

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM  
VILLAMOSMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR  
INFORMATIKAI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA

HATÉKONY ÚTVONALVÁLASZTÓ ALGORITMUSOK EGYES- ÉS  
TÖBBESADÁSHOZ OPTIKAI HÁLÓZATOKBAN

Soproni Péter

Tézisfüzet

Tudományos vezető

Dr. Cinkler Tibor, egyetemi docens

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Távközlési és Médiainformatikai Tanszék, Nagysebességű Hálózatok Laboratóriuma

Budapest

2013

# 1. Bevezetés

A hatékony többes- és egyesadás elvezetésére szolgáló algoritmusok kutatása napjaink egyik kiemelkedően fontos kutatási területe. Ennek ellenére még mindig sok nyitott kérdés vár megoldásra a hálózati technológiák teljesítményével, illetve a szolgáltatás minőségével (Quality of Service - *QoS*) összefüggésben.

A többesadás természetéből adódóan gazdaságos. Ez elősegítheti az átvitt forgalom hatékony elvezetését és ezáltal a költség csökkentését [3]. Ennek ellenére – több okból kifolyólag, mint például a jelzések bonyolultsága, a megfelelő protokollok hiánya, stb. – a többesadás mind a mai napig nem terjedt el széleskörűen. Az optikai hálózatok hatékonyságát jelentősen növelné a többesadás szélesebb körű alkalmazása.

Az optikai hálózatok energiafogyasztása folyamatosan növekszik. A forgalom és a hálózati eszközök számának dinamikus növekedése miatt nem valószínű, hogy ez a trend a közeljövőben megváltozik. Ennek megfelelően mind fontosabbá válik az olyan módszerek vizsgálata és alkalmazása, amelyek áram megtakarítást eredményezhetnek. A használt energia jelentős része az elektromos és az optikai réteg közötti konverzió során kerül felhasználásra. Ezen konverziók számának csökkentése jelentős megtakarítással kecsegtet.

A növekedő felhasználói elvárások miatt a rendelkezésreálláshoz kapcsolódó kérdéseknek kiemelkedő figyelmet kell szentelni. Új és hatékony módszerekre van szükség, amelyek megfelelő védelmet vagy gyors helyreállítást biztosítanak annak érdekében, hogy meghibásodás esetén is biztosítható legyen a megkövetelt *QoS* szint.

A disszertáció, ennek megfelelően, magába foglalja olyan problémák vizsgálatát, mint nagy rendelkezésre állás biztosítása a lehető legkevesebb erőforrás felhasználása mellett, gyors helyreállítás hálózati elemek kiesése esetén, új technológiák képességeinek kihasználására alkalmas algoritmusok fejlesztése, többesadás hatékony elvezetése, stb.

# 2. Motiváció

Az optikai hálózatok alapelveit az 1960-as években dolgozták ki. Az 1990-es években az optikai hálózati technológia, a Hullámhossz Osztásos Multiplexelés (Wavelength Division Multiplexing - *WDM*) elterjedésével, az adattovábbítás alappillére lett. A

legújabb előrejelzések [1] szerint a világ adatforgalma az évenkénti zettabyte-os küszöböt 2015 körül lépi át. Az optikai hálózatok napjainkban másodpercenként és hullámhosszonként 10-100 Gbit nagyságrendű adat továbbítására képesek. A kereskedelemben kapható termékek kapacitása az évtized közepére elérheti a másodpercenként és hullámhosszonként 400 Gbit nagyságrendet [2]. A forgalom növekedésének alakulása azonban várhatóan felülmúlja ezt a bővülési ütemet. Ezért új és hatékony eljárásokra van szükség az igények elvezetésére, védelmére.

Az irodalomban sok megoldás található, mind az igények védelmére [4–6], mind a helyreállításra. Általános igazság, hogy a meghibásodásokra jobb előre felkészülni, mint bekövetkezésükkor azokra reagálni. A különböző védelmi módszerek legnagyobb hátránya, hogy még olyankor is jelentős erőforrásokat foglalnak, amikor azokra pillanatnyilag nincs is szükség – azaz a meghibásodás bekövetkezte előtt. Ez a felismerés olyan módszerek kidolgozását inspirálta, amelyek előzetes tervezésen alapulnak [7].

Az elektromos-optikai konverziók számának csökkentésére kidolgozott egyik érdekes módszer az úgynevezett Jelromlás-korlátozott Útvonalválasztás (Physical Impairment Constrained Routing - *PICR*) [8]. Ennek a módszernek a dinamikus forgalomra, illetve védelmet igénylő igények elvezetésére történő alkalmazása jelentős elektromos megtakarítást jelenthet. Mindig fontos kérdés, hogy egy új módszer mi módon vezethető be úgy, hogy ne zavarja a pillanatnyilag már elvezetett igényeket, mintegy fokozatosan, lépésről-lépésre. A *PICR* természetesen nem kivétel ez alól.

A többesadás és a *PICR* együttes használata további megtakarítást tehet lehetővé.

A legtöbb többesadáshoz kapcsolódó, technológiailag érdekes problémáról tudjuk, hogy NP-nehéz – lásd Steiner-fa probléma [9]. Ezen problémák elfogadható időn belüli optimális megoldása – a tudomány jelen állása szerint – nem lehetséges. Kvázi optimális megoldásokat korábbiakban is adtak különböző, a többesadáshoz kapcsolódó problémákra [10,11]. A Bakteriális Evolúció Algoritmus (Bacterial Evolutionary Algorithm - *BEA*) az egyik legújabb és legérdekesebb kvázi optimális – eljárás [12], amely a baktériumok mutációját utánozza. Ennek ellenére, legjobb tudásom szerint, *BEA*-t eddig még nem alkalmazták a felsorolt problémákra.

### 3. Kutatási célok

A disszertáció célja, hogy új és hatékony módszereket, algoritmusokat adjon különböző hálózati problémákra, ide értve az alábbiakat:

- Gyors és hatékony algoritmusok *többsadás helyreállítására* él meghibásodása esetén, amikor előzetes feldolgozás nem engedélyezett – azaz a helyreállításhoz szükséges utakat valós időben kell meghatározni a hálózat pillanatnyi állapota alapján –, ide értve a különböző megoldások összehasonlításához szükséges új metrikák kidolgozását is.
- Algoritmusok kidolgozása olyan esetekre, amikor a hálózat üzemeltetője még a meghibásodás előtt kíván felkészülni a *lehetséges hibaeseményekre*, elsősorban többsadás igényeknél.
- Ismert *heurisztikák* alkalmazása és kiterjesztése *PICR* -t figyelembe véve, egyesadás esetén, az útvonalválasztás és a hullámhossz-hozzárendelés problémáját továbbra is szem előtt tartva, ide értve védelem biztosítását is egyszeres link meghibásodás esetén.
- *Heurisztikus és egzakt megoldások* kidolgozása *többsadás elvezetésére* a *PICR* nyújtotta lehetőségeket figyelembe véve, különböző hálózati képességek mellett, a hullámhossz hozzárendelés problémáját is figyelembe véve.
- *BEA* alkalmazása *egyes és többsadás* igények elvezetésére, különböző hálózati topológiák, védelem és *PICR* mellett.

## 4. Alkalmazott módszerek

A disszertáció főbb eredményeit különböző problémákra alkalmazott optimális, kvázi optimális és heurisztikus módszerek képezik.

Hálózatok reprezentációjára Hullámhossz Gráfot (Wavelength Graph - *WG*) használtam [13, J2]. Ez a modellezési rendszer lehetővé teszi különböző topológiájú hálózatok és változatos típusú csomópontok kezelését is. A logikai topológiát jelentő *WG* a hálózat fizikai topológiájából kerül kialakításra az egyes csomópontok képességei alapján.

Egészértékű Lineáris Programozást (Integer Linear Program - *ILP*) [14] alkalmaztam egzakt megoldások meghatározására különböző problémák esetén. A disszertációban *ILP* segítségével vizsgált problémák mindegyike legalább NP-nehéz – általában vagy a Steiner-fa [9] vagy a többtermékes folyamatok problémájára [15] vezethetők vissza.

A kutatások során, amikor gyors, de nem szükségszerűen optimális megoldásokra volt szükség, gráfelméletet és komplexitás analízist alkalmaztam, hogy új és hatékony heurisztikákat adjak. Ezeket a módszereket alkalmaztam egyes- és többesadás igények védelemmel és védelem nélküli elvezetésénél, a *PICR*-t figyelembe vevő heurisztikus megoldásoknál, valamint a többesadás helyreállítása kidolgozott módszereknél. Többesadás esetén elsősorban az Accumulative Shortest Path (*ASP*) és a Minimum Path Heuristics (*MPH*) [16] kiterjesztésével foglalkoztam.

*BEA*-t alkalmaztam [12, 17] egyes és többesadás elvezetési problémák kvázi vagy közel optimális megoldásának meghatározására, polinomiális időben.

A javasolt megoldások validálására és kiértékelésére szimulációs eszközt fejlesztettem C++ és C# nyelven, CPLEX optimalizáló modul felhasználásával.

## 5. Új eredmények

### 5.1. Többesadás helyreállítása többretegű, forgalomkötegelt optikai hálózatokban

A TV továbbra is az egyik legfontosabb médium és szinte minden Internet Szolgáltató (Internet Service Providers - *ISPs*) szolgáltatásként nyújtja felhasználóinak. TV adás továbbítása többesadásként is megvalósítható. Mivel egy többesadás fa általában nagyobb mind méretben, mind energia felhasználásban, mint egy egyesadás igény, valamint egy esetleges meghibásodás előre láthatóan több végpontot is érint, így igen fontos tudni, hogy mi módon érdemes felkészülni a lehetséges hibákra, azaz mi módon állítsuk helyre a forgalmat a meghibásodás után. Módszereket dolgoztam ki a többesadás helyreállítására többretegű, forgalomkötegelt optikai hálózatokban. Az ezen munka során alkalmazott referencia *ILP* megoldást Perényi Marcell és én vezettük be, dolgoztuk ki [C1, J1].

**1. Tézis ( [C2, C3, J2] ).** *Új, egzakt és heurisztikus algoritmusokat adtam többesadás igények helyreállítására forgalomkötegelt, optikai hálózatokban. Új metrikákat adtam meg, amelyek lehetővé teszik a különböző megoldások időigényének és költség-hatékonyságának együttes összehasonlítását. Ezek segítségével megállapítottam, hogy a helyreállítás időigénye fontosabb, mint annak költség optimalitása. Azért, hogy ki-  
elégítsem az igényt gyors és erőforráshatékony helyreállítási módszerekre, kidolgoztam egy új, előzetes számításon alapuló módszert, amelyet Egyszerűsített Hálózatban Történő Előzetes Számításon Alapuló Helyreállítás x Eljárással-nak (Restoration Based on Preplanning created in a restricted network with x method - RBPx) neveztem el. Itt 'x' bármilyen, többesadás elvezetésére felhasználható módszert jelölhet. Megmutattam, hogy az RBPx gyors és hatékony helyreállítást kínál elfogadható valósidejű és előzetes számítási igénnyel.*

Napjainkban egy operátor sok módszert használhat a többesadás igények elvezetésére. Ismertek garantáltan optimális módszerek [18], heurisztikák [16], illetve kvázi optimális megoldások [10]. A gyakorlatban mindegyiknek meg van a helye: optimális és kvázi optimális megoldások statikus, heurisztikus algoritmusok dinamikus

igényeknél kerülnek használatra. Ennek megfelelően a helyreállítási módszereknek mindezekre a megközelítésekre fel kell készülniük.

**1.1. Tézis ( [C2, C3]).** *Új helyreállítási módszereket javasoltam többesadás helyreállítására egyszerűes meghibásodás esetén. Az új módszerek a következők:*

- 1. Új ASP alapú módszer, mely az egyes a meghibásodás által leszakított részfákat egyenként csatlakoztatja vissza.*
- 2. Új ILP formalizmus, ami a sértetlen részek módosítása nélkül, a lehetséges legolcsóbb módon csatlakoztatja vissza a meghibásodás által érintett csomópontokat a fába. Ezen kívül a korábban kidolgozott ILP olyan kiterjesztését is javasoltam, amely a sérült hálózatban képes a többesadás elvezetésére még ha nem is érhető el az összes célcsomópont.*

*Ezeket, illetve közismert elvezetési módszereket - ASP, MPH és ILP – integráltam egyetlen szimulátorba, kiterjedt szimulációkat végeztem rajtuk és összehasonlítottam teljesítményüket. Megmutattam – a probléma komplexitása miatt – valósidejű hálózatokban a javasolt heurisztikák használata ajánlott helyreállításra.*

Annak érdekében, hogy kiterjesszem az *ASP* heurisztikát a részleges helyreállítás problémájára – azaz csak a sérült rész kerüljön újra elvezetésre – a következő lépéseket javasoltam:

- A kiesett szakasz mindkét végéről az igény útvonalának megfelelően egy-egy keresést kell indítani.
- A meghibásodás előtti éleken – azaz a forrás felé eső oldalon – a lefoglalt erőforrásokat fel kell szabadítani, ha csak az érintett nyelőkbe szállítottak adatot.
- Azokon az éleken, amik a meghibásodás utánra esnek – azaz a nyelők oldalán –, de még az első célcsomópont előtt vannak, az erőforrásokat fel kell szabadítani.
- Legolcsóbb útvonal(ak) meghatározása a forrás és a sérült farész(ek) között.

Az *ILP* formalizmusnak a részleges elvezetésre való kiterjesztésére a következő lépéseket javasoltam:

- Minden olyan erőforrás felszabadítása, ami csak az érintett nyelőkbe történő adat továbbítást szolgálta.
- A továbbra is használt élek költségének beállítása nullára.
- Az optimális fa meghatározása egy olyan többesadás számára, melynek forrása az eredeti igény gyökere, nyelői pedig az érintett célcsomópontok.
- Az új és a régi fa összevonása azáltal, hogy az új fa élein az erőforrások lefoglalásra kerülnek, ha azok a régiben nem voltak használatban.

A szimulációk során a meghibásodást az adott élnek a hálózatból történő eltávolításával modelleztem. A szimulációk során a *Cost266BT* [19] és a *NFSNet Phase II* [20] hálózatokat használtam. Az igények véletlenszerűen kerültek létrehozásra – egyenletes eloszlással sorsolva. Egyszerre egy igényt vizsgáltam, amely egy véletlenszerűen választott forrásból és 5-27 nyelőből állt.

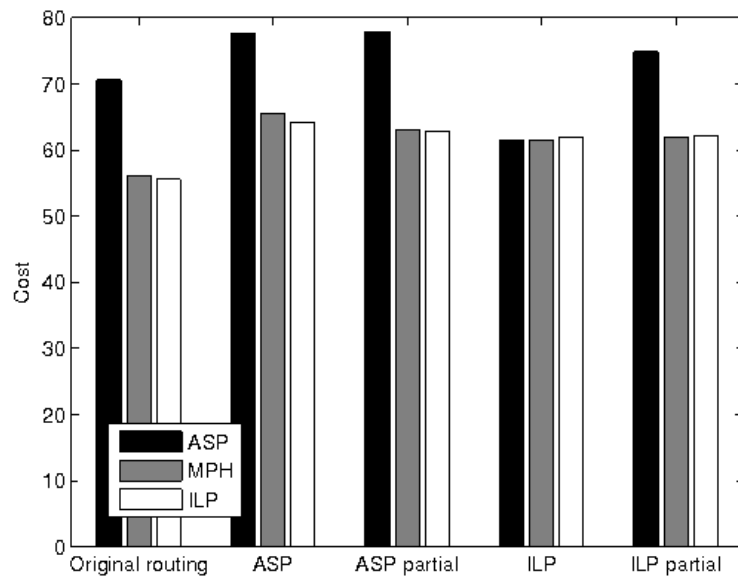
Az ismertett eredmények alapján, 1. ábra, arra a következtetésre jutottam, hogy a helyreállítás időigénye a legfontosabb paraméter. Ezért, az optimális és kvázi optimális megoldások valós idejű alkalmazása nem ajánlott.

Ezen felismerésre adott válaszként, olyan kombinált megoldást dolgoztam ki, amely gyors reakció időt és közel optimális megoldást garantál előzetesen elvégzett számítások felhasználásával. Előzetes számításokon alapuló helyreállítás ötlete nem új [21–23]. Azonban, legjobb tudásom szerint, többesadások helyreállítására több-rétegű optikai hálózatokban eddig még nem alkalmazták.

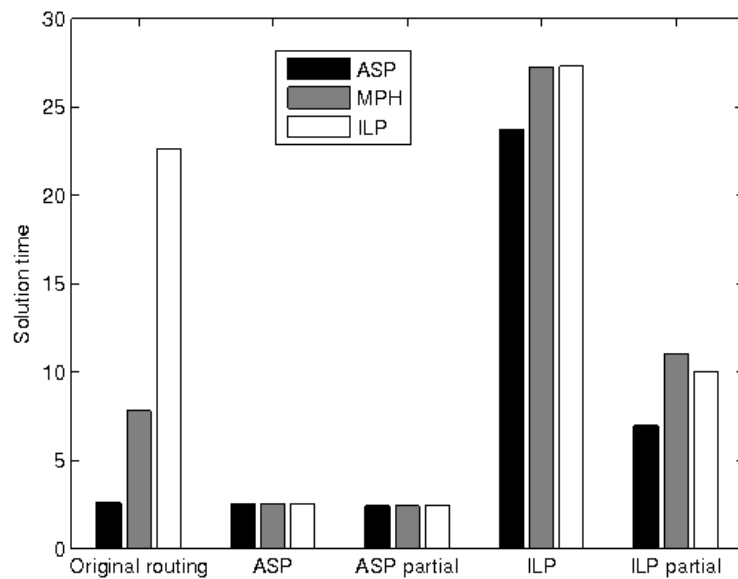
**1.2. Tézis ( [J2] ).** *Kidolgoztam egy új előzetes és valós idejű számításokat kombináló módszert többesadás helyreállítására egyszeres meghibásodás esetén, több-rétegű, forgalomköteget, optikai hálózatokban. Az RBPx nevű eljárás egy új és gyors transzformációs módszeren alapul, amely képes egy egyszerűsített hálózatban megkapott elvezetést az eredeti hálózatba átvezetni miközben az esetleges dinamikus forgalmat is figyelembe veszi. Analitikus módszerekkel bizonyítottam a javasolt módszer optimalitását néhány feltétel teljesülése esetén. Ezen feltételek nem teljesülése esetén – azaz amikor a bizonyítás nem igaz -- a módszer jó tulajdonságait szimulációval ellenőriztem.*

A javasolt módszer – azzal a céllal, hogy az előzetes számítások erőforrás-igényét csökkentse – egy speciális, úgynevezett ’megszorított’ hálózatot hoz létre – ebben a





(a) A helyreállított többesadás igény költsége



(b) Helyreállítási idő

1. ábra. Helyreállított igények paraméterei különböző optimális és heurisztikus algoritmusokkal

hálózatban a hullámhosszok közül nem az összes, csak azok egy része szerepel. A 'megszorított' hálózatban – mivel a változók száma jelentősen le lett csökkentve – a helyreállítási utak számítása meglehetősen gyors – néhány percet vesz igénybe még *ILP*-vel is. Így lehetőség nyílik arra, hogy a legtöbb lehetséges hiba forgatókönyvre felkészüljünk. A meghibásodás bekövetkeztekor az üzemeltetőnek csak meg kell keresnie az adott problémára illeszkedő helyreállítási forgatókönyvet és azt az eredeti hálózatba kell transzformálnia, természetesen a hálózat dinamikus tulajdonságait figyelembe véve. Mindezek támogatására egy új párhuzamosság definíciót dolgoztam ki, illetve egy új keresési algoritmust adtam.

Az egész igény újbóli elvezetése *QoS* problémákat okozhat, ezért az 1.1. Tézisben felvetett ötletet – a helyreállítási fázis során csak a meghibásodás által érintett részek az újbóli elvezetése, a sértetlen igények módosítása nélkül – itt is kidolgoztam és kipróbáltam.

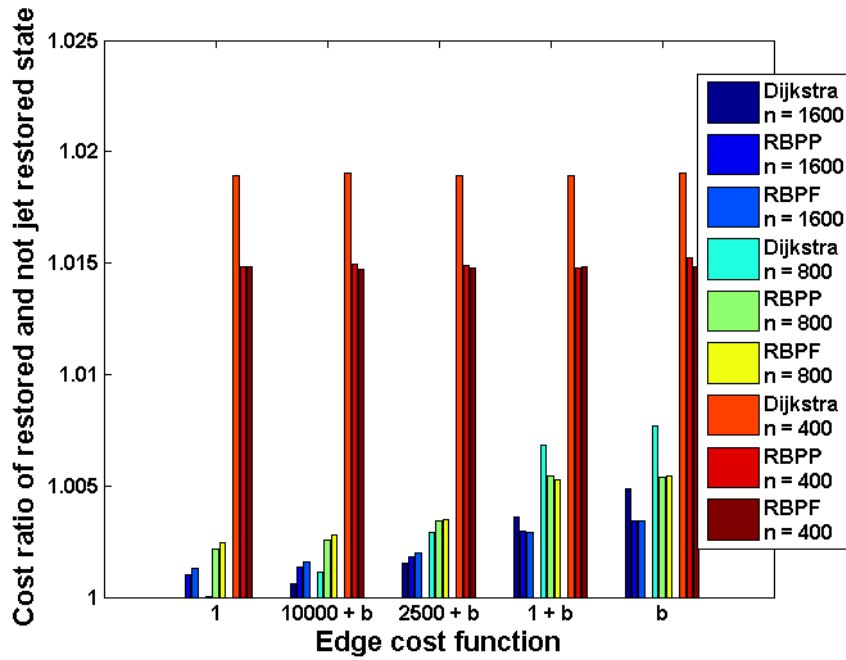
A Tézishez kapcsolódó szimulációkat a *Cost266BT* és a *Madrid's Core* [24] referencia hálózatokon végeztem. Az igényeket véletlenszerűen generáltam, 1-27 nyelővel, egyenletes eloszlás szerint sorsolt forrással.

Lineáris költségfüggvényekre, szimuláció segítségével, megmutattam a módszer hatékonyságát – 2. ábra.

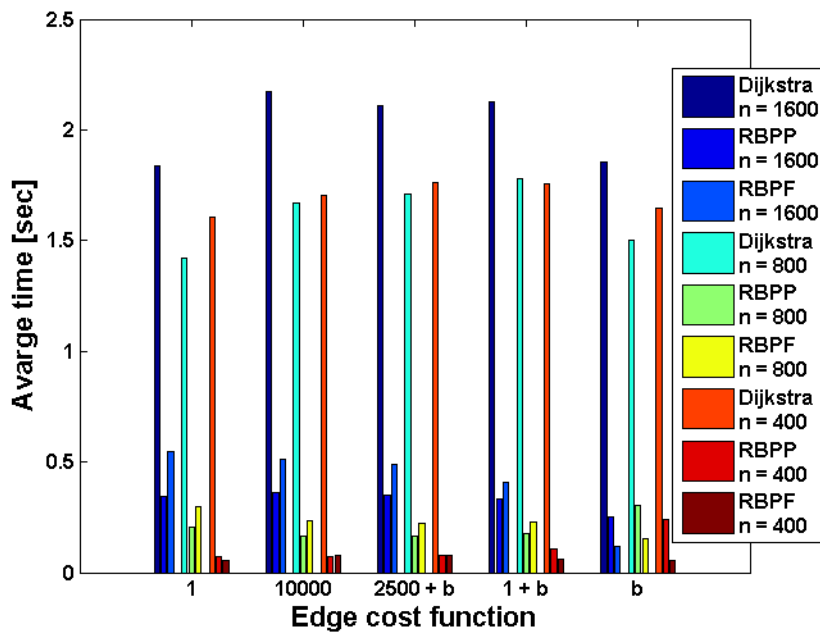
## 5.2. Jelromlás-korlátozott Útvonalválasztás alapú egyesadás elvezetés

Olyan új technológiák bevezetése, mint a Átkonfigurálható Optikai Multiplexer (reconfigurable optical add/drop multiplexers - *ROADM*), amely távoli átkonfigurálást biztosít, ide értve a kapacitás és energiaszint beállítását nem kézi módszerekkel, a hullámhosszok széles skáláján, elősegíti a működtetési költségek csökkentését (operational expenditure - *OPEX*). A legtöbb operátor (a profit maximalizálása érdekében) felügyeleti és hullámhossz szabályozási funkciókat is igényel. Ennek következtében az ezekhez szükséges plusz funkciók a legtöbb kereskedelemben kapható eszközben megtalálhatók [25, 26].

Napjainkban szinte minden *ROADM*-ben a jelteljesítmény szabályozható, állítható optikai erősítők (variable optical attenuators - *VOA*) segítségével a menedzsment rendszeren keresztül. Metro méretű *WDM* hálózatokban a csatornák jelerősségét a



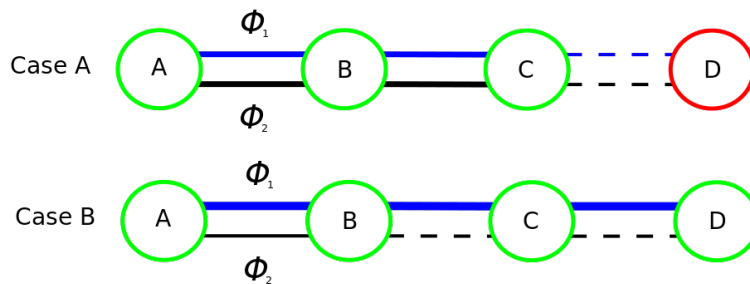
(a) A helyreállítás előtti és utáni költségek hányada



(b) Helyreállítási idő

2. ábra. Az  $RBPx$  legfontosabb tulajdonságai

Cross-Phase Modulation (*XPM*) és a Raman szórás határozza meg és nem a Brillouin-határ. Másképpen megfogalmazva, a szálba bejuttatott teljes jelteljesítmény korlátozott és nem az egyes jelek továbbítására használt csatornáké. Megoldható, hogy az egyes csatornák jelszintjeit megemeljük egészen a Brillouin-határig, miközben más csatornák jeleit leszabályozzuk, hogy a *XPM* és a Raman szórás jelentette megkötések továbbra is teljesüljenek. Ez az ötlet lehetővé teszi a Jelromlás-korlátozott Útvonalválasztás (Physical Impairment Constrained Routing - *PICR*) használatát [8]. A 3. ábra a *PICR* alapkonceptióját szemlélteti két hullámhosszon keresztül:  $\phi_1$  és  $\phi_2$ . A *Case A*-nál nem alkalmazzuk a *PICR*-t. Ennek megfelelően, a fizikai megkötések miatt, az *A* csomópont csak a *C* csomópontot éri el teljesen optikai módon. Ha egy olyan igény érkezik, amely az *A* és a *D* pontok között van, úgy annak elvezetése csak úgy valósítható meg, hogy vagy a *B* vagy a *C* csomópontban elektromos erősítésre kerül sor. Ezzel szemben a *Case B* azt az esetet szemlélteti, amikor ugyanezt a problémát a *PICR*-t felhasználva oldottuk meg. Itt lehetőség van arra, hogy a  $\phi_1$  csatorna teljesítményét addig emeljük, amíg el nem érjük a kívánt optikai jel/zaj viszonyt a *D* csomópontban, feltéve hogy az összesített teljesítmény sehol se lépi túl a követelményeket. Így létrehozható egy közvetlen kapcsolat *A* és *D* között.



3. ábra. *PICR* – vastagabb vonalak nagyobb teljesítményt jelentenek, míg a szaggatottak a kapcsolat hiányát

*PICR* esetén a maximális távolságot a kívánt szolgáltatásminőség és az egyes élek teljesítménykorlátai határozzák meg. A jelteljesítmény megfelelő beállításával, ha kellően sok erőforrás áll rendelkezésre, a legtöbb igény elvezetése megvalósítható tisztán optikában, elektromos regeneráció nélkül. Természetesen a tisztán optikával el nem vezethető igényeket az útközön során valahol elektromos módon regenerálni kell

és így továbbítani. Ez azonban megnöveli a probléma komplexitását és az összesen felhasznált jelteljesítményt, ami ütközik a céljainkkal. Zöld hálózatokban a felhasznált teljesítmény minimalizálására kell törekedni. Ezért, hogy megvizsgáljam a *PICR* tulajdonságait és a benne rejlő lehetőségeket, ebben a tézisben semmilyen az elektromos réteghez kapcsolódó képességet sem veszek figyelembe, kivéve amelyek az igények eredeztetéséhez és végeztetéséhez szükségesek. A *PICR* részleteit a [8, 27] ismertetik.

**2. Tézis ( [C4–C6, J3]).** *Új heurisztikát javasoltam, amellyel bármely elvezetési algoritmus kiterjeszhető úgy, hogy figyelembe vegye a PICR nyújtotta lehetőségeket. Ezzel az eljárással kiterjesztettem a jól ismert Dijkstra algoritmust, illetve más eljárásokat. Ezeket felhasználtam dinamikus forgalom elvezetésére védelemmel és védelem nélkül, többretegű, optikai hálózatokban, PICR mellett. Ezen módszerek segítségével megemeltem a tisztán optikai úton elvezethető igények arányát. Szimulációkkal bizonyítottam, hogy védelem esetén a teljesítményosztás, az általános várakozásokkal szemben, csökkentheti az összesen tisztán optikai úton elvezethető igények arányát. A PICR-re történő átállás idejére, olyan esetekhez amikor védelemre van szükség, heurisztikákat dolgoztam ki azon igények kiválasztására, amelyek tisztán optikai úton vezetendők el. A javasolt módszerekkel sikeresen megnöveltem az elvezethető igények arányát.*

Különböző megoldások találhatóak az irodalomban fizikai kényszereket figyelembe vevő elvezetési módszerekre. Legtöbb esetben ezek a megoldások vagy külön-külön oldják meg az elvezetés, a hullámhossz-hozzárendelés és a fizikai kényszerek részproblémáit vagy nehezen általánosítható fizikai modellt alkalmaznak [28].

**2.1. Tézis ( [C4]).** *Egy új heurisztikus algoritmust javasoltam Dijkstra algoritmusának kiterjesztésére, egyesadások elvezetésére, elektromos regenerálás nélkül, PICR figyelembevétele mellett. A javasolt módszer újdonsága annak iteratív újrapróbáláson alapuló megközelítése, amely lehetővé teszi a tisztán optikai úton elvezetett igények arányának növelését.*

A javasolt módszer egy újrapróbáláson alapuló eljárás, amely a legrövidebb lehetséges út mentén próbálja meg elvezetni az igényt. Ha ez nem lehetséges, úgy az egyik olyan élt eltávolítja, ahol valamelyik kényszer sérül, majd a módosított gráfban

újra próbálkozik. A módszerrel növeltem a tisztán optikai úton elvezethető igények arányát.

**2.2. Tézis ( [C4] ).** *Élköltségfüggvényeket definiáltam a 2.1. Tézisben javasolt heurisztikához a Forgalom Tervezés (Traffic Engineering - TE) ötlete alapján, hogy megvizsgáljam növelhető-e ezzel az elvezetett igények száma vagy csökkenthető a felhasznált teljesítmény. Kimerítő szimulációkkal megmutattam, hogy a TE szerinti költségfüggvények növelhetik a felhasznált teljesítményt és csökkenthetik az elvezetett igények arányát PICR esetén.*

A TE ötlete az, hogy azokat az utakat válasszuk, amik a későbbi igényekkel a lehető legkisebb mértékben interferálnak [29]. Teljesítmény alapú TE esetén ez azt jelenti, hogy azt az utat kell választani, ami olyan éleken megy át, ahol az addig lefoglalt teljesítmény a lehető legkisebb. Így a TE hosszabb útvonalakat fog választani, ami növeli az összesített teljesítményt. Ez még hosszabb utat eredményez a következő igény számára és így tovább. Végül a hálózat már néhány igény miatt túltelítődik. A *Cost266BT* és a *NFSNet* hálózatokon végzett szimulációkkal megerősítettem ezt az elképzelést.

Az esetek többségében egy üzemi út is elégséges a végfelhasználó által igényelt rendelkezésre állás biztosítására. Vannak azonban olyan szolgáltatások ahol egy út magában nem elég, ilyenek például a nemzetközi bankok vagy a VPN-ek. Az első lépés a nagyobb rendelkezésre állás felé az *1+1* védelem [5].

**2.3. Tézis ( [C5] ).** *A 2.1. Tézisben javasolt heurisztikát kiterjesztettem egyesadás elvezetésére védelemmel, teljesítmény osztást figyelembe véve és anélkül. Szimulációk és példák segítségével megmutattam, hogy a várakozásokkal ellentétben, a teljesítményosztás az elvezethető igények arányát esetleg csökkenti, míg a szükséges teljesítményt növeli nagy vagy közel telített hálózatokban PICR esetén.*

A javasolt heurisztika két aspektusát is felöleli az elvezetésnek: a védelem módja – osztott vagy hozzárendelt –, illetve a védelmi út szükségessége – az igény csak védelmi úttal vezethető el vagy a védelem egy 'best effort' szolgáltatás. Az utóbbi esetre, mint részleges megoldásra hivatkozom.

A szimulációkat végeztem mind a *Cost266BT*, mind a *NFSNet* hálózatokon. Véletlenszerű egyesadás forgalmat generáltam, a forrás és a nyelőket egyenletes eloszlás szerint sorsolva. A hálózat állapotát periodikusan ellenőriztem legalább 20000 igény elvezetéséig.

Megmutattam, hogy ha a hálózat nagy vagy sok az igény, úgy részleges elvezetés lehet az a megoldás, amivel az üzemeltetők maximalizálni tudják a nyereséget és optimalizálhatják az erőforrások kihasználtságát.

Új technológiák csak lépésről-lépésre nyerhetnek teret. Ez azt jelenti, hogy *PICR* csak úgy vezethető be, hogy az üzemeltető a rendelkezésre álló teljesítmény és hálámhossz halmazának egy részét ezen technológia számára elkülöníti, majd ezt a részt fokozatosan növeli. Természetesen a kezdetekben a *PICR* számára fenntartott erőforrások nem lesznek elégségesek az összes igény elvezetésére. Ugyanakkor törekedni kell a lehető legtöbb igénynek *PICR*-rel történő elvezetésére, részben a migrálás gyorsítása, részben a lehetséges energia megtakarítások maximalizálása miatt. Ennek megfelelően egy olyan módszerre van szükség, amely meghatározza mely igényeket vezessük el *PICR*-rel és melyeket ne.

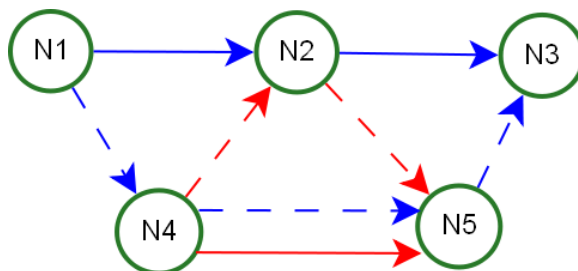
**2.4. Tézis ( [C6, J3]).** *Új eljárásokat dolgoztam ki a PICR technológia fokozatos bevezetésére, olyan hálózatokban ahol az igények jellemzően igényelnek védelmet. Az eljárások azokat az igényeket választják ki, amelyeket PICR-t használva javasolt elvezetni. A kiválasztás az utak hosszán vagy a védelmi és az üzemi út hosszának arányán alapulhat.*

Arról a döntést, hogy az igényt *PICR*-rel vagy anélkül kell elvezetni az igény belépésének pillanata és aközött az időpont között kell meghozni, amikor az erőforrások lefoglalásra kerülnek. A szűrés az útvonalak különböző tulajdonságaira épülhet. *PICR* esetén a szükséges teljesítmény az útvonal hosszának függvénye. A 2.2. Tézisnél megmutattam, hogy a *TE* alkalmazása nem ajánlott *PICR* esetén, a lehető legrövidebb utakra kell törekedni. Ezért a szűrőeljárásokat az utak hosszára alapoztam.

A leghosszabb út mérete eleve limitált *PICR* esetén. A megkötés mértéke a hálózat tulajdonságaiból és a megkövetelt szolgáltatásminőségből számítható. Az első javaslatom ennek a megkötésnek a mértékét növelné meg oly módon, hogy már egy

kisebb hossz átlépése esetén se lehessen az igényt elvezetni – a hossz korlát mind a védelmi, mind az üzemi útra értendő.

A 4. ábra szemlélteti a második javaslat mögötti ötletet – azaz az üzemi és a védelmi út arányának limitálását. Általában a távoli forrás és nyelő közötti igények üzemi és védelmi útja közel egyforma hosszúságú. Ez azonban nem igaz, ha a kezdő és a végpont egymáshoz közel helyezkednek el. Ilyenkor, általános esetben, a védelmi út relatíve sokkal hosszabb, mint az üzemi. Annak érdekében, hogy ezt az észrevételt is figyelembe tudjam venni egy újabb feltételt vezettem be: ha a védelmi út hossza osztva az üzemi útával kisebb, mint egy előre meghatározott érték, úgy az igényt nem szabad *PICR*-rel elvezetni (ilyenkor a 'hagyományos' elvezetési módszereket ajánlott használni).



4. ábra. Üzemi és védelmi utak arányának alakulása. Üzemi utakat folytonos, a védelmieket szaggatottal jelöltem. Minden él hossza egy. Az *D1* igény *N1* és *N3* között halad. A védelmi és az üzemi út aránya 1,5. A *D2* igény *N4* és *N5* között halad. A védelmi és az üzemi út aránya 2.

A javaslatok validálása céljából szimulációkat végeztem különböző méretű és telítettségű hálózatokban. A javasolt szűrési eljárásokkal meg tudtam emelni a *PICR*-rel összesen elvezethető igények arányát. A szimulációs eredmények alapján az útvonalhossz korlát mind az arányalapú, mind az eredeti megközelítést felülmúlja az összesen elvezetett igények arányában. Az eredmények háttérben a rövid és így kis energiaigényű igények erős preferálása van. Azaz a javulást azáltal érzük el, hogy a rövidebb igények kevesebb élen, kisebb teljesítményt használnak fel. Az így felszabaduló teljesítmény felhasználható további igények elvezetésére.



### 5.3. Jelromlás-korlátozott Útvonalválasztás alapú többesadás elvezetés

Átlagos HDTV sávszélességigénye, a használt kódolás függvényében, 8 és 16 Mbps közé esik. Várhatóan ez a későbbiekben növekedni fog a 3D [30], a 4k és egyéb új technológiák függvényében. Átlagos TV szolgáltató 100 és 200 különböző csatornát is ajánlhat a felhasználóinak, ami együtt néhány Gbps. Ekkora sávszélesség már összemérhető egy hullámhossz csatorna kapacitásával. Minden csatornát el kell juttatni a szolgáltató központjából a felhasználóig. Ennek a problémának az egyik lehetséges megoldása egy olyan többesadás, amelynek forrása a szolgáltató központja, levelei az egyes előfizetők és az operátor a megoldás során végig arra törekszik, hogy azonos hullámhosszt foglaljon az adás számára.

A szolgáltató kombinálhatja a többesadás és a *PICR* képességeit, hogy olcsó és egyszerűen megvalósítható szolgáltatást tudjon biztosítani. Legjobb tudomásom szerint, az irodalomban erre a problémára fellelhető megoldások nem veszik figyelembe az optikai hálózatokban történő többesadás összes aspektusát – elvezetés, hullámhossz hozzárendelés – vagy hiányzik belőlük egy általános, *PICR* jellegű fizikai modell. A téziscsoport célja, hogy optimális és heurisztikus megoldásokat javasoljon erre a problémára.

**3. Tézis ( [C7, J4]).** *Javasoltam két új ILP formalizmust: az egyik alkalmas a teljesen optikai igényelvezetés problémájának megoldására többesadás esetén, optikai osztást figyelembe véve, míg a másik olyankor alkalmazandó amikor az elektromos osztás mindenhol engedélyezett. Kiterjesztettem a Minimum Path Heuristics-t (MPH) és a Accumulative Shortest Path-t (ASP), hogy megoldjam a PICR problémáját, amikor elektromos osztás csak a forrásban és nyelőkben engedélyezett. Megmutattam a javasolt módszerek pozitív tulajdonságait.*

TV szolgáltatások többé-kevésbé statikusak, útvonaluk előre számítható optimális módon. A 2. Téziscsoportban bemutatott technológia lehetővé teszi optikai osztók, regenerátorok használatát az igény útja során. Optikai osztók esetén két lehetőséget érdemes megvizsgálni: az osztást követően a kimenő jelteljesítmény szintje a bemenő teljesítményre kerüljön visszaerősítésre vagy csak olyan mértékű erősítés történjen,

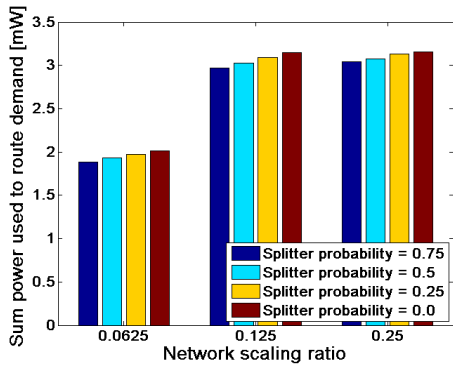
hogy a cél elérhető legyen. Az előbbi egyszerű, de pazarló. Az utóbbi bonyolult, de takarékos.

**3.1. Tézis ( [J4] ).** *Kidolgoztam két új ILP felírást, amelyek optimális megoldást szolgáltatnak többrétegű optikai hálózatokban többesadás igény elvezetésére, tisztán optikai módon, PICR-t figyelembe véve. Az egyik felírás olyan hálózatoknál alkalmazható, ahol az optikai osztás után a kimeneti teljesítmény nem szabályozható, a másik olyanokhoz ahol igen. Szimulációk segítségével megmutattam az optikai többesadásnak és annak a lehetőségnek a jó tulajdonságait, amikor az optikai osztás után a kimeneti teljesítmény szabályozható. Példákkal megmutattam miért fontos az elvezetést, a hullámhossz-hozzárendelést és a PICR együttesen megoldani.*

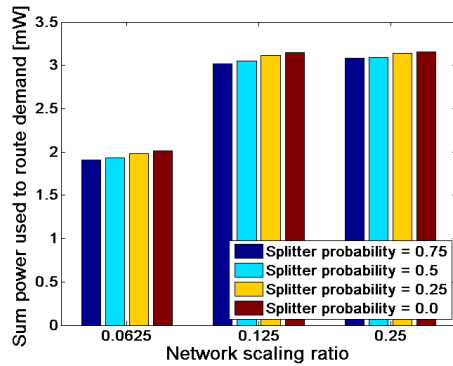
A két *ILP* formalizmust egy szimulátorban valósítottam meg. A szimulációk során a *NFSNet*-t használtam, a többesadási igények 1-6 végponttal rendelkeztek. Azokat a csomópontokat, ahol optikai osztás lehetséges véletlenszerűen választottam. A végzett szimulációkkal megmutattam, hogy az optikai osztás jelentősen csökkentheti a szükséges teljesítményt (a futtatások során átlagosan 3%-os volt a megtakarítás). A kimenő jel teljesítményének szabályozásával kapcsolatos eredmények nem voltak ennyire meggyőzőek, de ez a hálózat topológiájával magyarázható. Az eredményeket a 5. ábra szemlélteti.

**3.2. Tézis ( [J4] ).** *Új ILP formalizmust javasoltam többesadás elvezetésére optikai hálózatokban, amely a PICR mellett, figyelembe veszi az elektromos réteg olyan képességeit, mint az elektronikus osztás és regenerálás, miközben az elvezetés és a hullámhossz-hozzárendelés problémáját is megoldja. A javasolt ILP lehetővé teszi, hogy az operátor a probléma globális optimumát találja meg.*

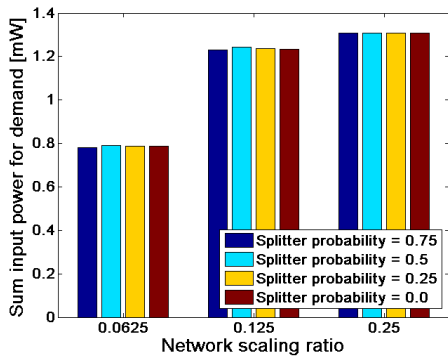
A javasolt *ILP* formalizmus szükséges számítási ideje esetleg megengedhetetlenül hosszú lehet – a probléma bonyolultsága és a felhasznált változók száma miatt –, ha a többesadás időről-időre változik. Fizikai kényszereket figyelembe vevő heurisztikus megoldásokat több szerző is javasolt [31, 32], de ezek nem vették figyelembe az elvezetés összes aspektusát – útvonal választás, hullámhossz hozzárendelés, illetve *PICR*.



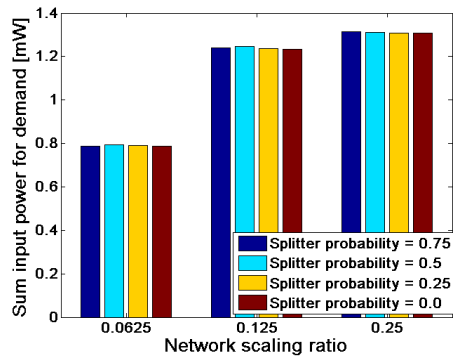
(a) Az összesített teljesítmény a hálózaton, ha a teljesítményszintek minden cél felé külön-külön szabályozhatók az optikai osztás után.



(b) Az összesített teljesítmény a hálózaton, ha a teljesítményszint csak egységesen szabályozható az optikai osztás után.



(c) Összesített igény teljesítmény, ha a teljesítményszintek minden cél felé külön-külön szabályozhatók az optikai osztás után.



(d) Összesített igény teljesítmény, ha a teljesítményszint csak egységesen szabályozható az optikai osztás után.

5. ábra. Átlagos teljesítményszükséglet egy igény elvezetéséhez az *NFSNet* hálózatban, különböző számú optikai osztó mellett a hálózatban

Az optikai osztás képessége még nem minden hálózatban került telepítésre. Az átmeneti időszakban, amíg a *PICR* széles körben támogatottá nem válik, a hálózatok üzemeltetői esetleg arra törekcszenek, hogy az igényeket majdnem teljesen optikai módon vezessék el. Ez a megközelítés azt jelentené, hogy elektromos osztást is alkalmaznak, de csak a többesadás forrásában és nyelőiben, mindenféle optikai osztás nélkül.

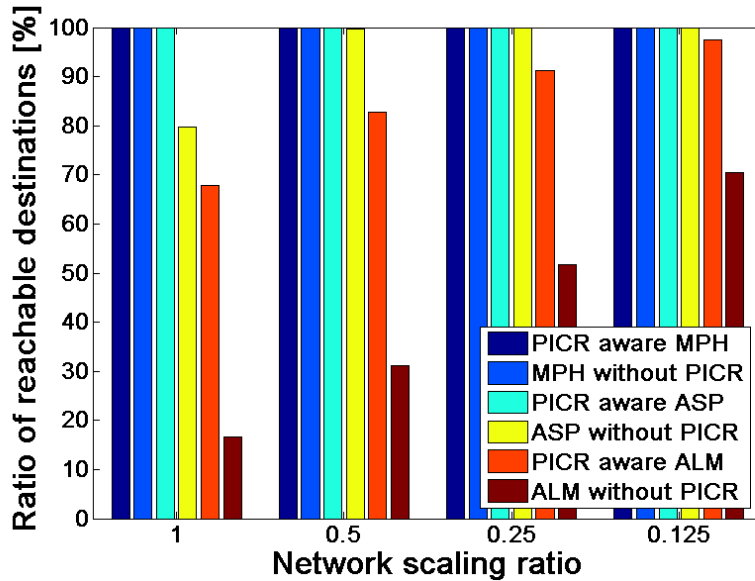
**3.3. Tézis ( [C7, J4]).** *Kiterjesztettem mind az ASP-t, mind az MPH-t a PICR problémájára, többretegű, optikai hálózatokban, amikor elektronikus osztás csak a forrás- és a célcsomópontokban engedélyezett. A módosított módszereket EASP-nek és EMPH-nek neveztem el. Bebizonyítottam, hogy az EMPH optimális megoldást biztosít, ha egy igény kerül elvezetésre és elégséges erőforrás áll rendelkezésre átlagos hálózatok esetén. A javasolt módszerek, az Alkalmazásszintű Többesadás (ALM) és a PICR-re fel nem készített módszerek teljesítményét összehasonlítottam. Megmutattam, hogy a javasolt kiterjesztés jelentősen növeli az elvezethető igények számát.*

Az *ASP* – ami egy kismértékben módosított szekvenciális *Dijkstra* – könnyen kiterjeszthető az adott problémára. A kiterjesztése nagyobbbrészt megegyezik az egyszerű *Dijkstra*-nál bemutatott módszerekkel 2.1. Tézis.

Az *MPH* kiterjesztése valamelyest bonyolultabb. A probléma forrása, hogy az egyszerű *MPH* a következő legközelebbi, még el nem ért csomópontot illesztené a hálózatba. Az adott esetben azonban nem lehet tudni melyik a legközelebbi csomópont. Csak az állapítható meg, hogy melyik a legrövidebb 'útvonal jelölttel' rendelkező nyelő – elképzelhető, hogy a legközelebbinek hitt pont útvonala egy vagy több kényszert is megsért. Ezért egy olyan listát kell készíteni, ami a lehetséges jelölteket, azok legrövidebb útját valamint azokat az éleket tartalmazza, amik a korábbi lépések során kizárásra kerültek. Ezt a struktúrát kell karban tartani, azaz az egyes útvonal jelölteket ellenőrizni – azokat esetleg kivenni vagy egy részigény elvezetésére használni –, illetve a kizárt élek listáját bővíteni. Minden olyan esetben, amikor egy részigény kerül elvezetésre a lista addigi tartalmát törölni kell.

A tézishez kapcsolódva végzett szimulációkat a *Cost266BT* hálózatban hajtottam végre. 2000 különböző forgatókönyvet elemeztem, 1 és 5 közötti többesadás igényvel, 1-26 célcsomóponttal igényenként. Az egyes csomópontok egyenletes eloszlással kerültek kisorsolásra. Az elvégzett szimulációk alapján, 6. ábra, elmondható, hogy a

javasolt algoritmusok megnövelik az elérhető csomópontok arányát.



6. ábra. Az újonnan javasolt módszerekkel elvezethető igények aránya

#### 5.4. Bakteriális Evolúciós Algoritmus alkalmazása elvezetési problémákra

A megoldandó problémák komplexitása növekszik, akárcsak a felhasználók igénye arra, hogy jó minőségű eredményeket kapjanak elfogadható időn belül. Ez a két tényező segíti az úgynevezett 'lágyszámítási' (soft computing) módszerek elterjedését.

A lágyszámítási módszereken belül sok megközelítés ismert, amelyek alkalmasak kvázi optimális megoldások meghatározására különböző problémák kapcsán – Tabukeresés (Tabu Search) [33], Szimulált Lehűtés (Simulated Annealing) [34], Neurális Hálózatok (Neural Networks) [35], Fuzzy Rendszerek (Fuzzy-systems) [36], stb. Mind-egyik módszer rendelkezik a maga előnyeivel és hátrányaival, erősségével és gyengeségeivel. Mindig a mérnök feladata meghatározni, hogy melyik módszert alkalmazza és legfőképpen milyen módon. Ez a két döntés meghatározza az eredmény várható minőségét. Minden új módszer felbukkanásakor fontos kérdés, hogy mely problémák megoldására a legalkalmasabb. Az egyik legújabb elképzelés ezen a területen a

Bakteriális Evolúciós Algoritmus (Bacterial Evolutionary Algorithm - *BEA*), amit a korábbiakban már sikeresen használtak különböző problémák megoldására. Azonban, legjobb tudásom szerint, ezt a módszert még nem alkalmazták igények elvezetésére optikai hálózatokban.

**4. Tézis ( [C8, C9, J4]).** *Bevezettem egy új, BEA-t alkalmazó keretrendszert, amely lehetővé teszi, hogy a hálózat üzemeltetője egy számára megfelelő egyensúlyt találjon a megoldás minősége és annak kiszámításához szükséges idő között szinte bármely olyan elvezetési problémánál, ahol legalább egy költség alapú heurisztika létezik és egy jósági mérték meghatározható. Kiterjesztettem a keretrendszert, a fitness és az alkalmazott elvezetési módszerek megváltoztatásával, egyes és többesadás igények elvezetésére, védelemmel és védelem nélkül, illetve PICR esetében.*

A 2. és a 3. Tézisben heurisztikus és optimális módszereket javasoltam egyes- és többesadás igények elvezetésére és védelmére. Mindezek ellenére gyakran nincs szükség az *ILP* formalizmus pontosságára, csak egy olyan 'kellően jó' megoldásra, ami heurisztikákkal már nem vagy csak nehezen állíthatók elő. Az irodalomban a legkülönbözőbb módszerek lelhetőek fel többesadás elvezetésére védelemmel és védelem nélkül, ide értve optimális [37], és heurisztikus módszereket – védelem esetén p-fa (p-tree) [38], duális-fa (dual tree) [39], stb. –, de meta-heurisztika alapú megközelítés köteget, többretegű optikai hálózatokban nem ismert. A téziscsoport célja, hogy *BEA* alapú megoldást javasoljon erre a problémára.

**4.1. Tézis ( [C8, C9]).** *Új BEA alapú megközelítést javasoltam, egyes- és többesadás elvezetésére többretegű hálózatokban, védelemmel és védelem nélkül. Bevezettem egy új genotípust, amely egy virtuális élköltség rendszert és az igények elvezetésének sorrendjét foglalja magában. Analitikusan bizonyítottam, hogy bizonyos költségfüggvények mellett ez a genotípus nem egyszerűsíthető. Szimulációkkal bizonyítottam a módszer képességét arra, hogy közel optimális vagy optimális megoldást adjon a vizsgált problémákra polinomiális időben.*

A javasolt megoldás alapötlete a következő: új heurisztika definiálása helyett olyan költségeket és elvezetési sorrendet kell definiálni, ami mellett egy ismert heurisztika képes kvázi optimális megoldást találni. A *BEA* feladata tehát a megfelelő költség

és a sorrend megkeresése. A gyakorlatban ehhez definiálni kell a *BEA* legfontosabb paramétereit és az operátorokat – genotípus, fenotípus, fitness és fenotípus számítás. Ezt a következő módon tettem meg:

- A fenotípus a megoldás, azaz az igények elvezetésének módja.
- A fitness az elvezetés költsége szorozva mínusz eggyel.
- Genotípus, a baktérium tudása, a következőkből áll: virtuális élköltség, igények sorrendje.
- A fenotípus a genotípusból számítható oly módon, hogy a virtuális költségek alapján kerülnek az igények elvezetésre, abban a sorrendben ami a fitnessben került lekódolásra.

A tézishez kapcsolódó szimulációk az *Cost266* hálózatokban kerültek végrehajtásra, 1-5 igénnyel, igényenként 1-10 cél csomóponttal. A szimulációk segítségével megmutattam, hogy a javasolt módszer számítási ideje lineáris a cél csomópontok számával, illetve a *BEA* paramétereivel, valamint a megoldás minősége felülmúlja az egyszerű heurisztika képességeit. A védelemmel elvezetett igényekre vonatkozó eredményeket a 1. táblázat mutatja.

A 3. Tézisben módszereket adtam többesadás *PICR*-t figyelembe vevő elvezetésére, amikor csak optikai osztás használható ám minden csomópontban, illetve amikor elektronikus osztás és regenerálás is lehetséges, de csak a forrásban és a célcsoomópontokban. A gyakorlatban azonban ennek a kettőnek a kombinációja adhatná a lehető legjobb megoldást. Sajnos, a probléma komplexitása lehetetlenné teszi, hogy azt optimalitást garantáló módszerekkel, elfogadható időn belül megoldjuk, egy átlagos méretű hálózatra. Arra viszont van lehetőség, hogy kvázi optimális megoldást adjunk

1. táblázat. Különböző módszerek átlagos teljesítménye (*KDP* a K-Disjoint Paths, *SPLDP* a Shortest Pair of Link Disjoint Paths-t rövidíti)

Módszer	Hálózat	Költség	Idő (sec)	Blokkolás backup paths	Használt E/O Port
<i>BEA</i> 1. generáció	Cost266BT	120,3	11,3	0	29,4
<i>BEA</i> 30. generáció	Cost266BT	109,3	338,96	0	28,1
<i>BEA</i> 45. generáció	Cost266BT	108,3	508,43	0	28
<i>BEA</i> 100. generáció	Cost266BT	107,3	1132	0	27,9
KDP	Cost266BT	144,6	0,08	1,1	27,25
SPLDP	Cost266BT	144,4	1,77	0,9	27,48
<i>BEA</i> 1. generáció	Cost266LT	132,5	15,7	0	31
<i>BEA</i> 30. generáció	Cost266LT	121,4	471,3	0	29,6
<i>BEA</i> 45. generáció	Cost266LT	120,4	707	0	29,5
<i>BEA</i> 100. generáció	Cost266LT	118,83	1571,3	0	29,3
KDP	Cost266LT	180,5	0,1	0,24	32,4
SPLDP	Cost266LT	174,4	3	0,05	32,2

a problémára.

**4.2. Tézis ( [J4] ).** *Két új BEA alapú megoldást javasoltam egyes és többesadás elvezetésére többretegű hálózatokban PICR mellett. A kidolgozott megoldások a következő problémákat képesek optimalizálni:*

- *osztás/regenerálás csak a forrásban és a nyelőben engedélyezett,*
- *osztás/regenerálás minden csomópontban engedélyezett.*

*A javasolt módszerek és különböző heurisztikák eredményeit - kimerítő szimulációk segítségével – összehasonlítottam. Bizonyítottam a javasolt módszerek alkalmasságát kvázi optimális megoldások megtalálására elfogadható időkereteken belül.*

*PICR* esetén a virtuális élköltségrendszert módosítani kell. Mivel az igények új módon gyakorolnak hatást egymásra – közös teljesítményen kell osztozniuk, ha közös élt használnak –, ezért igényenként különálló virtuális költségrendszerekre van szükség.



Ha az elektronikus regenerálás is megengedett, úgy a keresési algoritmust is módosítani kell, hogy az út felmenjen az elektronikus rétegbe, ha a megtett távolság azt szükségessé teszi. A fitnesszt úgy kell módosítani, hogy a felhasznált teljesítményt is magába foglalja. Ennek megfelelően a legfontosabb operátorokat a következőképpen definiáltam:

- A fenotípus a probléma megoldása, azaz az igények elvezetésének módja.
- A fitnessz az elvezetés költségének és a használt teljesítménynek a súlyozott összege, mínusz eggyel szorozva.
- A genotípus a következőket foglalja magában: virtuális élköltségrendszer minden egyes igényhez és az elvezetés sorrendje.
- A fenotípust a genotípus alapján határozzuk meg úgy, hogy az igényeket a genotípusban tárolt sorrend szerint vezetjük el a szintén ott tárolt él költségeket felhasználva.

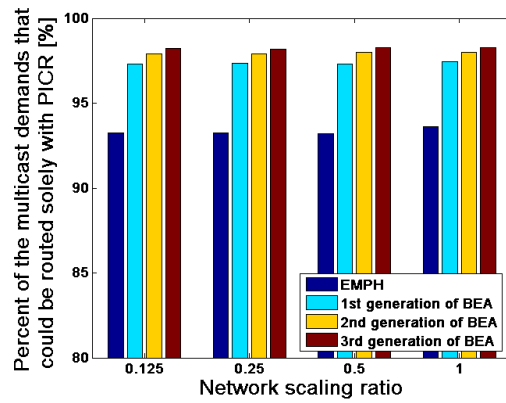
Szimulációk segítségével megerősítettem a javasolt módszerek jó tulajdonságait: lineáris a *BEA* paramétereivel, az igények számával, egyszerű heurisztikánál jelentősen jobb eredményt képes adni. A limitált osztásra vonatkozó eredményeket a 7. ábra, a korlátozás nélkülire vonatkozókat a 8. ábra mutatja.

A javasolt megoldások alapötletei alkalmazhatók más, genetikus algoritmusokkal és véletlen kereső módszereknél. Ezekhez csak az alkalmazott operátorokat – mutáció, géntranszfer, stb. – kell az adott módszerben használt hasonló fogalmakhoz alakítani.

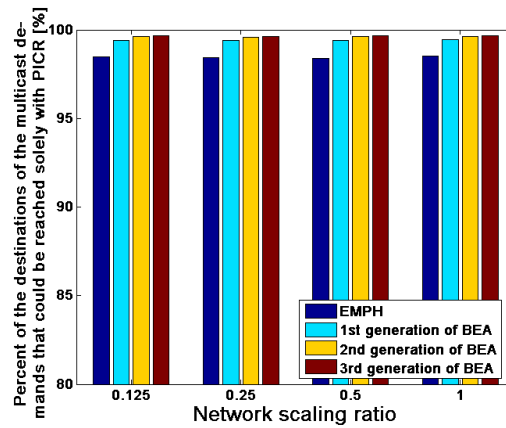
## 6. Az eredmények alkalmazhatósága

A többesadás helyreállítására a 5.1. fejezetben bemutatott módszerek nem optika specifikusak. Minden olyan környezetben alkalmazhatók ahol egy forrásból kell az információ több cél felé eljuttatni. Ilyen problémákat találunk például a logisztikában.

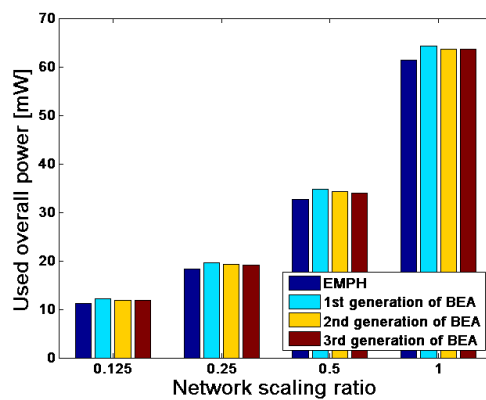
A *PICR* alap koncepciója azt egyértelműen az optikai technológiákhoz kötik. Ennek ellenére a kidolgozott módszerek alkalmazhatóak minden olyan problémára, ahol a megteendő távolsággal arányos a költségfüggvény, vannak közös erőforrások és azok



(a) Teljesen elvezetett többesadási igények száma

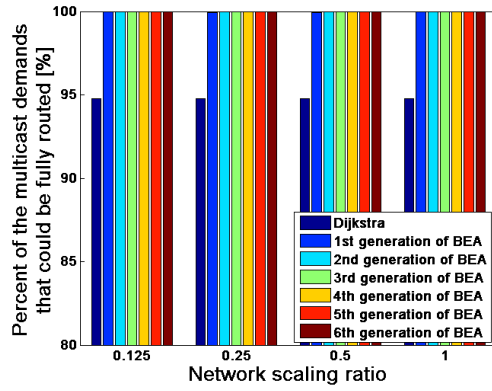


(b) Az elért célsomópontok aránya

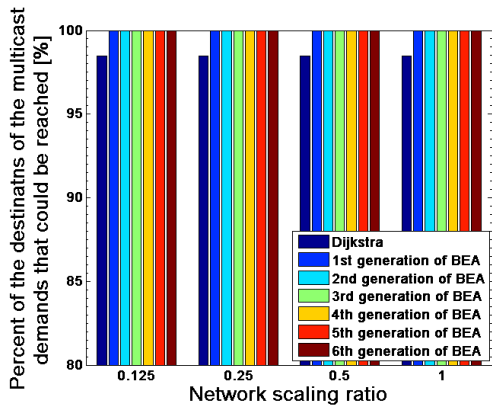


(c) Összesített teljesítmény, ami az igények elvezetéséhez szükséges

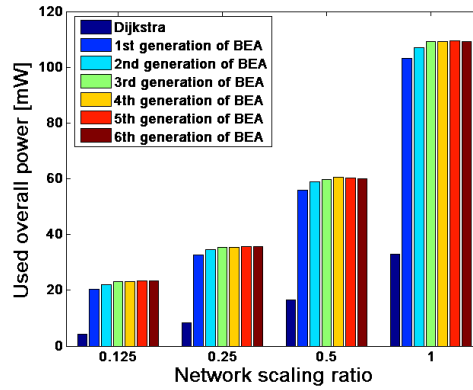
7. ábra. A javasolt *BEA* alapú *PICR*-t figyelembe vevő módszer eredményei ha osztás és regenerálás csak a forrásnál és a célsomópontokban lehetséges



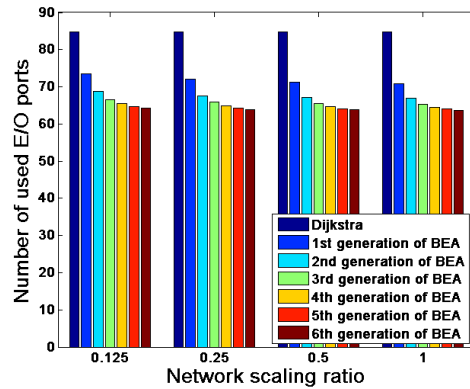
(a) Teljesen elvezetett többesadási igények aránya



(b) Az elért célsomópontok aránya



(c) Összesített teljesítmény, ami az igények elvezetéséhez szükséges



(d) Használt E/O portok száma

8. ábra. A javasolt *BEA* alapú *PICR*-t figyelembe vevő módszer eredményei ha az E/O használatára semmilyen megkötés sincs

használatára vonatkozó maximumok. Távközlő hálózatok mellett ilyen jellegű problémák találhatók a logisztikában.

A többes- és egyesadás elvezetésénél kidolgozott *BEA* alapú módszerek alapkonceptiója minden olyan elvezetési problémánál alkalmazhatók, ahol több mint egy igény van és létezik egyszerű, költség alapú heurisztika. Ezt bizonyítják az ezen a módszeren alapuló Osztott Kockázatú Él Csoportokat (Shared Risk Link Group - *SRLG*) is figyelembe vevő elvezetési módszerek, melyeket [OC2]-ben publikáltunk.

## Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni konzulensemnek, Dr. Cinkler Tibornak a bátorítást, a szakmai vezetést és folyamatos támogatást. Köszönettel tartozom azért, hogy megismertette velem ezt a szép kutatási területet. Megtiszteltetésnek érzem, hogy velem dolgozhattam együtt.

Kutatási munkámat az Ericsson és a Nagysebességű Hálózatok Laboratóriuma (HSNLab) közötti együttműködés keretében végeztem, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen. Hálás vagyok Dr. Vidács Attilának és Dr. Henk Tamásnak folyamatos támogatásukért.

Szeretnék köszönetet mondani mindenkori társszerzőimnek, akiknek a hozzáértése és tanácsai lehetővé tették, hogy a cikkeinket a lehető legjobb konferenciákra és folyóiratokba sikeresen nyújtsuk be. Külön szeretnék köszönetet mondani tanszéki kollégáimnak és barátaimnak, ezen belül is Babarczy Péternek.

Hálás vagyok apámnak, Soproni Bélának, és nővéremnek, Soproni Évának, a kutatómunkám folyamatos támogatásáért.

Továbbá szeretnék köszönetet mondani a Startvox-nál dolgozó munkatársaimnak, úgymint barátaimnak.

## Hivatkozások

- [1] C.V.N. Index. Cisco visual networking index: Forecast and methodology, 2010-2015. *White Paper, CISCO Systems Inc*, 9, 2011.
- [2] R.W. Tkach. Network traffic and system capacity: Scaling for the future. In *Optical Communication (ECOC), 2010 36th European Conference and Exhibition on*. IEEE, 2010.
- [3] B. Quinn és K. Almeroth. Ip multicast applications: Challenges and solutions. *Internet Engineering Task Force (IETF) Internet Draft*, 2001.
- [4] L. Guo, X. Wang, J. Cao, W. Hou, J. Wu, és Y. Li. Local and global hamiltonian cycle protection algorithm based on abstracted virtual topology in fault-tolerant multi-domain optical networks. *Communications, IEEE Transactions on*, 58(3):851–859, 2010.
- [5] R. Bhandari. *Survivable Networks: Algorithms for Diverse Routing*. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [6] T. Feng, L. Ruan, és W. Zhang. Intelligent p-cycle protection for multicast sessions in wdm networks. In *Communications, 2008. ICC'08. IEEE International Conference on*, pages 5165–5169. IEEE, 2008.
- [7] L. Valcarenghi és A. Fumagalli. Implementing stochastic preplanned restoration with proportional weighted path choice in ip/gmpls/wdm networks. *Photonic Network Communications*, 4(3):285–295, 2002.
- [8] M. Perényi, Sz. Zsigmond, és T. Cinkler. ILP Formulation of Signal Power Based Routing of Single- and Multi-Layer Optical Networks. In *Proc. 5th Int. Conf. on Broadband Communications, Networks and System (BROADNETS)*, sep 2008.
- [9] FK Hwang és D.S. Richards. Steiner tree problems. *Networks*, 22(1):55–89, 1992.
- [10] Markus Prosegger és Abdelhamid Bouchachia. Ant colony optimization for steiner tree problems. In *CSTST '08: Proceedings of the 5th international conference on Soft computing as transdisciplinary science and technology*, pages 331–336, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [11] H. Cheng, X. Wang, S. Yang, M. Huang, és J. Cao. Qos multicast tree construction in ip/dwdm optical internet by bio-inspired algorithms. *Journal of Network and Computer Applications*, 33(4):512–522, 2010.

- [12] N.E. Nawa és T. Furuhashi. Fuzzy system parameters discovery by bacterial evolutionary algorithm. *Fuzzy Systems, IEEE Transactions on*, 7(5):608–616, 1999.
- [13] T. Cinkler. Ilp formulation of grooming over wavelength routing with protection. In *Towards an Optical Internet: New Visions in Optical Network Design and Modelling: IFIP TC6 Fifth Working Conference on Optical Network Design and Modelling (ONDM 2001), February 5-7, 2001, Vienna, Austria*. Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [14] M.S. Bazaraa, J.J. Jarvis, és H.D. Sherali. *Linear programming and network flows*. Wiley, 2009.
- [15] D.S. Hochba. Approximation algorithms for np-hard problems. *ACM SIGACT News*, 28(2):40–52, 1997.
- [16] H. Takahashi és A. Matsuyama. An approximate solution for the Steiner problem in graphs. *Math. Japonica*, 24(6):573–577, 1980.
- [17] J. Botzheim, B. Hámori, L.T. Kóczy, és A.E. Ruano. Bacterial algorithm applied for fuzzy rule extraction. *Proceedings of the International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-based Systems, IPMU*, pages 1021–1026, 2002.
- [18] N.K. Singhal, L.H. Sahasrabudde, és B. Mukherjee. Optimal multicasting of multiple light-trees of different bandwidth granularities in a WDM mesh network with sparse splitting capabilities. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 14(5):1104–1117, 2006.
- [19] R. Inkret, A. Kuchar, és B. Mikac. Advanced infrastructure for photonic networks: Extended final report of COST Action 266. *Zagreb: Faculty of Electrical Engineering and Computing, University of Zagreb*, pages 19–21, 2003.
- [20] B. Chinoy és H.W. Braun. The national science foundation network. *San Diego Supercomputing Center technical report GA- A*, 1992.
- [21] G. Maier, A. Pattavina, S. De Patre, és M. Martinelli. Optical network survivability: protection techniques in the WDM layer. *Photonic Network Communications*, 4(3):251–269, 2002.
- [22] J.P. Vasseur, M. Pickavet, és P. Demeester. *Network recovery: Protection and Restoration of Optical, SONET-SDH, IP, and MPLS*. Morgan Kaufmann Publishers, 2004.

- [23] S. Banerjee, S. Lee, B. Bhattacharjee, és A. Srinivasan. Resilient multicast using overlays. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, 31(1):102–113, 2003.
- [24] IP IST. Project deliverable d2.3: Report on resilience mechanism for nobel solutions in medium and long term scenarios. *Nobel Phase 2: Next generation Optical networks for Broadband European Leadership Phase 2s*, 2006.
- [25] Cisco ONS 15454 60G/5G High-Order/Low-Order XC-VXC Cross-Connect Card. *XC-VXL-10G/2.5G Cross Connect Cards for the Cisco ONS 15454 SDH MSPP*.
- [26] *MARCONI MHL 3000 CORE datasheet*.
- [27] E. Karasan és E. Ayanoglu. Effects of wavelength routing and selection algorithms on wavelength conversion gain in wdm optical networks. *IEEE/ACM Transactions on networking*, 6(2):186–196, 1998.
- [28] S. Azodolmolky, M. Klinkowski, E. Marin, D. Careglio, J.S. Pareta, és I. Tomkos. A survey on physical layer impairments aware routing and wavelength assignment algorithms in optical networks. *Computer Networks*, 53(7):926–944, 2009.
- [29] K. Kar, M. Kodialam, és TV Lakshman. Minimum interference routing of bandwidth guaranteed tunnels with MPLS traffic engineering applications. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, 18(12):2566–2579, 2000.
- [30] Y. Chen, M.M. Hannuksela, L. Zhu, A. Hallapuro, M. Gabbouj, és H. Li. Coding techniques in multiview video coding and joint multiview video model. In *Picture Coding Symposium, 2009. PCS 2009*, pages 1–4. IEEE, 2009.
- [31] T. Panayiotou, G. Ellinas, N. Antoniadis, és AM Levine. Designing and engineering metropolitan area transparent optical networks for the provisioning of multicast sessions. In *Optical Fiber Communication (OFC), collocated National Fiber Optic Engineers Conference, 2010 Conference on (OFC/NFOEC)*, pages 1–3. IEEE, 2010.
- [32] Y. Xin és G.N. Rouskas. Multicast routing under optical layer constraints. In *INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, volume 4, pages 2731–2742. IEEE, 2004.
- [33] F. Glover és M. Laguna. *Tabu search*. Kluwer Academic Pub, 1998.
- [34] S. Kirkpatrick, D.G. Jr., és M.P. Vecchi. Optimization by simulated annealing. *science*, 220(4598):671–680, 1983.

- [35] P. Baldi és K. Hornik. Neural networks and principal component analysis: Learning from examples without local minima. *Neural networks*, 2(1):53–58, 1989.
- [36] B. Kosko és J.C. Burgess. Neural networks and fuzzy systems. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 103:3131, 1998.
- [37] N.K. Singhal, L.H. Sahasrabudde, és B. Mukherjee. Protecting a multicast session against single link failures in a mesh network. *Communications, 2003. ICC'03. IEEE International Conference on*, 2, 2003.
- [38] F. Tang és L. Ruan. A protection tree scheme for first-failure protection and second-failure restoration in optical networks. *Networking and Mobile Computing*, pages 620–631, 2005.
- [39] M.Y. Saidi, B. Cousin, és M. Molnár. An efficient multicast protection scheme based on a dual-forest. *IRISA Internal Research Report*, 2006.



## Folyóirat cikkek (15,5 p)

- [J1] P. Soproni, M. Perenyi, és T. Cinkler. Multicast és forgalom kötegelés többrétegű hálózatokban. *Híradástechnika*, LXII(2):19–24, 2007. 1p/2 = 0,5p.
- [J2] Péter Soproni és Tibor Cinkler. Preplanned restoration of multicast demands in optical networks. *Computer Networks*, 56(6):1847–1862, 2012. 6p/1 = 6p.
- [J3] Péter Soproni, Tibor Cinkler, és Jacek Rak. Introduction of physical impairment constrained routing with protection to all-optical networks. *Telecommunication Systems*, 36(1):1–13, 2012. 6p/2 = 3p.
- [J4] Péter Soproni és Tibor Cinkler. Physical impairment aware multicast routing methods. *Telecommunication Systems*, 2013. Submitted, 6p/1 = 6p.

## Konferencia cikkek (14,05 p)

- [C1] Péter Soproni, Marcell Perényi, és Tibor Cinkler. Grooming-enhanced multicast in multilayer networks. In *ONDM2007*, pages 259–268, 2007. 3p/2 = 1,5p.
- [C2] Juan Pedro Gimenez, Raul Duque, Tibor Cinkler, Péter Soproni, Marcell Perényi, János Tapolcai, Péter Fodor, András Gulyás, Gyula Sallai, Javier Aracil Rico, és Rupert Gruenzinger. Network resilience requirements and algorithms for multicasting and broadcasting digital tv. *Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium, 2008. Networks 2008. The 13th International*, pages 1–37, 2008. 3p/10 = 0,3p.
- [C3] Tibor Cinkler, Marcell Perényi, és Péter Soproni. Restoration of multi-cast trees in optical-beared grooming-capable two-layer networks. In *Transparent Optical Networks, 2008. ICTON 2008. 10th Anniversary International Conference on*, volume 3, 2008. 3p/2 = 1,5p.
- [C4] Tibor Cinkler és Péter Soproni. Why traffic engineering does not work for physical impairments based routing. In *35th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC2009)*, 2009. 3p/1 = 3p.
- [C5] Tibor Cinkler, Péter Soproni, és Gyula Sallai. Shared protection of demands with Physical Impairment Constrained Routing. In *Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (NETWORKS), 2010 14th International*, pages 1–6. IEEE, 2010. 3p/2 = 1,5p.
- [C6] Péter Soproni, Tibor Cinkler, és Jacek Rak. Selective protection for all-optical physical impairment constrained routing. In *Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2011 3rd International Congress on*, pages 1–7. IEEE, 2011. 3p/2 = 1,5p.

- [C7] Péter Soproni és Tibor Cinkler. Physical Impairment Aware Multicast Routing Heuristics. In *Transparent Optical Networks, 2011. ICTON 2011.*, 2011. 3p/1 = 3p.
- [C8] Péter Soproni, János Botzheim, Tibor Cinkler, és László Tamás Kóczy. Grooming-enhanced multicast in multilayer networks with bacterial evolutionary algorithm. In *Proceedings of the 8th International Symposium of Hungarian Researchers on Computational Intelligence and Informatics*, pages 211–225, Budapest, Hungary, November 2007. 3p/3 = 1p.
- [C9] Péter Soproni, János Botzheim, Tibor Cinkler, Marcell Perényi, és David Larrabeiti. Protection of demands against single link failure in two layer networks with bacterial evolutionary algorithm. *MobileSummit 2009*, 2009. 3p/4 = 0,75p.

### **Tézisekhez nem kapcsolódó folyóirat cikkek (3, 7 p)**

- [OJ1] Marcell Perényi, Péter Soproni, és Tibor Cinkler. Periodic reconfiguration of groomed multicast trees in wdm networks. *Híradástechnika*, LXIII, 2008. 4p/2 = 2p.
- [OJ2] Marcell Perényi, Péter Soproni, és Tibor Cinkler. Multicast fák rendszeres újrakongurálása többretegű optikai hálózatokban. *Híradástechnika*, LXII:14–22., 2007. 1p/2 = 0,5p.
- [OJ3] Tibor Cinkler, Szilárd Zsigmond, és Péter Soproni. Bone master and bonetiger2 joint summer school 2010., 2010. Editor, 0p.
- [OJ4] Péter Babarczi, Gergő Biczók, Harald Overby, János Tapolcai, és Péter Soproni. Realization Strategies of Dedicated Path Protection: A Bandwidth Cost Perspective *Computer Networks*, 2013 Accepted, 6p/5 = 1,2p.

### **Tézisekhez nem kapcsolódó konferencia cikkek (4, 25 p)**

- [OC1] Marcell Perényi, Péter Soproni, Tibor Cinkler, és David Larrabeiti. Regular reconfiguration of light-trees in multilayer optical networks. *Optical Network Design and Modeling, 2008. ONDM 2008. International Conference on*, pages 1–6, 2008. 3p/3 = 1p.
- [OC2] Péter Soproni, Péter Babarczi, János Tapolcai, Tibor Cinkler, és Pin-Han Ho. A meta-heuristic approach for non-bifurcated dedicated protection in wdm optical networks. In *DRCN2011*, pages 110–117, 2011. 3p/4 = 0,75p.
- [OC3] Éva Hosszu, János Tapolcai, Lajos Ronyai, Péter Soproni, Péter Babarczi, és Pin-Han Ho. Fast failure localization in all-optical networks with length-constrained monitoring trails. *ICUMT*, pages 677–683, 2012. 3p/6 = 0,5p.

- [OC4] Tibor Cinkler, Réka Kosznai, Péter Soproni, és Krisztián Németh GSP, the Generalised Shared Protection *DRCN*, 2013. 3p/3 = 1p.
- [OC5] Krisztián Balázs, Péter Soproni, és László T. Koczy Improving System Reliability in Optical Networks by Failure Localization Using Evolutionary Optimization *SysCon*, 2013. 3p/3 = 1p.