



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
TÁVKÖZLÉSI ÉS MÉDIAINFORMATIKAI TANSZÉK

KÖLTSÉGHATÉKONY HÁLÓZATI ELJÁRÁSOK TERVEZÉSE ÉS
ELEMZÉSE A JÖVŐ INTERNETÉBEN TÁRSADALMI ÉS
GAZDASÁGI SZEMPONTOK FIGYELEMBE VÉTELÉVEL

Gyarmati László

Tézisfüzet

Tudományos vezető

Dr. Trinh Anh Tuan

Távközlési és Médiainformaticai Tanszék
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Budapest

2011

1. Bevezetés

Az elmúlt évtizedben egy jelentős koncepcionális váltás kezdődött a távközlési iparban. A telekommunikáció korábbi éveiben a kutatók és a mérnökök technológiai jellegű problémákkal szembesültek. Azaz, céljuk olyan rendszerek tervezése és megépítése volt, amelyek a lehető legtöbb adatot a lehető legjobb minőségben képesek egyre több emberhez továbbítani. Eközben olyan jellegű kérdések merültek fel, mint például hogyan növelhető egy hálózati link átbecsátó képessége. Azonban a telekommunikációs ipar és a globális gazdaság fejlődése miatt a technológiai jellegű szempontok helyét a gazdasági-társadalmi szempontok veszik át. Társadalmi szempontok kapcsán egyre több vállalat ismeri fel annak fontosságát, hogy jobban megismerje a felhasználók viselkedését. A felhasználók nem csak használják a cég szolgáltatásait, hanem egyben befolyásolják is a rendszer teljesítőképességét. A tipikus felhasználói viselkedés megismerése elősegítheti, hogy a rendszerek ki tudják szolgálni a felmerülő igényeket megfelelő bővítésekkel. Az infokommunikációs szolgáltatások jelentős és egyre növekvő szerepet játszanak a környezeti változásokban. A technológia segítségével különböző iparág energiafogyasztása csökkenthető, azonban a telekommunikációs rendszerek energiafogyasztása és széndioxid kibocsátása jelentős részt vállal a teljes globális értékekből. A gazdasági szempontok oldaláról minden egyes érintett a saját nyereségében érdekelt, vagyis a nyereségesség érdekében költség minimalizáló és bevétel maximalizáló megoldásokban érdekeltek. A telekommunikációs piacon számos javaslat bukott gazdasági okok miatt, a legismertebb példa erre az IPv6 protokoll. A protokoll az előnyös technológiai megoldásai ellenére mind a mai napig nem terjedt el, holott már 15 éve szabványosították. Ennek oka, hogy az internetet alkotó autonóm rendszerek (*Autonomous Systems*) nem voltak anyagilag érdekeltek az új protokoll verzió bevezetésében. Ezen okok miatt egyre több rendszert már úgy terveznek meg, hogy figyelembe veszik az érintettek profit orientáltságát, például ösztönző mechanizmusokat építenek a rendszerekbe. A társadalmi-gazdasági szempontok fontosságát a kutatási ügynökségek is felismerték: az amerikai NSF FIND [37], az európai Euro-NF [23], a japán AKARI [5], a dél-koreai FIF [24] és a kínai CNGI [20] program is szorgalmazza a társadalmi-gazdasági szempontok alkalmazását a hálózati rendszerek tervezésében.

A disszertációban a telekommunikációs hálózatok három különböző területét vizsgálom társadalmi-gazdasági szempontok figyelembe vételével. Profit-orientált megoldásokat javasolok hálózati útvonalválasztás, internet hozzáférések árazása és adatközpontok esetén. Ezek a tématerületek az internet különböző részén helyezkednek el: a hálózati útvonalválasztás feladata a hálózati rétegben merül fel, az adatközpontokon futnak az ún. *cloud* szolgáltatások, míg az internet előfizetéseket a végfelhasználók vásárolják. Az alábbiakban ezen területeket és a megoldandó problémákat egyesével mutatom be.

A *cloud* szolgáltatások és a végfelhasználók között a gerinchálózatok szállítják az adatokat, ahol a szolgáltatók szintén profit-orientált vállalatok. A hálózatokban

az igényeket el kell vezetni továbbá a forgalmakat meghibásodások ellen is védeni kell. Ezeket a feladatokat a lehető legkevesebb erőforrás felhasználásával kell megoldani fenntartva a hálózat megkívánt rendelkezésre állását. Minden eljárás bizonyos előnyökkel és hátrányokkal jár. A szolgáltató célja lehet az erőforrás foglалás minimalizálása a költséges csökkentésének érdekében. De fontos lehet az is, hogy a forgalmakat a lehető legnagyobb megbízhatósággal továbbítsuk a hálózaton. Bizonyos esetekben gyorsan végrehajtható útvonalválasztási módszerre van szükség, hogy az igényeket valós időben lehessen kezelni. Végül a hálózati késleltetés is lehet kritikus (például beszélgetés jellegű forgalmak esetén). Azaz, sok társadalmi-gazdasági szempontot kell összehangolni egy útvonalválasztási eljárás kiválasztásakor. Bhandari vetette fel először azt, hogy az igényeket több, párhuzamos útvonalon is el lehet vezetni [15]. A több útvonal segítségével csökkenthető a meghibásodás elleni védelem költsége, hiszen csak az igény egy bizonyos hányada eshet ki egy hiba esetén. Az igények több útvonalon történő elvezetését több technológia is támogatja. Az ATM (Asynchronous Transfer Mode) és az MPLS (Multiprotocol Label Switching) hálózatok inverz multiplexálási módszere [34] az igényt felbontja több részre, azokat különböző útvonalon továbbítja a hálózaton, majd a célpontban ezeket ismét összefűzi egy folyamba. A VCat (Virtual Concatenation) [2] és LCAS (Link Capacity Adjustment Scheme) [1] módszerek miatt az ngSDH/SONET (next generation SDH/SONET) és az OTN (Optical Transport Network) [4][3] hálózatok is támogatják a több útvonalat felhasználó módszereket. Számos olyan útvonalválasztási és védelmi módszert javasoltak az utóbbi években, melyek a forgalmat több útvonalon vezetik el, például [9, 11, 30, 35, 32, 33, 31]. Azonban ezek a módszerek vagy túlságosan komplexek, például egészértékű programozással formalizáltak, vagy csak heurisztikus megoldásokat adnak. Emiatt szükség lenne egy módszerre, amely képes kihasználni a több úton elvezetett forgalmak előnyét, ugyanakkor garantálja a minimális erőforrás foglалást adott időn belül.

A profit-orientáltság fontos cél a jövő Internetének hozzáférési hálózatában is. Azaz, az internet szolgáltatók igyekeznek növelni a bevételeiket, melyek az előfizetői díjakból származnak. Az internet szolgáltatók (*Internet Service Providers—ISPs*) ökoszisztémájának fenntarthatóságának érdekében az utóbbi években elkezdtek vizsgálni a szolgáltatók gazdasági kapcsolatait, mind a szolgáltatók közötti, mind a szolgáltatók és az előfizetők közötti interakciókat érintették a kutatások. Ezen munkák (például [29, 17, 39]) játékelméleti eszközök felhasználásával vizsgálták az érintettek árazási döntéseit. A felhasználók viselkedése, elsősorban az előfizetők hűsége, nem csak az újgenerációs hálózatok tervezésében, hanem a szolgáltatások nyereséges üzemeltetésében is fontos szerepet játszik. Az előfizetői hűség szerepére jó példa a hűségnyilatkozat, melyet a szolgáltató és az előfizető köt egymással. A felhasználó egy adott időre garantálja, hogy nem vált szolgáltatót, ezért cserébe kedvezményes áron veheti igénybe az adott szolgáltatást. Ráadásul a kedvezmények mértéke függ a hűségnyilatkozat

időtartamától is, vagyis valóban szoros kapcsolat van az előfizetői hűség és az árképzés között. Számos empirikus tanulmány foglalkozik az internet felhasználók hűségével ([41, 19, 18, 38, 25, 10, 12, 13]) megállapítva, hogy az előfizetők jelentős hányada hűséges a szolgáltatójához. A fenti munkák, valamint a kettő újonnan megjelent cikk ([40, 16]) ráirányította a figyelmet az előfizetői hűségre és annak internet előfizetések árazására gyakorolt hatására. Azonban számos megoldatlan probléma van ezen kutatási területen. Először is, a korábbi kutatások egyszerűen modellezték az előfizetői hűséget, azonban az előfizetői csomagok árkülönbsége fontos szerepet játszik az internet felhasználók döntésében. Másodsor, ezen munkák nem foglalkoztak a dinamikus internet szolgáltatói piacokkal, ahol az előfizetők száma nem állandó, csupán statikus piacokat vizsgáltak.

Míg korábban a hálózatok célja különböző pontok összekötése volt, a jövő internetében a cél szolgáltatások biztosítása a felhasználók számára. Ezek a szolgáltatások, amit például a Google vagy az Amazon üzemeltet, olyan innovatív megoldások, melyek a társadalom számára hasznosak. Az ilyen hálózat alapú szolgáltatásokat szokás *cloud* szolgáltatásoknak is nevezni. Ilyen szolgáltatások üzemeltetésekor különböző feladatokat kell megoldani, többek között alkalmas üzleti modellt kell választani, meg kell oldani az útvonalválasztást és gondosan meg kell tervezni az infrastruktúrát is. Munkám során ez utóbbira koncentrálok, a szolgáltatások infrastruktúrájának alapján az adatközpontok adják. Az adatközpontok rengeteg szervert tartalmaznak, ezért a hálózati topológia kialakítása komoly kihívást jelent adatközpontok esetén, hiszen több ezer gépet kell hatékonyan összekapcsolni. A létező adatközpont szerkezetek kettő tulajdonsága motiválja a munkámat: a skálázhatóság és az energia fogyasztás. Az adatközpontok tulajdonsága különböző metrikák szerint jellemezhető, például számítási, tárolási kapacitás és internet hozzáférési sebesség szerint. Ezek mellett az adatközpontok belső hálózati topológiájának is igen fontos szerepe van hiszen hatalmas mennyiségű adatot kell továbbítani az adatközponton belül. Az adatközpontok hálózata a tudományos közösség figyelmét is elnyerte az utóbbi években. Új architektúrákat javasoltak különböző hálózati topológiákkal, ilyen például többek között a BCube [27, 42], a DCell [28] és a fat-tree [6, 36, 26] struktúra. Habár ezen javaslatok eltér hálózati szerkezettel rendelkeznek, kettő közös tulajdonsággal is bírnak: szimmetrikus topológiában egyforma hálózati eszközöket alkalmaznak. A szimmetrikus szerkezetük miatt ezek adatközpont hálózat mérete csak nagy lépésekben változtatható, emiatt ezen architektúrák nehezen skálázódnak. Ennek következménye, hogy a *rendszerek bővítése költséges* továbbá az *energiafelhasználásuk nem elég hatékony*. Azonban a hálózatok nem csak szimmetrikus szerkezettel rendelkezhetnek. A többnyire aszimmetrikus biológiai hálózatok léte azt bizonyítja, hogy ezen hálózatok kedvező tulajdonságokkal rendelkeznek, hiszen túlélték az evolúciós versenyt. Számos biológiai hálózat közös tulajdonsággal rendelkezik: a

pontjaik foksámeloszlása hatványfüggvényt követ [7]. Ezeket a hálózatokat skálafüggetlen hálózatoknak nevezik. A skálafüggetlen hálózatok kettő olyan tulajdonsággal is rendelkeznek, melyek kedvezőek lennének adatközpont hálózatok esetén is: nagyon kicsi hálózati átmérő [21] és nagy hibatűrő képesség [8]. Ezek alapján felmerül, hogy egy olyan adatközpont hálózati struktúra, amely a skálafüggetlen hálózatok elvén épül fel, javíthatja az adatközpontok energia felhasználásának hatékonyságát.

2. Kutatási célkitűzések

A kutatásom három fő célkitűzése a következő:

- (1) Megtervezni egy olyan módszert, ami a költségek csökkentésének érdekében a hálózati forgalmakat és azok védelmét is több útvonalon vezeti el. A módszer polinomiális futásidőben legyen megoldható, hogy alkalmazható legyen online rendszerekben is.
- (2) Megvizsgálni, hogy milyen hatást gyakorol a bizonytalanság (nem teljes információ és valószínűség alapú stratégiák), egy új piaci szereplő megjelenése és a hosszútávú stratégiák az internet szolgáltatók árképzési stratégiájára, amennyiben az előfizetők hűségesek a piacon.
- (3) Megtervezni és kiértékelni egy adatközpont hálózatot kialakító algoritmust, amely a topológiát a skálafüggetlen hálózatokon alapján építi fel. A módszer őrizze meg a skálafüggetlen hálózatok előnyös tulajdonságait és vegye figyelembe a hálózati eszközök fizikai paramétereit (a hálózati portok számát).

3. Metodológia

A javasolt útvonalválasztási és védelmi eljárásokat lineáris programozás segítségével írtam fel (4.1. fejezet). Egyik módszer sem tartalmaz egész értékű változókat, így a programok polinomiális futásidőben megoldhatóak. A módszerek tulajdonságait szimulációs módszerekkel kvantifikáltam, a bevezetett módszereket a LEMON programcsomag segítségével implementáltam, a lineáris programokat a GLPK és a CPLEX megoldóprogrammal segítségével futtattam. A szimulációkat valós hálózati topológiákon végeztem. Az útvonalválasztási probléma modellezésére gráfelméleti módszereket alkalmaztam.

Az internet szolgáltatók eltérő érdekekkel rendelkeznek, ezért az interakcióikat játékelméleti módszerekkel modelleztem majd elemeztem (4.2. fejezet). Stratégiai

játékok esetén Nash egyensúlyi stratégiákat vezettem le, nem teljes információs esetben Bayes egyensúlyokat fejeztem ki. Egy új internet szolgáltató piacra lépését vezetőkövető (*leader-follower*) Stackelberg játékkal modelleztem, míg az ismételt játékok esetén részjáték tökéletes egyensúlyokat számoltam ki. Az analitikus eredményeket részletes szimulációkkal verifikáltam.

Az adatközpont hálózatot kialakító algoritmus gráfelméleti eszközöket alkalmaz (4.3. fejezet). A megvalósíthatósági feltételt analitikus úton fejeztem ki. A javasolt módszer tulajdonságait szimulációs módszerekkel vizsgáltam.

4. Új eredmények

4.1. Több utas védelem: egy költség minimalizáló útvonalválasztó eljárás

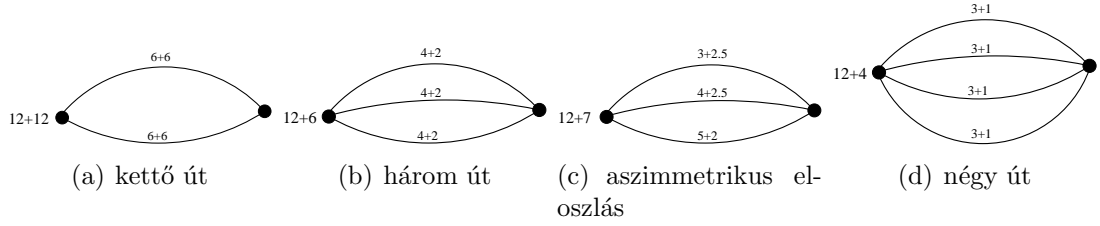
Ebben a téziscsoportban költség minimalizáló útvonalválasztási és védelmi eljárásokat vezetek be, melyek gerinchálózatokban alkalmazhatóak. A módszereket lineáris programmal formalizáltam. A módszerek egyik legfontosabb tulajdonsága, hogy az igény több útvonalon vezetjük el, emiatt kevesebb erőforrást kell védelmi célokra lefoglalni. Ezen elv alapján javasoltam olyan módszereket, melyek képesek speciális meghibásodási eseteket kezelni, illetve korlátozni az adattovábbítás késleltetését.

1. Tézis. [] [J4, J7, C2, C3] Megterveztem egy olyan költség minimalizáló útvonalválasztási és védelmi módszert, amely mind az üzemi mind a védelmi kapacitásokat több útvonalon allokálja. Megmutattam, hogy a javasolt többutas védelmi eljárás (Multi-Path Protection – MPP) a lehető legkevesebb erőforrást foglalja le a hálózatban. A javasolt MPP védelmi módszer lineáris programozással formalizált, ami nem tartalmaz egész értékű változókat, így az algoritmus polinomiális futásidőben megoldható. Megadtam a módszerhez néhány kiegészítést, amikkel az alábbi eseteket lehet kezelni: több hiba elleni védelem, a késleltetés korlátozása, élfüggetlen útvonalak kialakítása. Bevezettem egy olyan gráf transzformációs eljárást, ami lehetővé teszi közös kockázatú élek (Shared Risk Link Group – SRLG) egy csoportjának kezelését is.

A téziscsoport eredményei a hálózati operátorok költségét csökkentik, a feladatot az alábbiak szerint modellezhetjük. A $\mathcal{N}(V, E, B)$ hálózat pontokból $i \in V$, irányított élekből $ij \in E$, ahol $i, j \in V$ és élkapacitásokból $B_{ij}, \forall ij \in E$ áll. $V^{\rightarrow j} \subset V$ és $V^{j \rightarrow} \subset V$ jelöli a pontok azon halmazát, melyekből tart él j -be, illetve vezet él j -ből. A kapacitás lefoglalás egységnyi költsége az ij élen c_{ij} . A $o \in O$ igények alkotják az O forgalmat, az igényeket a $o(s, t, b, a, d)$ ötössel írhatjuk le, ahol s a forrás t a cél, b az igényelt sávszélesség, a az igény érkezésének, míg d az igény távozásának időpontja.

A cél a rendszerbe egyesével érkező igények elvezetése és védelme a hálózatban a lehető legkevesebb erőforrás felhasználásával. Azaz, az üzemeltető nyeresége a csökkentett költségek miatt növekedik. Az útvonalak száma és hossza között egy döntéshelyzet van a költségek minimalizálása során. Egyrészt, ahogy az útvonalak száma (k) növekszik, a védelem (költség) hatékonysága folyamatosan nő, kevesebb erőforrást használ fel a módszer. Másrészt, több útvonal felhasználása esetén növekszik az utak hossza is, ezért növekszik az igény átlagos úthossza növelve az teljes költséget.

1.1. Tézis. [] [J4, C2] Bevezettem egy költség minimalizáló útvonalválasztási és védelmi eljárást, a többutas védelmet (Multi-Path Protection – MPP), ami a hálózatban



1. ábra. A több-utas védelmi eljárás illusztrációja: az üzemi és védelmi kapacitások az utak számának függvényében

a lehető legkevesebb erőforrást foglalja egy lineáris program segítségével. A módszer továbbá képes a forgalom részleges védelmére is, így a védelemre fordított költséget tovább csökkenthetik a hálózat üzemeltetői.

A javasolt többutas védelmi módszer estén az igényt az alábbi lineáris programmal lehet elvezetni, illetve védeni:

Változók:

$x_{ij} \geq 0$ üzemi folyam az $ij \in E$ élen

$y_{ij} \geq 0$ védelmi folyam az $ij \in E$ élen

f_{max} a legnagyobb kapacitás ami kiveshet a hálózatban

Célfüggvény:

$$\min \sum_{\forall ij \in E} c_{ij} (x_{ij} + y_{ij}) \tag{1}$$

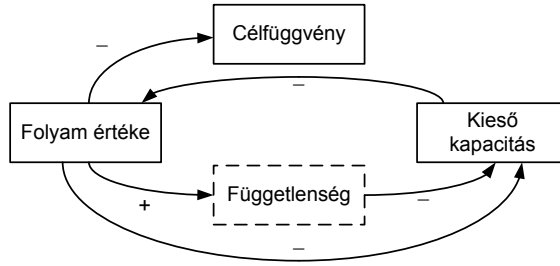
Korlátok:

$$\sum_{\forall i \in E \rightarrow j} x_{ij} - \sum_{\forall k \in E^{j \rightarrow}} x_{jk} = \begin{cases} -b & \text{ha } j = s \\ 0 & \text{egyébként} \\ b & \text{ha } j = t \end{cases} \quad \forall j \in V \tag{2}$$

$$\sum_{\forall i \in E \rightarrow j} y_{ij} - \sum_{\forall k \in E^{j \rightarrow}} y_{jk} = \begin{cases} -f_{max} & \text{ha } j = s \\ 0 & \text{egyébként} \\ f_{max} & \text{ha } j = t \end{cases} \quad \forall j \in V \tag{3}$$

$$x_{ij} + y_{ij} \leq f_{max} \quad \forall ij \in E \tag{4}$$

$$x_{ij} + y_{ij} \leq B'_{ij} \quad \forall ij \in E \tag{5}$$



2. ábra. A több-utas védelmi eljárás hatásmechanizmusa, a célfüggvény a független utak számának növelésével csökkenthető

d darab hiba elleni védelem esetén az alábbi korlátot kell használni a (3) korlát helyett:

$$\sum_{i,l} y_{ij}^{(l)} - \sum_{k,l} y_{jk}^{(l)} = \begin{cases} -df_{max} & \text{ha } j = s \\ 0 & \text{egyébként} \\ df_{max} & \text{ha } j = t \end{cases} \quad \forall j \quad (6)$$

A többutas védelmi eljárások költség minimalizálása a 2 ábrán látható elv szerint működnek. A módszer egy visszacsatoló mechanizmuson alapul. A lineáris program célja a lefoglalt kapacitások költségének minimalizálása, ami a folyam értékének csökkentésével érhető el. A folyam értéket csupán a védelemre fordított rész (f_{max}) csökkentésével lehet elérni. Hogyan tehető ez meg? Ha a folyamat több, független útvonalon osztjuk szét, akkor az egyes éleken lévő kapacitások csökkenthetőek, így a teljes védelemre fordított folyam csökkenthető.

1.2. Tézis. [] [C3] Javasoltam egy módosított védelmi eljárást, a javított többutas védelmi módszert (Improved Multi-Path Protection – IMPP), ami az erőforrás foglalás költségét gyorsabban tudja minimalizálni, mert fele annyi változót használ, mint az eredeti MPP módszer. Bevezettem továbbá egy gráf transzformációs eljárást, amivel az IMPP képes az SRLG-k egy csoportját kezelni, azokat, amikor az SRLG-be tartozó élek csatlakoznak egymáshoz legalább egy pontban. Ezen kívül javasoltam további korlátokat is, melyek elősegítik, hogy az IMPP módszer kettő, SRLG-független útvonalat alakítson ki.

Az IMPP módszer lineáris programja a következő, ami bizonyos SRLG eseteket is képes kezelni:

Változók:

$x_{ij} \geq 0$ folyam az $ij \in E$ élen
 f_{max} a legnagyobb kapacitás, ami kieshet
 $L = \{L^1, \dots, L^p\}$ SRLG-k a transzformált gráfban
Célfüggvény:

$$\min \sum_{\forall ij \in E} c_{ij} x_{ij} \quad (7)$$

Korlátok:

$$\sum_{\forall i \in E \rightarrow j} x_{ij} - \sum_{\forall k \in E^j \rightarrow} x_{jk} = \begin{cases} -b - f_{max} & \text{ha } j = s \\ 0 & \text{egyébként} \\ b + f_{max} & \text{ha } j = t \end{cases} \quad \forall j \in V \quad (8)$$

$$x_{ij} \leq f_{max} \quad \forall ij \in E \quad (9)$$

$$x_{ij} \leq B'_{ij} \quad \forall ij \in E \quad (10)$$

$$\sum_{\forall ij \in L^g} l_{ij}^g \cdot x_{ij} \leq f_{max} \quad \forall g = 1, \dots, p \quad (11)$$

Opcionális korlátok:

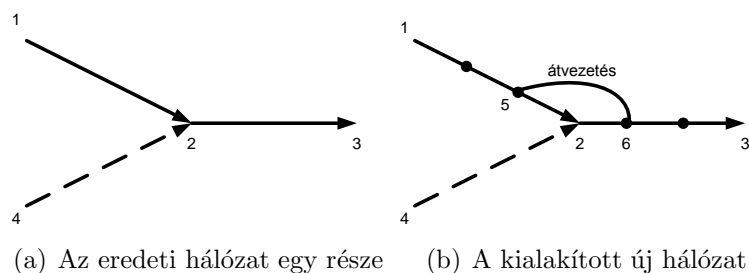
$$b \leq f_{max} \quad (12)$$

$$x_{ij} = 0 \quad \text{if } B'_{ij} < b \quad \forall ij \in V \quad (13)$$

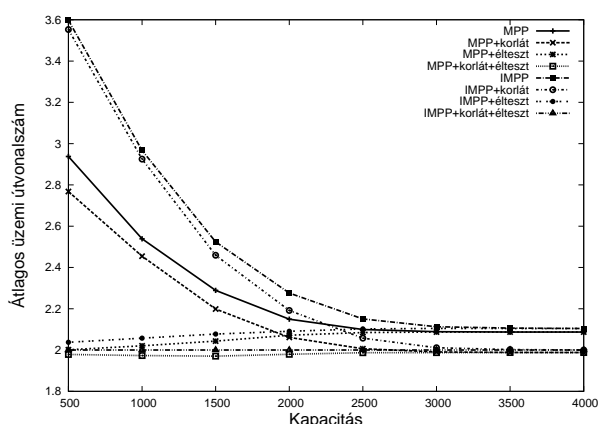
Azért, hogy az SRLG-k egy csoportja kezelhető legyen lineáris programmal, javasoltam egy gráf transzformációs modellt. Egy SRLG azon éleit, melyek legalább egy pontban kapcsolódnak egymáshoz, több élre kell felbontani. Minden SRLG-be tartozó élből három élt kell előállítani kettő új pont felvételével.

A gráf transzformációs eljárást a 3 ábrán lévő példán illusztráltam, ami a hálózat egy részét mutatja. A sima vonallal jelölt élek tartoznak az SRLG-be. Amikor egy b értékű folyam áthalad az 1–2–3 pontokon, az SRLG-s élek kapacitásának összege $2b$ lesz (a lineáris program (11) korlátja). Azonban egy hiba esetén csak b értékű kapacitás esik ki. A modell legfontosabb része az ún. átvezető élek alkalmazása, ami a kialakított virtuális pontokat köti össze (5 és 6). Ez az él az SRLG-be tartozik, azonban a kapacitása levonódik az SRLG teljes kapacitásából, azaz a példában a folyam értéke csak b lesz. Megjegyzem, hogy a modell optimális erőforrás foglalat csak azokban az esetekben eredményez, ahol az SRLG élei összeköttetésben állnak. Más típusú SRLG-k esetén is használható a módszer, de nem garantált, hogy az optimális lesz.

A bevezetett opcionális korlátokkal (12 és 13) az útvonalak száma befolyásolható. Ha mindkettő korlátot alkalmazzuk, akkor minden esetben pontosan kettő független



3. ábra. Az SRLG kezelést lehetővé tevő gráf-transzformáció illusztrációja



4. ábra. Az üzemi utak száma néhány MPP módszer esetén, a kiegészített IMPP esetén mindig kettő útvonal adódik

útvonalat állít elő a módszer. Szimulációk alapján kifejeztem az útvonalak számát néhány MPP módszer esetén, az eredmények a 4 ábrán láthatóak.

1.3. Tézis. [] [J7] Megadtam a többutas védelmi eljárás útvonal-él változatát annak érdekében, hogy az adatforgalom késleltetése, ami egy fontos társadalmi-gazdasági szempont, szabályozható legyen. Az alkalmazható útvonalak előzetes kiválasztásával lehet szabályozni az üzemi és védelmi utakat. Az út alapú többutas védelmi eljárás (Path-based Multi-Path Protection – PMPP) az alkalmazható utak számának növelésével megközelíti a MPP módszer optimális megoldását.

A PMPP módszer lineáris programja a következő:

Változók:

$$x_p \geq 0 \quad \text{folyam a } p \text{ útvonalon}$$

$$f_{max} \geq 0 \quad \text{a legnagyobb kapacitás, ami kieshet}$$

Állandók:

$$\delta_{ep} = \begin{cases} 1 & \text{ha az } e \text{ él a } p \text{ út része} \\ 0 & \text{egyébként} \end{cases}$$

Célfüggvény:

$$\min \sum_{\forall p \in P} \sum_{\forall e} x_p \delta_{ep} c_e \quad (14)$$

Korlátok:

$$\sum_{\forall p \in P} x_p = b + f_{max} \quad (15)$$

$$\sum_{\forall p \in P} x_p \delta_{ep} \leq f_{max} \quad \forall e \in E \quad (16)$$

$$\sum_{\forall p \in P} x_p \delta_{ep} \leq B'_e \quad \forall e \in E \quad (17)$$

Opcionális korlátok:

$$b \leq f_{max} \quad (18)$$

$$x_p = 0 \quad \text{if } \exists e \in p : B'_e < b \quad \forall p \in P \quad (19)$$

A lineáris program csak az alkalmazható útvonalakat használja, azokat ami a P útlistán benne vannak (például azok az utak, amik n élnél kevesebbet tartalmaznak). Míg az eredeti MPP módszer esetén minden lehetséges útvonalat fel lehetett használni, addig a PMPP esetén csak az útvonalak egy részhalmaza használható. Ebből következik, hogy ha egyre több útvonal használata engedélyezett a PMPP módszer esetén, akkor az eljárás egyre jobban megközelíti az MPP módszer minimális erőforrás foglалását.

4.2. Internet hozzáférés árazása hűséges felhasználók esetén

A felhasználói hűség, mint a felhasználói viselkedés egy része, hatással van az internetszolgáltatók (*Internet Service Providers*–ISP) árképzési stratégiáira. Ebből kifolyólag vizsgáltam a helyi internetszolgáltatók árazási stratégiáját hűséges felhasználók esetén. A továbbiakban alkalmazott jelöléseket a 1 táblázat tartalmazza.

2. Tézis. *[[J2, J3, C5, C6] Három esetben javasoltam árképzési stratégiákat internetszolgáltatóknak hűséges felhasználók esetére. Először megvizsgáltam az árképzést bizonytalanság esetén, ahol a szolgáltatók nem rendelkeznek teljes információval. Másodszor megmutattam milyen eljárást kell alkalmazni, ha egy új szolgáltató megjelenik a piacon. Harmadszor hosszútávú árképzési stratégiákat vizsgáltam ahol a szolgáltatók figyelembe veszik döntésük hosszú távú hatását.*

Bevezettem egy új felhasználói hűségmodellt, ami a szolgáltatók árainak különbségén alapul. d jelölje az árkülönbséget, egy előfizető szolgáltatót vált, ha létezik olyan szolgáltató, akinek az ára legalább d -vel kevesebb, mint a felhasználó jelenlegi előfizetési ára. A keresletet konstans függvényvel modelleztem, a felhasználók előfizetnek az internetre, ha az ár kevesebb, mint α . Ezen ár fölött senki sem vásárol előfizetést.

Néhány feltételezéssel éltem az ISP árazási probléma során. Feltettem, hogy a szolgáltatók átalánydíjas árazást alkalmaznak, mert egy forgalom utáni árazási szisztéma túl költséges lenne a szolgáltatóknak. Továbbá feltettem, hogy a keresleti függvény rugalmatlan az α határárig, ez a fejlett országokban reális feltevés. A szolgáltatók nem tudják differenciálni az előfizetőiket, mindenki ugyanazon az áron vásárol előfizetést. Végül feltettem, hogy a szolgáltatók racionálisan viselkednek, profitmaximalizáló stratégiát választanak.

4.2.1. Stratégiák bizonytalanságok esetén

Bizonytalanságon kettő különböző dolgot érthetünk az internetszolgáltatók árképzése kapcsán. Egyrészt a szolgáltatók kevert stratégiákat alkalmazhatnak, mert nem feltétlenül létezik tiszta stratégia. Ekkor a szolgáltatók bizonyos valószínűség-eloszlás

1. táblázat. Jelölések

l_i	az ISP_i hűséges előfizetői
p_i	ISP_i hozzáférési árai
d_i	árkülönbség, mely esetén az ISP_i előfizetői már nem hűségesek
α	legmagasabb ár, melyen az internet hozzáférés értékesíthető
c	előfizetőnkénti költség
Θ	a szolgáltatók jövőbeli döntésének súlya

szerint képezik az áraikat. Másrészt egy szolgáltató csak a saját előfizetőinek számát ismeri, a többi ISP előfizetői bázisa, valamint az előfizetők árérzékenysége nem ismert számára. A szolgáltatók csak a becsléseik alapján árazhatnak, ami szintén bizonytalanságot eredményez.

A. játék. [Kettő játékos internetszolgáltatói árképzési játék árkülönbségfüggő előfizetői hűség esetén, G_A] Tekintsünk egy helyi internet hozzáférési piacot, ahol kettő internetszolgáltató létezik. A szolgáltatók árképzési játéka az alábbiak szerint modellezhető:

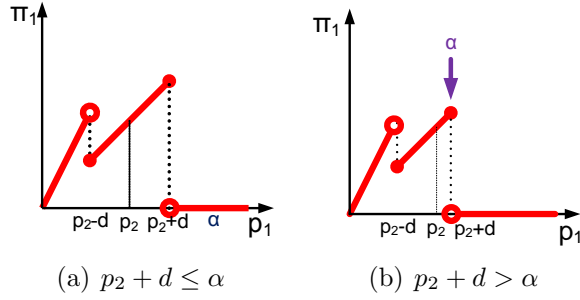
- **Játékosok:** az internetszolgáltatók, $i = 1, 2$; az ISP_i l_i hűségű előfizetővel rendelkezik
- **Stratégiák:** az előfizetés ára, ISP_i döntése $p_i \in [0, \alpha]$; a játékosok egyszer játszanak, stratégiai játék
- **Kifizetési függvény:** az ISP_i kifizetése

$$\Pi_i = \begin{cases} (l_i + l_j)p_i & \text{if } p_i < p_j \text{ and } |p_i - p_j| > d_j \\ l_i p_i & \text{if } |p_i - p_j| \leq d_i \\ 0 & \text{if } p_i > p_j \text{ and } |p_i - p_j| > d_i \end{cases} \quad (20)$$

A 5. ábra két esetre szemlélteti a kifizetési függvényt (20 egyenlet); az ISP_1 kifizetését ábrázoltam miközben az ISP_2 ára állandó marad. Az 5(a). ábra esetén a határár nem kevesebb, mint az ISP_2 ára és az árkülönbség. $p_2 - d$ árig az ISP_1 rendelkezik az összes előfizetővel, a kifizetése arányos az árral. Ha az ISP_1 ára nagyobb, mint $p - d$ de kisebb, mint $p + d$, akkor az ISP_1 csak a saját előfizetőinek szolgáltató. Ha az ISP_1 túl magas árat alkalmaz (nagyobbat, mint $p_2 + d$), akkor az ISP_1 nem jut bevételhez, mert az összes előfizetője a másik szolgáltatót választja inkább. Az 5(b). ábra azt az esetet mutatja, amikor a határár kisebb, mint $p_2 + d$. Ekkor az ISP_1 megtartja az előfizetőit mindaddig, amíg α -nál kisebb árat alkalmaz. Az ábrákon az első egyenes rész legmagasabb pontja alacsonyabb, mint a másodiké, mert a bevételek az árakkal arányosak. Azonban más eset is előfordulhat, például ha az ISP_2 sokkal több előfizetővel rendelkezik, hiszen ekkor alacsonyabb áron is magasabb bevételre tehet szert az ISP_1 .

2.1. Tézis. [Internet előfizetés árazás egyensúlyi analízise árkülönbség függő előfizetői hűség esetén] [J3, C5] Analitikusan megmutattam, hogy

- (i) a G_A játék nem-teljes információ esetén, amikor ISP_i ismeri α, d, l_i értékeket és egy ismert sejtéssel rendelkezik l_j értékének eloszlásáról, egyetlen tiszta Bayes-egyensúlyi stratégiaponttal rendelkezik (α, α) értékekkel, ahol a kifizetések $l_1 \alpha$,



5. ábra. A kifizetési függvény illusztrációja

$l_2\alpha$ ha teljesül, hogy :

$$\frac{\mathbf{E}l_2}{l_1 + \mathbf{E}l_2} \leq \frac{d}{\alpha} \quad (21)$$

$$\frac{\mathbf{E}l_1}{\mathbf{E}l_1 + l_2} \leq \frac{d}{\alpha} \quad (22)$$

Továbbá kifejeztem a Bayes-egyensúly (α, \dots, α) létezésének feltételét a G_A általános esetére, ahol N szolgáltató létezik:

$$\forall i : 1 - \frac{l_i}{l_i + \sum_{j \neq i} \mathbf{E}l_j} \leq \frac{d}{\alpha} \quad (23)$$

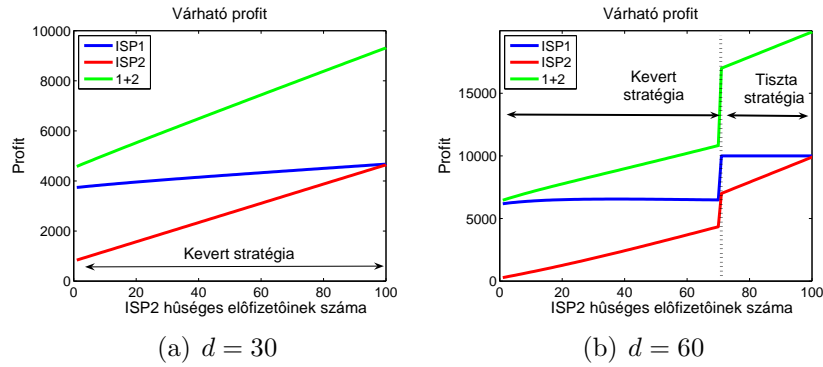
(ii) (α, α) a G_A Nash-egyensúlyi pontja ha a szolgáltatók eltérő hűségű előfizetőkkel rendelkeznek (d_1 és d_2), ha

$$\frac{l_i}{l_i + l_j} \leq \frac{d_i}{\alpha} \quad i = 1, 2 \quad (24)$$

Megmutattam továbbá, hogy ha léteznek nem hűséges előfizetők is a piacon, akkor a játék nem rendelkezik tiszta Nash egyensúlyi ponttal, vagyis a szolgáltatók nem tudják a kifizetésüket tiszta stratégiával maximalizálni.

(iii) a G_A játék, ha nem létezik tiszta egyensúly, a következő, eloszlásfüggvénnyel megadott kevert egyensúlyi stratégiával rendelkezik:

$$F_i(p) = \begin{cases} 0 & p_i < \frac{l_i}{l_i + l_j}d \\ \frac{p - \frac{l_i}{l_i + l_j}d}{\alpha - \frac{l_i}{l_i + l_j}d} & \frac{l_i}{l_i + l_j}d \leq p_i \leq \alpha \\ 1 & \alpha < p_i \end{cases} \quad (25)$$



6. ábra. Várható profit az ISP₂ előfizetős számának függvényében

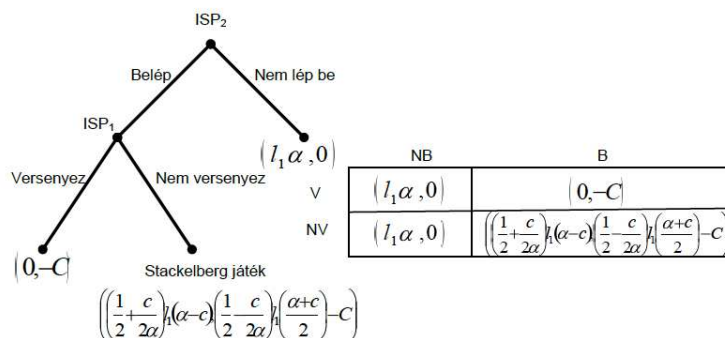
A 6. ábra a hűséges előfizetők számának a várható kifizetésekre gyakorolt hatását mutatja. Az egyes szolgáltatók és az összes nyereséget ábrázoltam a grafikonon. A 6(a). ábra esetén a minimális árkülönbség 30, míg a 6(b). ábra esetén 60 volt. Az árkülönbség befolyásolja a várható nyereségeket. Kis értékek esetén az egyenes szakaszok azt mutatják, hogy a szolgáltatók kevert stratégiát alkalmaznak, az ISP₂ nyeresége a növekvő előfizetős szám miatt jobban növekedik. A 6(b). ábra ugrását stratégiaváltás eredményezi, onnantól tiszta stratégiát alkalmaznak az előfizetők.

4.2.2. Dinamikus piac

Megvizsgáltam az internet hozzáférés árazási problémáját olyan esetre, amikor egy új szolgáltató belép a helyi piacra. A belépési helyzetet szekvenciális játékkal modelleztem. Először a belépő szolgáltató dönt belép-e a piacra. Amennyiben belép, a már piacon lévő szolgáltató kettő lehetőség közül választhat: alacsony árat alkalmaz, hogy az összes előfizetőjét megtartsa, vagy profit maximalizáló stratégiát alkalmaz.

B. játék. [Internet előfizetés árazása dinamikus piacon, G_B] A helyi internet-szolgáltató piacot az alábbiak szerint modellezem. A kereslet egy α határárig egyenletes. Minden szolgáltató rendelkezik hűséges előfizetővel, ISP_{*i*} l_i előfizetővel, nincsen olyan felhasználó, aki ne rendelkezne szolgáltatóval. A felhasználók árkülönbségfüggő hűségét egy lineáris függvénnyel modellezem, ISP_{*i*} $L_i = \frac{p_i - p_j}{\alpha} l_i$ előfizetőt elveszít, ha ISP_{*j*} ára alacsonyabb ($p_j < p_i$). Az internet szolgáltatás egységára c . A játék formális definíciója az alábbi:

- **Játékosok:** a szolgáltatók, ISP₁ a már piacon lévő szolgáltató l_1 előfizetővel, ISP₂ a belépő
- **Stratégiák:** ISP₂ eldönti, hogy belép-e a piacra, ezután a szolgáltatók meghatározzák az internet előfizetés árát, az ISP_{*i*} döntése $p_i \in [0, \alpha]$, a szolgáltatók



7. ábra. A belépési játék extenzív és stratégia formája

csak tiszta stratégiát alkalmazhatnak, egyszeri Stackelberg-féle leader-follower játékot játszanak

- **Kifizetési függvény:** az ISP_i kifizetése

$$\Pi_i(p) = p_i \cdot l_i \quad (26)$$

- **Információ:** teljes

A 7 ábrán a G_B játékot illusztráltam a kifizetések extenzív és stratégiai formájával együtt. Látható, hogy az ISP_1 fenyegetése (c ár alkalmazása) nem hiteles, hiszen a másik stratégiával nagyobb kifizetésre tehet szert. Azaz, ha ISP_2 -nek megéri belépni a piacra, a szolgáltatók Stackelberg-féle *leader-follower* árképzési játékot fognak játszani ahol ISP_1 van a vezető szerepben, míg ISP_2 a követő. Először tehát ISP_1 határozza meg az árat, miután kiderült, hogy egy jól szereplő belép a piacra, majd ezután választ ISP_2 . ISP_2 a belépésről a megszerzhető felhasználók száma alapján dönt, ha a belépés költségénél C -nél több lesz a bevétele, akkor belép a piacra.

2.2. Tézis. [[J2, C5] Levezetem árképzési stratégiákat internet szolgáltatóknak

- (i) a G_B árazási játék esetén, ahol egy új szolgáltató egy monopolista piacra lép be. Ekkor a Stackelberg egyensúlyi árak és a piaci részesedés az alábbiak:

$$\begin{aligned} p_1^S &= \alpha & p_2^S &= \frac{\alpha}{2} + \frac{c}{2} \\ l_1^S &= \left(\frac{1}{2} + \frac{c}{2\alpha}\right) l_1 & l_2^S &= \left(\frac{1}{2} - \frac{c}{2\alpha}\right) l_1 \\ \Pi_1 &= \left(\frac{1}{2} + \frac{c}{2\alpha}\right) l_1(\alpha - c) & \Pi_2 &= \left(\frac{1}{2} - \frac{c}{2\alpha}\right) l_1 \left(\frac{\alpha}{2} + \frac{c}{2}\right) \end{aligned}$$

(ii) a G_B árazási játék esetén, ahol az új ISP egy többszereplős piacra lép be, ahol $i = 1, \dots, n$ szolgáltató van. A számítások a következő implicit Stackelberg egyensúlyi árakra vezetnek:

$$p_k^* = \frac{(2\alpha + c) \sum_i l_i + \sum_{i \neq k} l_i p_i}{2 \sum_i l_i + l_k} \frac{1}{2} + \frac{c}{2} \quad k = 1, \dots, N \quad (27)$$

$$p_j^* = \frac{c}{2} + \frac{\sum_i l_i p_i}{2 \sum_i l_i} \quad (28)$$

ahol az egyensúlyi piaci részesedés az alábbi:

$$l_i^* = \left(1 - \frac{p_i^* - p_{n+1}^*}{\alpha}\right) l_i \quad i = 1, \dots, N \quad (29)$$

$$l_j^* = \sum_i \frac{p_i^* - p_{n+1}^*}{\alpha} l_i \quad (30)$$

Az egyensúlyi árak egy lineáris egyenletrendszerre vezetnek a többszereplős piaci esetben, ahol a változók a szolgáltatók árai. A Stackelberg internet hozzáférés árazási játék egyensúlyi árai megoldják az alábbi lineáris egyenletrendszert:

$$\begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} \frac{\sum_{i \neq 2} l_i}{2 \sum l_i - l_2} & \dots & -\frac{1}{2} \frac{\sum_{i \neq n} l_i}{2 \sum l_i - l_N} & 0 \\ \vdots & \ddots & & \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2} \frac{\sum_{i \neq 1} l_i}{2 \sum l_i - l_1} & \frac{1}{2} \frac{\sum_{i \neq 2} l_i}{2 \sum l_i - l_2} & \dots & 1 & 0 \\ \frac{l_1}{2 \sum l_i} & \frac{l_2}{2 \sum l_i} & \dots & \frac{l_N}{2 \sum l_i} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1^* \\ \vdots \\ p_N^* \\ p_j^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \frac{(2\alpha + c) \sum l_i}{2 \sum l_i - l_1} + \frac{c}{2} \\ \vdots \\ \frac{1}{2} \frac{(2\alpha + c) \sum l_i}{2 \sum l_i - l_N} + \frac{c}{2} \\ \frac{c}{2} \end{pmatrix}$$

4.2.3. Hosszútávú stratégiák

Az eddigi eredményeim a szolgáltatók *rövidtávú* interakcióira vonatkoztak. A gyakorlatban azonban az internet szolgáltatóknak figyelembe kell vennie az árazási döntések *hosszútávú* hatását is. Ez különösen fontos, ha a piaci helyzet is változik, például egy új szolgáltató megjelenik. Ezért vizsgáltam az internet szolgáltatók hosszútávú árképzési stratégiáit olyan helyi piacokon, ahol létezik előfizető hűség.

Az internet szolgáltatók általában ismételten vesznek részt az árképzési helyzetekben, például minden hónapban megváltoztathatják az árakat. A szolgáltatók hosszútávú interakcióit ismételt játékként modelleztem ahol figyelembe vettem az előfizetők árkülönbségfüggő hűségét is.

C. játék. [Hosszútávú internet előfizetés árazás hűséges előfizetőkkel, G_C] Kettő szolgáltató van a piacon, ISP_1 l_1 , míg ISP_2 l_2 hűséges előfizetővel rendelkezik. Az ismételt

játékban a kifizetéseket diszkontáljuk, az ár minden lépésben $0 \leq \Theta \leq 1$ diszkont faktoralal módosul. Θ kifejezi a jövő fontosságát a szolgáltatók döntésében, pl. ha $\Theta = 0$ akkor csak a következő kör nyereségét figyelik. Feltételezem, hogy egy szolgáltató csak egy adott körre veszi el az előfizetőit, vagyis pl. ISP_1 minden kör elején l_1 előfizetővel rendelkezik. Együttműködés esetén a szolgáltatók kifizetése $\Pi_i^{coop} = l_i \alpha$, egyébként $\Pi_i^{not} = l_i d$ értékű. A játék formális definíciója az alábbi:

- **Játékosok:** a kettő szolgáltató, ISP_i l_i hűségű előfizetővel rendelkezik
- **Stratégiák:** $p_i \in [0, \alpha]$ az internet hozzáférés ára ISP_i -nél, a játékosok több kört játszanak ismételt játékként, ISP_i diszkont faktora Θ_i
- **Kifizetési függvény:** ISP_i kifizetése

$$\Pi_i = \begin{cases} (l_i + l_j)p_i & \text{if } p_i < p_j \text{ and } |p_i - p_j| > d_j \\ l_i p_i & \text{if } |p_i - p_j| \leq d_i \\ 0 & \text{if } p_i > p_j \text{ and } |p_i - p_j| > d_i \end{cases} \quad (31)$$

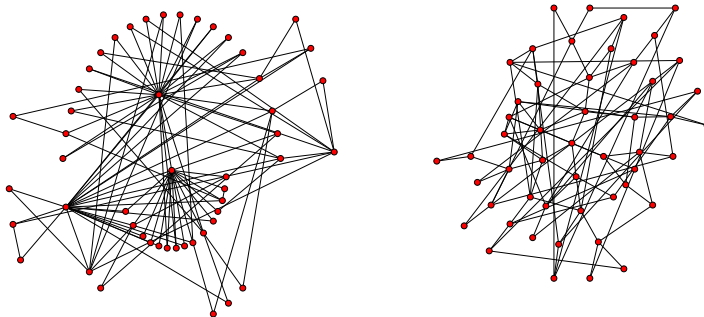
- **Információ:** teljes

2.3. Tézis. [[J2, C6] Analitikus módon levezettem, hogy a „ α ár alkalmazása mindaddig, amíg a másik fél nem vált stratégiát (azaz nem tesz d -vel alacsonyabb árat), ellenkező esetben az ár legyen d ” stratégia részjáték-tökéletes egyensúlya a G_C ismételt játéknak, ahol Θ_i az ISP_i diszkont faktora, ha a $\Theta_i > \frac{(l_1+l_2)(\alpha-d)-l_i\alpha}{(l_1+l_2)(\alpha-d)-2l_i d}$ kifejezés teljesül.

Ebből adódik, hogy ha az internet szolgáltatók a jövőt legalább Θ súllyal figyelembe veszik, akkor a stratégia hosszútávon optimális, azaz maximalizálja a nyereséget.

4.3. Scafida: egy skálafüggetlen hálózaton alapuló adatközpont architektúra

Ebben a téziscsoportban egy új adatközpont struktúra generáló módszert javaslok. A Scafida algoritmus tervezése radikálisan eltérő megközelítést követ, mint a jelenlegi megoldások. Szimmetrikus struktúra kialakítása helyett a Scafida algoritmus a hálózatot véletlenszerűen alakítja ki, ezáltal a struktúra aszimmetrikus lesz. A Scafida módszer biológiai ihletésű, ebből adódik, hogy hatékony energiafelhasználás szempontból, a flexibilis és skálázható szerkezetnek köszönhetően.



(a) Eredeti, skálafüggetlen hálózat (fokszám korlátozás nélkül) (b) Maximális fokszám: 5

8. ábra. A skálafüggetlen hálózat alapján felépített topológiák

3. Tézis. [Skálázható adatközpont struktúra] [B1, J1, J9, C1] Kidolgoztam egy adatközpont struktúrát generáló algoritmust, melyet Scafidának hívnak. A Scafida eljárás skálafüggetlen hálózatokon alapul, emiatt nagyon skálázható és flexibilis. Az algoritmus mesterségesen korlátozza a hálózati pontok fokszámát, hogy azok megfeleljenek a hálózati eszközök fizikai tulajdonságainak. Továbbá elemeztem a fokszámkorlátozás hálózati útvonalak hosszára kifejtett hatását, az úthosszak fordítottan arányosak a fokszámkorlátozás mértékével.

3.1. Tézis. [Scafida algoritmus] [J1, C1] Kidolgoztam egy skálafüggetlen hálózatokon alapuló adatközpont generáló algoritmust, melyet Scafidának hívnak. Azért, hogy a hálózati fokszámok megfeleljenek a fizikai berendezések tulajdonságának (a switchek és szerverek interfészeinek száma) a módszer mesterségesen korlátozza a pontok fokszámát. Az algoritmus tetszőleges számú és típusú hálózati berendezés felhasználásával képes adatközpont struktúrát kialakítani. A Scafida algoritmus a 9 ábrán látható.

A kidolgozott Scafida algoritmus Barabási és Albert skálafüggetlen hálózat generáló módszerén alapul [ási1999], amit *preferential attachment*-nek is neveznek. A hálózati struktúra iteratív módon alakul ki, azaz a pontokat egyesével adjuk hozzá a hálózathoz. Az új pont egy kapcsolata véletlenszerűen alakul ki, ahol a pontok fokszámukkal súlyozva szerepelnek. Ez a jelenség a gazdag még gazdagabb lesz elven is ismert. A Scafida módszer mesterségesen korlátozza, hogy a pontok hány összekötéssel rendelkezhetnek, vagyis a pontok maximális fokszámát korlátozza, annak érdekében, hogy azok megfeleljenek a rendelkezésre álló hálózati berendezések (switchek és routerek) portszámának.

Input:

szerverek száma (n_{t_0}); szerverek portszáma (p_{t_0}); a t_i típusú switchek száma (n_{t_1}, \dots, n_{t_k}); a t_i típusú switchek portszáma (p_{t_1}, \dots, p_{t_k}); a már lefoglalt t_i típusú switchek száma (a_{t_i}); a v pont fokszáma (d_v); egy újonnan hozzáadott pont összekötéseinek száma (m)

Az algoritmus:

```

1  $G = (V, E)$  // üres gráf
2  $V = V \cup \{0, 1, \dots, m-1\}$  // kezdeti pontok hozzáadása
3  $a_{t_i} = 0; i = 0, \dots, k$  // inicializálás
4  $R = \{\}$  // a preferential attachment-hez használt
5  $E = E \cup \{(m, 0), (m, 1), \dots, (m, m-1)\}$ 
6  $R = R \cup \{0, \dots, m-1\}$  // az azonosító lista frissítése
7  $R = R \cup \{m, \dots, m\}$  // m-szer
8  $b = m + 1$  // a következő pont azonosítója
9 while  $b < \sum_{i=0}^k n_{t_i}$  do
10    $V = V \cup \{b\}$  // a pont felvétele a gráfban
11    $T = \{\}$  // a kiválasztott szomszédok tárolása
12   while  $|T| < m$  do
13     repeat  $v_t = \text{random}(R)$  until  $v_t \notin T$  // R egy véletlen eleme
14     if  $d_{v_t} \notin \{p_{t_0}, \dots, p_{t_k}\}$  then
15        $T = T \cup \{v_t\}; E = E \cup \{(b, v_t)\}$ 
16     else
17       // legyen  $d_{v_t} = p_{t_i}$ 
18        $nasw = 0; ntsw = 0$ 
19       for  $j = 0, \dots, k$  do
20         if  $p_{t_j} > p_{t_i}$  then
21            $nasw += a_{t_j}; ntsw += n_{t_j}$ 
22         if  $nasw < ntsw$  then
23           // a cél switchnek még van üres portja
24            $a_{t_i} = a_{t_i} - 1; a_{t_{i+1}} = a_{t_{i+1}} + 1$ 
25            $T = T \cup \{v_t\}; E = E \cup \{(b, v_t)\}$ 
26         else
27            $R = R \setminus \{v_t\}$ 
28        $R = R \cup T$  // lista frissítése
29     for  $i = 1, \dots, m$  do  $R = R \cup \{b\}$ 
30      $b = b + 1$ 

```

9. ábra. A Scafida algoritmus pszeudokódja

A Scafida adatközpont architektúra elrendezés illusztrációja érdekében a 8. ábrán két elkészített topológiát ábrázolok. A 8(a). ábrán egy hagyományos Barabási–Albert skálafüggetlen hálózat látható, ahol a foksámok nincsenek korlátozva. Emiatt néhány pont sokkal több kapcsolattal rendelkezik, mint a többi. Ezzel szemben a 8(b). ábra olyan topológiát mutat be, ahol a pontok maximális foksáma korlátozott (5 kapcsolat). A két topológia a foksámeloszlása eltérő, de a tulajdonságaik hasonlóak (a részleteket a 3.3 tézisben ismertetem).

3.2. Tézis. *[Minimális foksám korlát] [J1, C1] Levezettem egy alsó korlátot a foksámkorlátozó ami megadja az összefüggést a pontok száma (m), az élek száma (t) és a foksámkorlátozás (n) között. Foksámkorlátozott skálafüggetlen hálózat akkor generálható adott paraméterekkel, ha az alábbi összefüggés teljesül:*

$$t \geq 2m \left(1 - \frac{m}{n}\right) \quad (32)$$

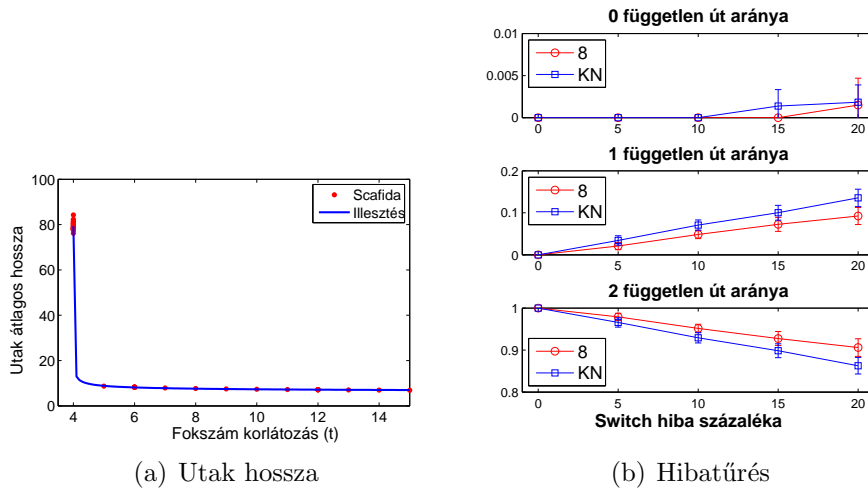
Ez az eredmény azt jelenti, hogy a pontok foksáma csak egy bizonyos értékig csökkenthető, ellenkező esetben nem lehet adatközpont hálózatot kialakítani. Ebből adódik, hogy a bevezetett formula alkalmazható egy struktúra megvalósíthatóságának vizsgálatára.

3.3. Tézis. *[A foksám korlátozás hatása] [J1, C1] Szimulációs eredmények alapján megmutattam, hogy a skálafüggetlen hálózatok foksámkorlátozása nem növeli meg jelentősen a hálózati útvonalak hosszát. Megmutattam, hogy az átlagos úthossz fordítottan arányos a foksámkorlátozással, azaz*

$$l \sim \frac{1}{t - 2m \left(1 - \frac{m}{n}\right)} \quad (33)$$

ahol t a pontok maximális foksámát jelöli. Ezen kívül megmutattam, hogy a skálafüggetlen hálózatok foksámkorlátozása javítja a hálózatok hibatűrő képességét véletlen hibák esetén.

A tézis eredményei biztosítják a skálafüggetlen hálózaton alapuló adatközpont hálózatok alkalmazhatóságát. Egyrészt a hálózat méretétől függetlenül a foksámkorlátozás úthosszakra gyakorolt hatása limitált, a legtöbb esetben kevesebb mint ugrással növekedett az utak hossza. Néhány 50000 pontot tartalmazó hálózat átlagos útvonalhosszát ábrázoltam a 10(a) ábrán, a hálózatok különböző foksámkorláttal rendelkeztek (a generálásnál $m = 2$ paramétert használtam). Az ábrázolt görbe jól közelíti a szimulációs eredményeket (0.9994-es R-érték). A görbeillesztés során felhasználtam a 3.2 tézis alsó korlátját, a görbeillesztés a korlát teljesüléséig érvényes.



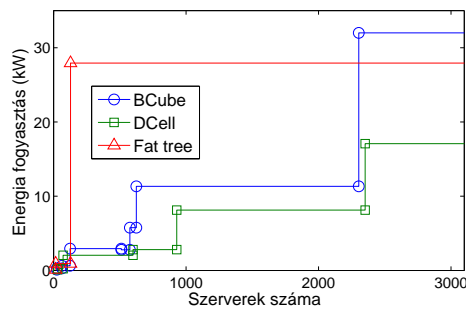
10. ábra. A fokszámkorlátozás hatása

A speciális struktúra miatt a skálafüggetlen hálózatok jól tolerálják a véletlen ponthibákat [8]. A hálózati eszközök sztochasztikus hibája mindennapos az adatközpontokban, azaz ez egy elvárás a Scafida topológiákkal szemben. A fokszámkorlátozás hibatűró képességre gyakorolt hatását a szerverpárok közötti független utak számának elemzésével végeztem. A szimulációkban a meghibásodások aránya 0 és 20 százalék között változott, az 1000 pontos hálózatokban kettő szerver között maximum kettő független út létezhetett. Az átlagolt eredményeket a 10(b) ábrán ábrázoltam, ahol a szerverpárok arányát ismertetem. A switchek 20 százalékának meghibásodása esetén is a szerverpárok 90 százalékánál kettő független út létezett. A Scafida topológiák hibatűró képessége jobb, mint a skálafüggetlen hálózatoké, mert egy nagy fokszámú pont meghibásodása jelentős hatást gyakorolhat a topológiára.

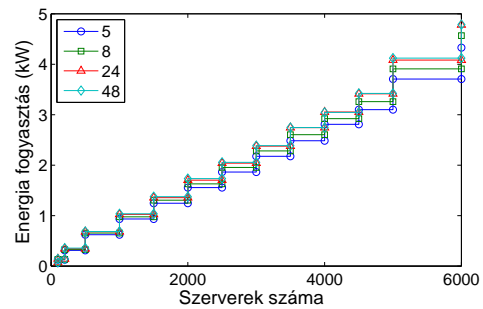
Az ismertetett eredmények alapján elmondható, hogy a javasolt adatközpont architektúra a fokszámkorlátozás ellenére kedvező tulajdonságokkal rendelkezik.

3.4. Tézis. [Scafida adatközpontok energiafogyasztása] [B1, J9] Numerikus kiértékeléssel elemeztem a Scafida adatközpontok energiafogyasztását, ami arányos az architektúra szervereinek számával. Azaz, a Scafida egy energia arányos adatközpont struktúra. Ezen kívül megvizsgáltam a jelenlegi adatközpont energiafogyasztását is, a vizsgálatok alapján ezen a struktúrák energiafogyasztása nem arányos a szerverek számával.

A tézisből következik, hogy a Scafida energia hatékonyság szempontjából jobban teljesít, mint a jelenlegi adatközpont hálózatok. Az energia-hatékonyság fontos társadalmi-gazdasági tulajdonság, hiszen hatással van mind az üzemeltetők költségeire, mind a környezetre.



(a) Jelenleg alkalmazott adatközpont struktúrák



(b) Scafida ($m = 1$)

11. ábra. Adatközpont struktúrák energiafogyasztása

A jelenlegi adatközpont architektúrák energiafogyasztását a 11(a) ábrán ismertetem a szerverek számának függvényében. A topológiákat az eljárások paramétereinek növelésével állítottam elő, így növelve a rendszerek szervereinek számát. Mivel ezek az eljárások csak egy vagy kettő paraméterrel rendelkeznek, a topológiák tulajdonságának módosítására csak limitált eszközünk van. Ebből adódik, hogy ezen struktúrák merev szerkezettel rendelkeznek, ami miatt a méretük csak nagyobb lépésekben növelhető, ahogyan az a görbéken is látható. Emiatt a szükségesnél nagyobb hálózati struktúrát kell kialakítani az esetek döntő többségében.

A javasolt Scafida adatközpont architektúra nagyon skálázható, emiatt tetszőleges méretű adatközpont generálható vele. A 11(b) ábrán különböző Scafida topológia energiafogyasztását ismertetem. A Scafida adatközpont energiafogyasztása arányos a szerverek számával az alkalmazott switchek típusától függetlenül. A jelenlegi adatközpont struktúrákkal szemben a görbék ugrásai a szimulációs paraméterek miatt adódtak, nem a Scafida eljárás okozta. Azaz ha minden lehetséges paraméterrel generálnánk topológiákat, akkor a görbékben nem lenne jelentős ugrás sehol sem. Ebből adódik, hogy a Scafida adatközpont struktúra energia arányos, tehát olyan esetekben is jól alkalmazható, ahol az adatközpont mérete gyakran növekszik.

5. Eredmények alkalmazhatósága

A 4.1. fejezetben javasolt útvonalválasztási és védelmi eljárások olyan lineáris programokkal formalizáltak, melyek az optimális megoldást polinomális időben megadják. Ezáltal a javasolt eljárások nem csak referenciaként használhatóak, hanem valós rendszerek útvonalválasztását is biztosíthatják. A módszerek előnye, hogy csupán topológia és link állapot információt igényelnek hasonlóan a hozzárendel védelemhez

ellentétben a megosztott védelemmel, ami az összes igény pontos útvonalának ismeretében határozza meg az igény útvonalát. Emiatt az MPP módszerek igen hasznosak többtartományos hálózatokban, ahol a hálózatok üzemeltetői nem szívesen osztanak meg titkos adatokat, például a tartományon belüli útvonalválasztási információkat a vetélytársakkal. A javasolt útvonal alapú MPP módszer (1.3. tézis) továbbá lehetővé teszi az útvonalak hosszának korlátozását, amivel szabályozható a hálózati késleltetés a jobb felhasználói élmény érdekében.

Az internetszolgáltatók árképzési stratégiáit (4.2. fejezet) kétféleképpen lehet felhasználni. Egyrészt a telekommunikációs hatóságok modellezhetik a szabályozási döntéseik eredményét, ilyen például a helyi hurok átengedésének költsége. Különböző piaci esetek szimulációs eredménye alapján a hatóságok mind a már piacon lévő, mind az újonnan megjelenő internetszolgáltatók viselkedését befolyásolhatják különböző ösztönző eljárások alkalmazásával. Másrészt a bemutatott árazási stratégiákat felhasználhatják az internet szolgáltatók, a árképzési döntéseiket ezek alapján hozhatják meg. Mivel a helyi internet szolgáltatói piac egyre inkább dinamikus lesz, a versenyképesség érdekében kulcsfontosságúvá válik az optimális árképzés. A javasolt stratégiák kiindulási pontként szolgálhatnak az internet előfizetések hosszútávú árazására dinamikus piacok esetén. Az eredmények továbbá megmutatták, hogy a szolgáltatóknak figyelembe kell vennie az árkülönbségeket az árazás során, hiszen egy túl kicsi árscökkenés nem biztos, hogy elegendő új előfizetőt eredményez. Egy szolgáltató nagyobb nyereséget könyvelhet el, ha jobban ismeri a lakosság árkülönbség érzékenységét, ami jelentősen befolyásolja a kialakuló piaci árakat.

A 4.3. fejezetben javasolt Scafida adatközpont generáló algoritmus alkalmazható energia hatékonyabb adatközpont hálózatok kialakítására. A skálafüggetlen hálózatokon alapuló adatközpontok jól skálázhatóak, ezért az energiafogyasztásuk kis lépésekben állítható. Míg a jelenlegi adatközpont struktúrák nem energia arányosak, a Scafida adatközpontok energiafogyasztása arányos a szerverek számával. A Scafida módszer másik fontos tulajdonsága, hogy tetszőleges típusú és számú hálózati berendezést felhasználva képes adatközpont hálózatot kialakítani, azaz flexibilis az eljárás. Az ismertett eredmények a jelenleg elérhető switchek tulajdonságain alapulnak, a Scafida adatközpont tulajdonságai a hálózati berendezések méretének növekedésével javulnak, hiszen egyre jobban megközelítik a korlátozás nélküli skálafüggetlen hálózatok tulajdonságait. Amiatt, hogy a skálafüggetlen hálózatok preferált tulajdonságai alacsony foksámok esetén is fennállnak, a Scafida topológiák olyan adatközpontokban is használhatóak, ahol a szerverek egymáshoz kapcsolódnak [22], a Scafida módszer nagyon lecsökkentheti ezen hálózatok átmérőjét. A 3.3 tézis eredményeiből továbbá adódik, hogy foksámkorlátozott skálafüggetlen hálózatok alkalmazhatók lehetnek *peer-to-peer* hálózatokban. Egyrészt a felhasználók így korlátozhatják a kapcsolataik számát, másrészt a hálózat átmérője, ami a tartalom megtalálásának idejét befolyásolja, nem növekszik jelentősen a foksám korlátozás következtében.

Hivatkozások

- [1] *ITU-T G.7042: Link capacity adjustment scheme (LCAS) for virtual concatenated signals.* ITU-T, <http://www.itu.int/rec/T-REC-G/recommendation.asp?lang=en&parent=T-REC-G.7042>.
- [2] *ITU-T G.707: Network node interface for the synchronous digital hierarchy (SDH).* ITU-T <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.707/en>.
- [3] *ITU-T G.709: Interfaces for the Optical Transport Network (OTN).* ITU-T <http://www.itu.int/rec/T-REC-G/recommendation.asp?lang=en&parent=T-REC-G.709>.
- [4] *ITU-T G.872: Architecture of optical transport networks.* ITU-T <http://www.itu.int/rec/T-REC-G/recommendation.asp?lang=en&parent=T-REC-G.872>.
- [5] AKARI. Architecture design project for new generation network. <http://akari-project.nict.go.jp/eng/index2.htm>.
- [6] Mohammad Al-Fares, Alexander Loukissas, and Amin Vahdat. A scalable, commodity data center network architecture. In *SIGCOMM '08*, pages 63–74, 2008.
- [7] Reka Albert, Hawoong Jeong, and Albert-Laszlo Barabási. Internet: Diameter of the World-Wide Web. *Nature*, 401(6749):130–131, September 1999.
- [8] Reka Albert, Hawoong Jeong, and Albert-Laszlo Barabási. Error and attack tolerance of complex networks. *Nature*, 406(6794):378–82, August 2000.
- [9] A.M.C.A. Koster and A. Zymolka and M. Jäger and R. Hülsermann and C. Gerlach. Demand-wise Shared Protection for Meshed Optical Networks. In *Proceedings of DRCN 2003*, pages 85–92, Banff, Canada, October 2003. IEEE.
- [10] ANACOM. Survey on the use of broadband.
- [11] Arie M. C. A. Koster, Adrian Zymolka, Monika Jäger and Ralf Hülsermann. Demand-wise Shared Protection for Meshed Optical Networks. *Journal of Network and Systems Management*, 13(1):35–55, Mar 2005.
- [12] FICORA Finnish Communications Regulatory Authority. Market review.
- [13] MCA Malta Communications Authority. End-users perception survey - broadband services.

- [14] Albert-Laszlo Barabási and Reka Albert. Emergence of Scaling in Random Networks. *Science*, 286(5439):509–512, 1999.
- [15] Ramesh Bhandari. *Survivable Networks: Algorithms for Diverse Routing*. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA, 1998.
- [16] G. Biczók, S. Kardos, and T.A. Trinh. Pricing internet access for disloyal users: a game-theoretic analysis. In *Proceedings of the 3rd international workshop on Economics of networked systems*, pages 55–60. ACM, 2008.
- [17] X.R. Cao, H.X. Shen, R. Milito, and P. Wirth. Internet pricing with a game theoretical approach: concepts and examples. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 10(2):216, 2002.
- [18] J.S. Chiou. The antecedents of consumers’ loyalty toward internet service providers. *Information & Management*, 41(6):685–695, 2004.
- [19] Choice. Isp satisfaction survey.
- [20] CNGI. China next generation internet. <http://www.cstnet.net.cn/english/cngi/cngi.htm>.
- [21] Reuven Cohen and Shlomo Havlin. Scale-free networks are ultrasmall. *Phys. Rev. Lett.*, 90(5):058701, Feb 2003.
- [22] Paolo Costa, Thomas Zahn, Ant Rowstron, Greg O’Shea, and Simon Schubert. Why should we integrate services, servers, and networking in a data center? In *WREN ’09: Proceedings of the 1st ACM workshop on Research on enterprise networking*, pages 111–118, New York, NY, USA, 2009. ACM.
- [23] Euro-NF. Network of excellence on the network of the future.
- [24] FIF. Future internet forum, korea. <http://www.fif.kr/home.php>.
- [25] Comreg Commission for Communications Regulation. Consumer ict survey.
- [26] Albert Greenberg, James R. Hamilton, Navendu Jain, Srikanth Kandula, Changhoon Kim, Parantap Lahiri, David A. Maltz, Parveen Patel, and Sudipta Sen-gupta. V12: a scalable and flexible data center network. In *SIGCOMM ’09*, pages 51–62, 2009.
- [27] Chuanxiong Guo, Guohan Lu, Dan Li, Haitao Wu, Xuan Zhang, Yunfeng Shi, Chen Tian, Yongguang Zhang, and Songwu Lu. Bcube: a high performance, server-centric network architecture for modular data centers. In *SIGCOMM ’09*, pages 63–74, 2009.

- [28] Chuanxiong Guo, Haitao Wu, Kun Tan, Lei Shi, Yongguang Zhang, and Songwu Lu. Dcell: a scalable and fault-tolerant network structure for data centers. In *SIGCOMM '08*, pages 75–86, 2008.
- [29] L. He and J. Walrand. Pricing and revenue sharing strategies for internet service providers. In *INFOCOM 2005. 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings IEEE*, volume 1, pages 205–216. IEEE, 2005.
- [30] R. Hülsermann, M. Jäger, A. M. C. A. Koster, S. Orlowski, R. Wessäly, and A. Zymolka. Availability and cost based evaluation of demand-wise shared protection. In *Proceedings 7th ITG-Workshop on Photonic Networks*, pages 161–168, Leipzig, Germany, 2006. VDE Verlag GmbH.
- [31] M. Menth, R. Martin, M. Hartmann, and U. Spörlein. Efficiency of routing and resilience mechanisms in packet-switched communication networks. *European Transactions on Telecommunications*, 21(2):108–120, 2010.
- [32] Michael Menth, Rüdiger Martin, and Ulrich Spörlein. Network dimensioning for the self-protecting multipath: A performance study. In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Istanbul, Turkey, 6 2006.
- [33] Michael Menth, Ruediger Martin, and Ulrich Spoerlein. Impact of unprotected multi-failures in resilient SPM-networks: a capacity dimensioning approach. In *IEEE Globecom*, San Francisco, CA, USA, 11 2006.
- [34] MFAForum. *Inverse Multiplexing for ATM (IMA) Specification Version 1.1, MFA Forum*. <http://www.mfaforum.org/ftp/pub/approved-specs/af-phy-0086.001.pdf>, 3 1999.
- [35] Michael Menth, Andreas Reifert, Jens Milbrandt. Self-Protecting Multipaths – A Simple and Resource-Efficient Protection Switching Mechanism for MPLS Networks. In *NETWORKING 2004*, pages 526–537, Apr 2004.
- [36] Radhika Niranjan Mysore, Andreas Pamboris, Nathan Farrington, Nelson Huang, Pardis Miri, Sivasankar Radhakrishnan, Vikram Subramanya, and Amin Vahdat. Portland: a scalable fault-tolerant layer 2 data center network fabric. In *SIGCOMM '09*, pages 39–50, 2009.
- [37] NSF. Future Internet Network Design Initiative.
- [38] Ofcom Office of Communications. The communications market.

- [39] S. Shakkottai and R. Srikant. Economics of network pricing with multiple ISPs. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 14(6):1233–1245, 2006.
- [40] T.A. Trinh. Pricing internet access for disloyal users: a game-theoretic analysis, extended abstract.
- [41] Walker. The 2005 walker loyalty report for information technology.
- [42] Haitao Wu, Guohan Lu, Dan Li, Chuanxiong Guo, and Yongguang Zhang. Md-cube: a high performance network structure for modular data center interconnection. In *CoNEXT '09*, pages 25–36, New York, NY, USA, 2009. ACM.

Publications

Könyvfejezet

- [B1] **László Gyarmati**, Tuan Anh Trinh: Energy Efficiency of Data Centers. elfogadva, *Green IT: Technologies and Applications*, Springer-Verlag, 2011.

Folyóirat cikkek

- [J1] **László Gyarmati**, Tuan Anh Trinh: Scafida: A Scale-Free Network Inspired Data Center Architecture. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 40, num. 5, pp. 5–12, 2010.
- [J2] Tuan Anh Trinh, **László Gyarmati**, Gyula Sallai: Understanding the Impact of User Loyalty on Internet Access Pricing: A Game-Theoretic Framework. *Telecommunication Systems*, Springer, April 2011.
- [J3] **László Gyarmati** and Tuan Anh Trinh: How to Price Internet Access for Disloyal Users under Uncertainty. *Annals of Telecommunications - Quality of Experience and Socio-Economic Issues of Network-Based Services*, vol. 65, num. 3–4, pp. 171–188, 2009.
- [J4] János Szigeti, **László Gyarmati** and Tibor Cinkler: Multidomain shared protection with limited information via MPP and p-cycles. *Journal of Optical Networking*, vol. 4, num. 4, pp. 400–409, 2008.
- [J5] **László Gyarmati** and Tuan Anh Trinh: Investigation of the Impacts of User Behaviour on Pricing Competition of Internet Service Providers: Empirical Evidence and Game-Theoretical Analysis. *Infocommunications Journal*, vol. 64, num. 2, pp. 9–13, 2009.
- [J6] Tamás Henk, Róbert Szabó, Sándor Molnár, Balázs Sonkoly, Márton Csernai, András Gulyás, Zalán Heszberger, **László Gyarmati**, Tuan Anh Trinh: A jövő Internetének kutatásai. *Híradástechnika*, vol. 64, pp. 23–33, 2009.
- [J7] **László Gyarmati**, Tuan Anh Trinh, Tibor Cinkler: Path-based Multi-Path Protection: resilience using multiple paths. bírálás alatt, *European Transactions on Telecommunications*, 2011
- [J8] **László Gyarmati**, Tuan Anh Trinh: Scafida: egy energia-hatékony adatközpont struktúra. megjelenés alatt, *Híradástechnika*, 2011

- [J9] Tuan Anh Trinh, **László Gyarmati**, Rastin Pries, Laurent Lefevre, Jean-Marc Pierson, Jordi Torres, Samee Ullah Khan, Pascal Bouvry, Dzmitry Kliazovich: Energy Efficiency in Data Centers: A Survey. bírálás alatt, *Computer Networks*, 2011.

Konferencia cikkek

- [C1] **László Gyarmati** and Tuan Anh Trinh: How Can Architecture Help to Reduce Energy Consumption in Data Center Networking? In Proc., *ACM SIGCOMM E-energy 2010, Energy-Efficient Computing and Networking conference*, pp. 183–186, Passau, April, 2010.
- [C2] Tibor Cinkler and **László Gyarmati**: MPP: Optimal Multi-Path Routing with Protection. In Proc. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 165–169, Beijing, China, May 2008.
- [C3] **László Gyarmati**, Tibor Cinkler and Gyula Sallai: SRLG-Disjoint Multi-Path Protection: When LP meets ILP. In Proc., *Networks 2008*, pp. 1–10, Budapest, Hungary, October 2008.
- [C4] Tibor Cinkler, János Szigeti and **László Gyarmati**: Multi-Domain Resilience: Can I Share Protection Resources with my Competitors? In Proc., *9th Int. Conf. on Transparent Optical Networks (ICTON)*, pp. 138–141, Rome, Italy, July 2007.
- [C5] **László Gyarmati** and Tuan Anh Trinh: On Competition for Market Share in a Dynamic ISP Market with Customer Loyalty: A Game-Theoretic Analysis. In Proc., *6th International Workshop on Internet Charging and QoS Technologies (ICQT'09), Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5539, pp. 11–23, 2009.
- [C6] **László Gyarmati** and Tuan Anh Trinh: Revisiting Internet Access Pricing for Loyal Customers: the Long-Term Interaction Case. In Proc., *NGI 2009 - 5th Euro-NGI Conference on Next Generation Internet Networks*, pp. 1–8, Aveiro, Portugal, July, 2009.

Tézishez nem kötődő folyóirat cikkek

- [OJ1] **László Gyarmati**, Tuan Anh Trinh: Measuring User Behavior in Online Social Networks. In *IEEE Network, Special Issue on Online Social Networks*, vol. 24, num. 5, pp. 26–31, 2010.
- [OJ2] **László Gyarmati**, Tuan Anh Trinh: Cooperative Strategies of Wireless Access Technologies: A Game-Theoretic Analysis *Pervasive and Mobile Computing Journal*, 2011.

Tézishez nem kötődő konferencia cikkek

- [OC1] Tuan Anh Trinh, **László Gyarmati** and Gyula Sallai: Migrating to IPv6: A Game-Theoretic Perspective. In *Proc., The 35th IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN 2010)*, pp. 348–351, Denver, Colorado, USA, 11-14 October 2010.
- [OC2] **László Gyarmati** and Tuan Anh Trinh: Characterizing User Groups in Online Social Networks. In *Proc. EUNICE 2009, Lecture Notes in Computer Science*, vol. 5733, pp. 59–68, 2009.