Biology*, 239(2) pp. 183-194.
- Braun Emese – Sebestyén Tamás (2022): Hány fecske csinál nyarat? A nem teljes hálózati szerkezet és az attitűd hatása az együttműködésre. *Közgazdasági Szemle*, 69(7-8) pp. 869-901.
- Bravetti, A. – Padilla, P. (2018): An optimal strategy to solve the Prisoner's Dilemma. *Scientific Reports*, 8(1), article number 1948
- Buskens, V. – Weesie J. (2000): Cooperation via social networks. *Analyse & Kritik*, 22(1) pp. 44-74.
- Cardillo, A. et al. (2010): Coevolution of strategies and update rules in the prisoner's dilemma game on complex networks. *New Journal of Physics*, 12(10), id. 103034
- Clark, K. – Sefton, M. (2001): The sequential prisoner's dilemma: evidence on reciprocation. *The Economic Journal*, 111(468) pp. 51-68.
- Cuesta, J. A. et al. (2007): Rewarding cooperation in social dilemmas. *UC3M Working papers. Economics* we075227, Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Economía
- Erdős Pál – Rényi Alfréd (1960): On the evolution of random graphs. *Publication of the Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences*, Vol. 5. 17-61. o.
- Fu, M. et al. (2021): Promotion of cooperation with loyalty-based reward in the spatial prisoner's dilemma game. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 580.
- Gómez-Gardeñes, J. (2007): Dynamical organization of cooperation in complex topologies. *Physical Review Letters*, Vol. 98(10), id. 108103
- Hardin, G. (1968): The tragedy of the commons. *Science*, 162(3859) pp. 1243-1248.
- Henrich, J. – Boyd, R. (1998): The evolution of conformist transmission and the emergence of between-group differences. *Evolution and Human Behavior*, 19(4) pp. 215-241.
- Hofbauer, J. – Sigmund, K. (1998): *Evolutionary games and population dynamics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, ISBN: 9781139173179
- Hofbauer, J. – Sigmund, K. (2003): Evolutionary game dynamics. *Bulletin of the American Mathematical Society*, 40(4) pp. 479-519.
- Jiménez, R. et al. (2008): Emergence and resilience of cooperation in the spatial prisoner's dilemma via a reward mechanism. *Journal of Theoretical Biology*, 250(3) pp. 475-483.
- Khadjavi, M. – Lange, A. (2013): Prisoners and their dilemma. *Journal of Economic Behavior & Organization*, Vol. 92 pp. 163-175.

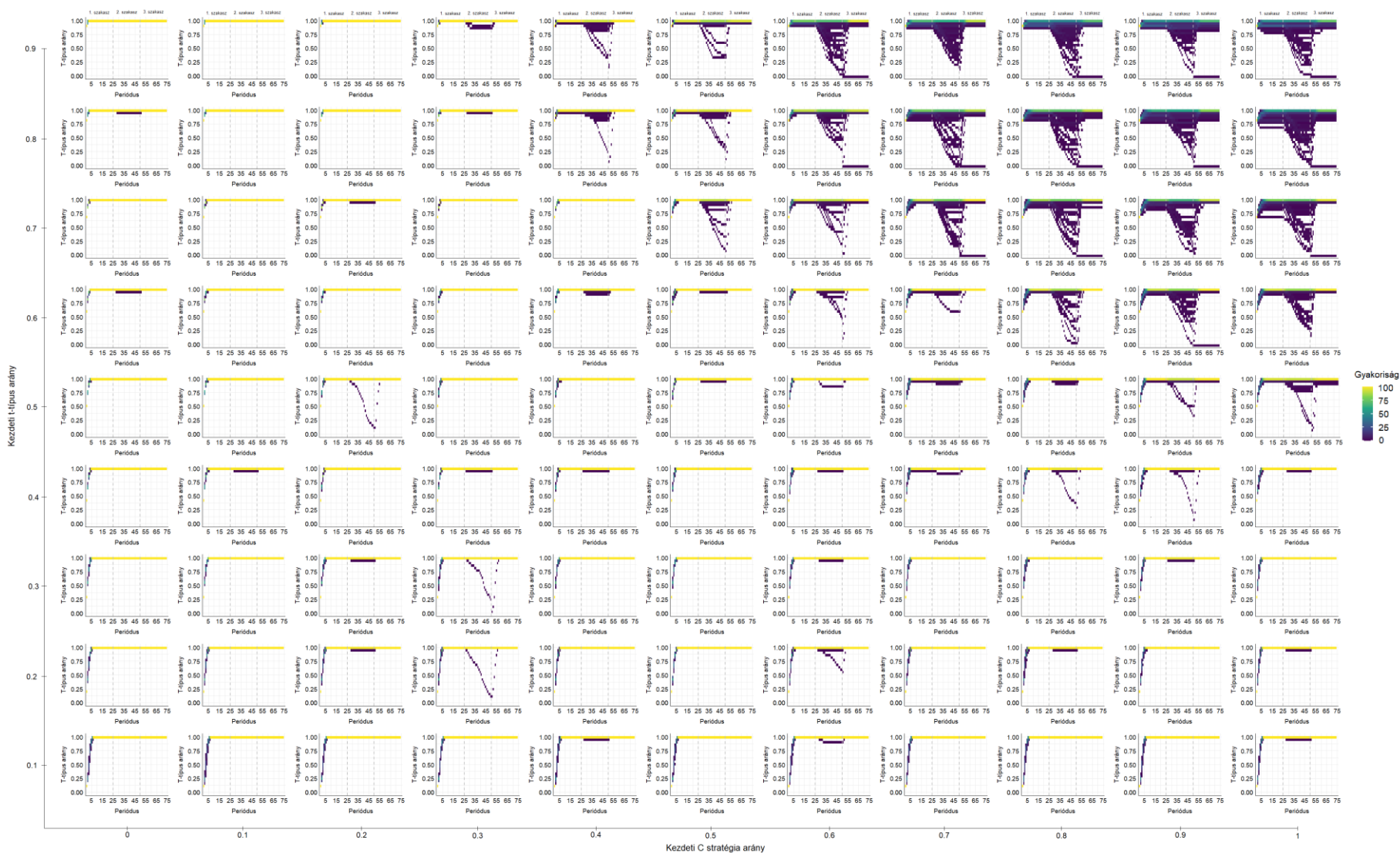
- Li, A. et al. (2020): Evolution of cooperation on temporal networks. *Nature Communications*, 11(2259)
- Liu, X. et al. (2019): The effects of the conformity threshold on cooperation in spatial prisoner's dilemma games, *Europhysics Letters*, 128(1)
- Nowak, M. A. – May, R. M. (1992): Evolutionary games and spatial chaos. *Nature*, Vol. 359 pp. 826-829.
- Ohtsuki, H. – Nowak, M. A. (2006): The replicator equation on graphs. *Journal of Theoretical Biology*, 243(1) pp. 86-97.
- Ohtsuki, H. et al. (2006): A simple rule for the evolution of cooperation on graphs and social networks. *Nature*, Vol. 441. pp. 502-505.
- Ostrom, E. (1990): *Governing the commons: the evolution of institutions for collective action*. Cambridge University Press: Cambridge, UK, ISBN: 9780511807763
- Ostrom, E. et al. (1999): Revisiting the commons: local lessons, global challenges. *Science*, 284(5412) pp. 278-282.
- Ostrom, E. (2000): Reformulating the common. *Swiss Political Science Review*, 6(1) pp. 29-52.
- Pacheco, J. M. – Traulsen, A. – Nowak, M. A. (2006): Active linking in evolutionary games. *Journal of Theoretical Biology*, 243(3) pp. 437-443.
- Pëna, J. (2008): Conformist transmission and the evolution of cooperation, *Artificial Life XI: Proceedings of the 11th International Conference on the Simulation and Synthesis of Living Systems, ALIFE 2008*
- Pëna, J. et al. (2009a): Conformity and network effects in the Prisoner's Dilemma, *2009 IEEE Congress on Evolutionary Computation*
- Peña, J. et al. (2009b): Conformity hinders the evolution of cooperation on scale-free networks. *Physical Review E*, 80(1), id. 016110
- Pusch, A. – Weber, S. – Porto, M. (2008): Impact of topology on the dynamical organization of cooperation in the prisoner's dilemma game. *Physical Review E*, 77(3), id. 036120
- Roca, C. P. – Cuesta, J. A. – Sánchez, A. (2009): Evolutionary game theory: Temporal and spatial effects beyond replicator dynamics. *Physics of Life Reviews*, 6(4) pp. 208-249.
- Santos, F. C. – Pacheco, J. M. (2005): Scale-free networks provide a unifying framework for the emergence of cooperation. *Physical Review Letter*, 95(9), id. 098104
- Sefton, M. – Shupp, R. – Walker, J. M. (2007): The effect of rewards and sanctions in provision of public goods. *Economic Inquiry*, 45(4) pp. 671-690.
- Seung, K. B. – Su, D. Y. – Hyeon-Chai, J. (2017): Duality between cooperation and defection in the presence of tit-for-tat in replicator dynamics. *Journal of Theoretical Biology*, Vol. 430. pp. 215-220.
- Sutter, M. – Haigner, S. – Kocher, M. G. (2010): Choosing the carrot or the stick? Endogenous institutional choice in social dilemma situations. *Review of Economic Studies*, 77(4) pp. 1540-1566.
- Szabó György – Fáth Gábor (2007): Evolutionary games on graphs. *Physics Report*, 446(4-6) pp. 97-216.
- Szolnoki Attila – Perc, M. (2010): Reward and cooperation in the spatial public goods game. *Europhysics Letters*, 92(3), 38003

- Szolnoki Attila – Perc, M. (2015): Conformity enhances network reciprocity in evolutionary social dilemmas. *Journal of the Royal Society Interface*, 12(3)
- Szolnoki Attila – Perc, M. (2016): Leaders should not be conformists in evolutionary social dilemmas. *Scientific Reports*, article number: 23633
- Taylor, P. D. – Jonker, L. (1978): Evolutionarily stable strategies and game dynamics. *Math Biosciences*, 40(1-2) pp. 145-156.
- Weibull, J. (1995): *Evolutionary Game Theory*. MIT Press, Cambridge, ISBN: 9780262231817
- Zhenxi et al. (2018): Rational conformity behavior can promote cooperation in the prisoner's dilemma game. *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 112. pp. 92-96.

MELLÉKLETEK

1. MELLÉKLET: A T-TÍPUS ARÁNYÁNAK ALAKULÁSA ER HÁLÓZATBAN

A T-típus arány alakulása ER hálózatban



2. MELLÉKLET: A T-TÍPUS ARÁNYÁNAK ALAKULÁSA BA HÁLÓZATBAN

A t-típus arány alakulása BA hálózatban

