



Önálló laboratórium beszámoló

Távközlési és Médiainformatikai Tanszék

Készítette:	Lestyán Ádám Barnabás
Neptun-kód:	FO6K58
Ágazat:	Infokommunikáció
E-mail cím:	lestyan.adam.01@gmail.com
Konzulens(ek):	Mogyorósi Ferenc
E-mail címe(ik):	mogyorosi@tmit.bme.hu

Téma címe: Természeti katasztrófák elleni hálózati fejlesztési algoritmusok összevonása

Feladat

A félév során kommunikációs hálózatok megbízhatóságát és ellenállóképességét kellett vizsgálnom természeti katasztrófák esetén. A feladat célja többek között az volt, hogy megismerjem, hogyan szokás összefüggő hálózatokat és természeti katasztrófákat modellezni. A modellek megismerése után a következő cél a szimulációs környezet megismerése volt és a különböző hálózatfejlesztési algoritmusok - heurisztikák - előnyeinek és hátrányainak vizsgálata. Egy heurisztika a hálózat(ok) összes lehetséges fejlesztését saját algoritmus szerint értékeli és rendezi sorba.

A hálózatfejlesztési algoritmusok megismerése után a célom az volt, hogy szimulációkat futtassak, amelyekben szimulálom egy összefüggő hálózat - egy kommunikációs- és egy energiahálózat – fejlesztését az egyes algoritmusok szerint, miközben természeti katasztrófák is szimulálódnak a hálózatokon.

A szimulációk futtatása után a következő cél a különböző hálózatfejlesztési algoritmusok összehangolása volt többféle logika szerint, majd az új megoldások kiértékelése különböző metrikák szerint úgy, mint a hálózat ellenállóképességének növekedése, a futási idő, illetve a fejlesztések költséghatékonysága.

2023/2024. 2. félév

1. A laboratóriumi munka környezetének ismertetése, a munka előzményei és kiindulási állapota

1.1 Bevezető

Az elmúlt évtizedekben egyre fontosabbá váltak a kommunikációs hálózatok az emberiség mindennapjaiban és a számunkra kritikus infrastruktúrák egymástól egyre jobban függnék.

Ezért egyre nagyobb hangsúlyt kell fektetni arra, hogy még a legszélsőségesebb helyzetekben is elérhetőek legyenek ezen hálózatok. A kommunikációs hálózatok sérülése súlyos problémát tud jelenteni az egészségügyi ellátásra, a gazdaságra és a nemzetbiztonságra is. Természeti katasztrófa esetén, ha egy kórház elveszti az áramellátását vagy a lehetőséget, hogy kommunikáljon a páciensekkel vagy a katasztrófavédelmi szervekkel, akkor számos ember élete veszélybe kerülhet.

A cél az, hogy növeljük a hálózatok ellenállóképességét katasztrófákkal szemben, mégpedig úgy, hogy a hálózatok elemeinek ellenállóképességét fejlesztjük. Felmerülhet a kérdés, hogy mi alapján mérjük, hogy egy hálózati elem mennyire ellenálló, amit a későbbi fejezetekben részletesen ki is fejték.

A választásom azért esett a témára, mivel rendszeresen szoktam olvasni a világban történő természeti katasztrófákról és látva, hogy egyre jobban függ az emberiség a kommunikációs hálózatoktól szerettem volna hozzájárulni a hálózatok ellenállásának hatékonyabb fejlesztéséhez.

A feladat során egy korábbi projektből indultam ki, az *interdependent networks*¹ nevű GitHub projektből (továbbiakban repository), illetve a kapcsolódó cikkből², amit Mogyorósi Ferenc, a konzulensem segített megérteni. A repository -ban fel volt építve az infrastruktúra, aminek segítségével tudtam szimulálni a hálózat fejlesztését és a természeti katasztrófákat.

1.2 Elméleti összefoglaló

<u>Jelölés</u>	<u>Jelentés</u>
$G(V, E)$	Egy hálózat gráfként értelmezve, amely áll csomópontokból és élekből
t	A hálózat toleranciája
$t(e)$	Az e hálózati elem toleranciája
$c_e(t)$	Az e hálózati elem költségfüggvénye
D	A katasztrófák halmaza
p_d	A d katasztrófa valószínűsége
$I_d(e)$	A d katasztrófa intenzitása az e hálózati elemnél
$CC_{\max}(G, d)$	A legnagyobb egybefüggő hálózat nagysága a G hálózatban, amely a d katasztrófa után megmarad
T_p	Küszöb-érték p valószínűség esetén

1. táblázat. A beszámolóban használt jelölések [2]

A munkám során használt hálózati és katasztrófa modell már előre definiálva volt a Disaster-Resilient Upgrade of Interdependent Networks [2] című cikkben, ami megkönnyítette a félévi

¹ *interdependent_networks* GitHub repository [1]

² Disaster-Resilient Upgrade of Interdependent Networks [2]

munkámat. A cikkben meghatározott modellek szolgálták alapul a Mogyorósi Ferenc által velem megosztott GitHub repository -ban, amivel a szimulációkat és a kiértékeléseket tudtam futtatni.

Egy hálózatot irányítatlan gráfként reprezentálunk, aminek a képlete $G(V, E)$, amelyben V a csomópontok halmaza és E az irányítatlan élek halmaza. A csomópontokat és éleket együttvéve hálózati elemeknek nevezzük, amiknek halmazát e -vel jelöljük.

Mindegyik hálózati elem rendelkezik egy tolerancia szinttel $t(e)$, amivel az egyes hálózati elemek ellenállóképességét jelöljük katasztrófákkal szemben. Egy hálózati elemnek minél nagyobb a toleranciaszintje, annál ellenállóbb egy bizonyos fajta katasztrófával szemben, azaz annál kisebb az esélye, hogy egy katasztrófa esetén meghibásodik. A munkám során egyedül földrengéseket vizsgáltam, azaz egy hálózati elem tolerancia szintje a későbbiekben mindig a földrengésekkel szembeni toleranciáját jelenti.

Továbbá minden hálózati elem rendelkezik egy nemnegatív költségfüggvénnyel $c_e(t)$, amely megadja, hogy mennyibe fog kerülni az e hálózati elem fejlesztése a t toleranciaszintre. Egy hálózat toleranciaszintje t , a hálózat kezdeti toleranciaszintje t_0 és egy hálózati elem kezdeti toleranciaszintje $t_0(e)$. A szimuláció során minden hálózati elem 6-os toleranciaszinttel kezd és legfeljebb 9-es toleranciaszintre lehet őket fejleszteni. Egy hálózati elem tolerancia szintjének fejlesztéséhez $t_0(e)$ -ről $t(e)$ -re $c_e(t)$ költséget kell fizetni, amit hálózati fejlesztésnek nevezünk.

A teljes hálózat fejlesztésének költsége egy t toleranciaszintre az összes hálózatban lévő hálózati elem fejlesztésének költségének az összege:

$$C(t) = \sum_{e \in G} c_e(t(e)).$$

1. ábra. Egy hálózat fejlesztésének költsége egy t toleranciaszintre [2]

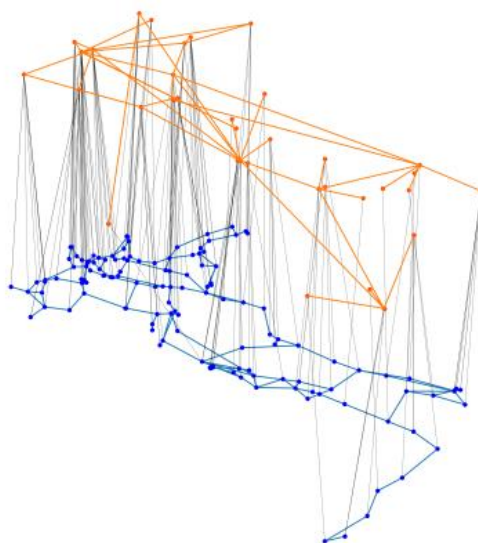
A természeti katasztrófákat, a mi esetünkben a földrengéseket egy D jelölésű listaként ábrázoljuk. Minden egyes d katasztrófa a D katasztrófa listában rendelkezik egy 0 és 1 közti értékkel, amit p_d -vel van jelölve. p_d annak a valószínűsége, hogy a d katasztrófa lesz a következő katasztrófa, ami bekövetkezik. A D listában lévő katasztrófák valószínűségének összege 1.

Egy d katasztrófa bekövetkezése esetén a d katasztrófa intenzitása az e hálózati elemnél $I_d(e)$, amelyet az I intenzitásfüggvény ad meg és amennyiben $I_d(e) > t(e)$, azaz a d katasztrófa intenzitása az e hálózati elemnél nagyobb, mint az e hálózati elem toleranciája, akkor az e hálózati elem meghibásodik. Egy katasztrófa intenzitása egy hálózati elemnél általában a hálózati elem és a katasztrófa epicentrumának távolságától függ.

A modellezés során a [3] -ban ismertetett modellből indulunk ki, azzal a változtatással, hogy a függőségek a hálózatok között nem véletlenszerűek, hanem a hálózati csomópontok közti fizikai távolságtól függ. Tehát minden csomópont a hozzá legközelebbi csomóponttól függ. Ez a módosított modell valósághűbben tudja ábrázolni az összefüggéseket két hálózat között.

A két hálózat közötti összefüggéseket irányított élekkel ábrázoltuk úgy, hogy egy csomópont az egyik hálózatban mindig pontosan egy csomóponttól függ a másik hálózatban. (lásd 2. ábra.)

Az összefüggésekből eredően, ha az egyik hálózatban meghibásodik egy csomópont az okozhatja a másik hálózatban egyes csomópontok meghibásodását, amennyiben azok függtek a csomóponttól. Meghibásodás esetén a csomópontok eltávolításra kerülnek a hálózatból minden olyan éllel együtt, amelynek immár nincsen mindkét végén egy csomópont.



2. ábra. Az összefüggő hálózatok szemléltetése, ahol az energiahálózat kékkel és a kommunikációs hálózat narancssárgával van jelölve. A fekete élek a két hálózat közötti összeköttetéseket jelölik [2].

A hibamodellezést bővítjük a következő módon. Egy katasztrófa bekövetkezése esetén a meghibásodások több fázisban következnek be. A kezdeti fázisban azon hálózati elemek hibásodnak meg, amelyek közvetlenül érintettek a katasztrófában, azaz amelyeknek a toleranciaszintje kisebb, mint a katasztrófa intenzitása az adott helyen. A második fázisba azok a meghibásodások tartoznak, amelyek a hálózatok összefüggése miatt következnek be és végül a harmadik fázisba tartoznak a lépcsőzetes hibák. A harmadik fázis végére a hálózatok stabil állapotba jutnak. A stabil állapotban az összefüggő hálózatok összefüggő klaszterekből állnak, ahol az egyes klaszterek között nincs él.

Buldyrev et al. [4] kimutatták, hogy összefüggő hálózatok esetén csak egy hatalmas összefüggő klaszterrel érdemes foglalkozni mivel, ha ez létezik, akkor az összefüggő hálózatok még működésre képesek. Abban az esetben, ha a hálózatok szétesnek kisebb klaszterekre, akkor ezek a klaszterek nem képesek önállóan működni. [4] azt javasolja, hogy az erőfeszítéseket a legnagyobb, összefüggő klaszter integritásának megőrzésére kell összpontosítani, mivel ez a kulcsa az összefüggő hálózatok további működésének. A legnagyobb egybefüggő klaszter nagyságát a G hálózatban, amely a d katasztrófa után megmarad a következőképpen jelöljük: $CC_{\max}(G, d)$.

A legnagyobb egybefüggő klasztert úgy lehetséges növelni, ha növeljük a hálózati elemek toleranciáját, aminek hatására csökkenteni tudnák egyes katasztrófák hatását. Egy hálózati elem fejlesztése csökkenti az esélyét, hogy katasztrófa esetén meghibásodik az adott hálózati elem és csökkenti az esélyét más hálózati elemek összefüggőségéből eredő meghibásodásának, illetve a lépcsőzetes hibáknak.

Az egyes hálózati elemek fejlesztésének a költségfüggvénye függ a hálózati elem típusától, a fejlesztés méretétől és a közvetlenül vagy közvetetten kapcsolódó élek hosszától. Az élek költségfüggvényét a következőképpen definiáljuk: $c_e(t) = l(e) * (t(e) - t_0(e))$, ahol $l(e)$ az e él hossza kilométerben. A csomópontok költségfüggvénye a következő: $c_e(t) = l_{\max}(e) * (t(e) - t_0(e))$, ahol $l_{\max}(e)$ az e csomópont leghosszabb élének hossza kilométerben.

A hálózati elemek fejlesztésére többféle heurisztika áll rendelkezésünkre. A heurisztikák hasonló iteratív módon működnek, mindegyik heurisztika egy saját logika alapján kiválasztja, hogy az adott iterációban melyik hálózati elemet fejleszti. A célja minden heurisztikának, hogy találjon egy hatékony fejlesztési stratégiát, figyelembe véve a fejlesztések költségét és a hálózatok egymástól függő jellegét.

A heurisztikák általános lépései:

1. Ellenőrzi, hogy a küszöb-értékek el lettek-e érve. Amennyiben igen, akkor befejezi a fejlesztést.
2. Minden hálózati elemnek kiszámolja a heurisztika sajátos értékfüggvénye alapján az értékét.
3. A hálózati elemeket sorba rendezi az értékük alapján és a legmagasabb értékkel rendelkező elem kerül fejlesztésre. Abban az esetben, ha több, mint egy elem rendelkezik a legmagasabb értékkel a legkisebb költségű elem kerül fejlesztésre.
4. A kiválasztott hálózati elem toleranciáját növeli eggyel.
5. Az 1-4 lépések ismétlése, amíg el nem éri a küszöb-értékeket vagy a fejlesztésekre szánt költséget ki nem meríti.

A későbbiekben vizsgált heurisztikák:

- Number of Mitigated Disasters – NMD :
 - A hálózati elemeket az alapján rendezi sorba, hogy ha az elem toleranciáját eggyel növeljük, akkor hány darab katasztrófával többet tudna kivédeni. Egy e hálózati elem fejlesztése akkor tud kivédeni egy katasztrófát, ha: $t(e) \leq I_d(e) \leq t(e) + 1$
- Probability of Mitigated Disasters – PMD :
 - A PMD nagyban hasonlít az NMD -hez azzal a jelentős különbséggel, hogy a kivédett katasztrófák valószínűségének összegét rendeli a fejlesztéshez.
- Number of failed node – NFN :
 - Ezen heurisztika azt az e hálózati elemet fogja fejleszteni, amelyet a legtöbb meghibásodott csomóponttal lehet kapcsolatba hozni.
 - Az e hálózati elemhez kapcsolódó meghibásodó csomópontok számát a következőképpen lehet megkapni:
 - Először azonosítjuk azon katasztrófák halmazát, amelyek bekövetkezése esetén e meghibásodik
 - Ezután kiszámolja az e elemhez rendelt értéket úgy, hogy a halmazban levő katasztrófák valószínűségét megszorozza a katasztrófa bekövetkezése esetén meghibásodó csomópontok számával.

A modellezés során az egyszerűség kedvéért két hálózatot határoztunk meg, A -t és B -t, ahol A az energiahálózat és B a kommunikációs hálózat. A szimuláció során Olaszország HVIET energiahálózatát és GARR kommunikációs hálózatát használtuk, amiket az [5] -ből szereztünk. A természeti katasztrófákat, azaz a mi esetünkben a földrengéseket az [6] földrengés katalógusból szereztük és a földrengések intenzitásának becsléséhez használt képleteket a [7] -ből.

1.3 A munka állapota, készültségi foka a félév elején

A félévi munkámban segítségemre volt a kész szimulációs környezet [1], amelyet Mogyorósi Ferenc osztott meg velem, illetve számos tudományos cikk a témában³, amelyek segítettek kontextusba helyezni a saját feladatomat. Továbbá meg szeretném említeni, hogy a munkámban sokat segített Mogyorósi Ferenc, a konzulensem, aki mindig segítőkész volt és segített elmagyarázni azt, amit éppen nem értettem.

³ [2], [3], [4], [8], [9], [10]

2. Az elvégzett munka és eredmények ismertetése

2.1 Felkészülés

A félévi munkámat azzal kezdtem, hogy elolvastam olyan cikkeket a hálózatok védelme katasztrófák esetén témában, amelyek felkeltették az érdeklődésemet.

A. Kwasinski [8] cikkéből megismertem, hogy mik a legsebezhetőbb részei egy kommunikációs hálózatnak, továbbá, hogy nem elég a csomópontokat külön-külön vizsgálni, hanem az egész hálózatot egyben kell kezelni a hálózatok összefüggősége miatt.

Gomes et al. [9] cikkében olvastam arról, hogy lehet a kommunikációs hálózatok sebezhetőségét és a legsebezhetőbb területeket felmérni. Továbbá megismertem több módszert is, amivel a hálózat katasztrófákkal szembeni ellenállóságát lehet növelni katasztrófák bekövetkezése előtt és után is. Ezeken kívül még katasztrófákkal szemben ellenálló útvonalválasztási algoritmusokról is olvastam.

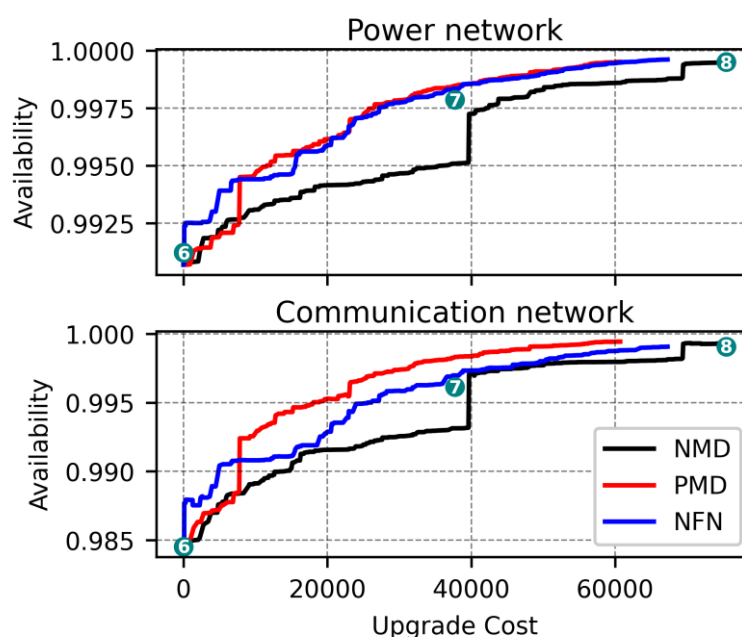
Mauthe et al. [10] cikkéből megtudtam, hogy annak ellenére, hogy az elmúlt években számos új technika és megoldás született - amelyek a hálózatok ellenállásával foglalkoznak - viszonylag keveset ültettek át a gyakorlatba. Ebben a cikkben megismertem egy lehetséges osztályozását a hálózatokat érő fenyegetéseknek és módszereknek, amelyekkel a hálózatok fenyegetésekkel szembeni ellenállóságát lehet felmérni. A cikk végén megismertem pár jól bevált gyakorlatot is.

A fent említett cikkek tanulmányozása után elolvastam Pašić Alija, Revisnyei Péter és Mogyorósi Ferenc Disaster-Resilient Upgrade of Interdependent Networks [2] című cikkét, amelyben megismerhettem a munkám során használt összefüggő hálózati modellt és a természeti katasztrófák modelljét. Megismertem többfajta megközelítést arra a problémára, hogy hogyan fejlesszük hatékonyan és olcsón az összefüggő hálózatokat és ezeknek a hálózatfejlesztési algoritmusoknak megismertem az előnyeit és hátrányait.

Ezután Mogyorósi Ferenc rendelkezésemre bocsájtotta az `interdependent_networks` nevű GitHub repository -t, aminek tanulmányozásával megismerhettem a környezetet, amelyben később a hálózatok fejlesztését szimulálhattam és értékelhettem ki. A GitHub egy online szoftverfejlesztői platform, amely olyan további szolgáltatásokat is nyújt, mint például az elosztott verziókezelés, hozzáférések kezelése, hibák nyilvántartása és számos más funkció, amelyek megkönnyítik a fejlesztők együttműködését. A repository -ban lévő kódot értelmeztem, ami viszonylagos nehézséget okozott a terjedelme miatt. Ki szeretnék emelni két fontosabb jupyter notebook -ot a repositoryban, az 1.4 -eset és a 0.2 -eset. A jupyter notebook egy olyan fájl, amely egyszerre tartalmazhat python kódot, szöveget markdown formátumban, ábrákat, képeket és videókat is. Az 1.4 -es notebook futtatásával tudtam elindítani az egyes szimulációkat és a 0.2 -es futtatásával tudtam kiértékelni a szimulációk eredményét.

2.2 Hálózatfejlesztési algoritmusok összevonása

A szimulációs környezet megismerése után futtattam három szimulációt, amelyekben szimuláltam, hogy a fentebb említett összefüggő hálózatot (Olaszország HVIET energiahálózatát és GARR kommunikációs hálózatát) 2000 iterációban fejlesztjük egy-egy heurisztika szerint (NMD, PMD, NFN). Miután az 1.4 -es notebook előállította a szimulációk eredményét futtattam a 0.2 -es notebook -ot, amelyben kiértékeltem a szimulációk eredményét, amelyben saját magam is láthattam az egyes heurisztikák előnyeit és hátrányait. Mivel a [2] részletesen tárgyalja ezeket, ezért itt csak röviden ismertetném ezeket. A fejlesztések elején az NFN gyorsan fel tudja ismerni a leghasznosabb fejlesztéseket, viszont a fejlesztési lépések előrehaladtával a PMD lesz a leghatékonyabb. Ráadásul a PMD a legköltséghatékonyabb is közülük. (lásd 2. ábra) Futási idő szempontjából az NFN a leglassabb a komplexebb értékválasztás miatt.



2. ábra. A három hálózatfejlesztési heurisztika összehasonlítása availability alapján egy 2000 iterációból álló fejlesztési folyamat során. A kék pontok a hálózat 6-os, 7-es és 8-as toleranciaszintre fejlesztés availability értékét és költségét jelentik.

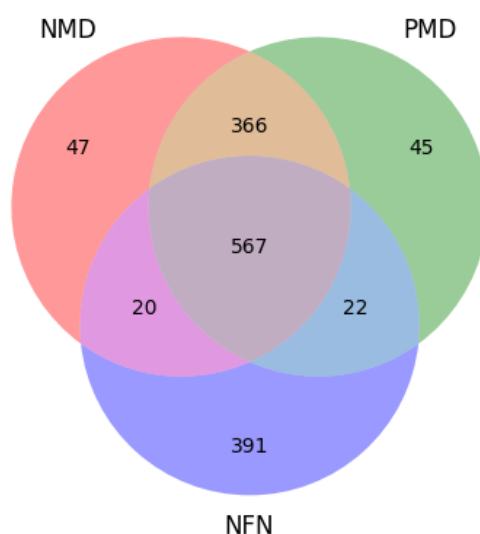
A szimulációk futtatása és kiértékelése után létrehoztam egy jupyter notebook -ot „3.0-greatest-availability-growth” néven, amelyben a saját munkámat végeztem. A notebook -ban először beolvastam az összefüggő hálózat adatait és a három heurisztika alapján szimulált fejlesztések eredményeit.

Az availability egy 0 és 1 közötti érték, ami azt jelzi, hogy egy katasztrófa után a hálózatnak mekkora része marad működőképes. A fejlesztések során ennek az értéknek a növelése a célunk. Az adatok beolvasása után mindegyik fejlesztéshez kiszámoltam, hogy az adott fejlesztés után mennyivel nő az availability.

Az availability értékek kiszámolása után nekiálltam összevonni a hálózatfejlesztési algoritmusokat. A feladatomat azzal kezdtem, hogy megvizsgáltam, hogy a három heurisztika 1000 legjobb - azaz legnagyobb availability növekedéssel járó – fejlesztése közül hány egyezik meg (lásd. 3. ábra). Az egyezések vizsgálata közben azt vettem észre, hogy a fejlesztések nagy része megegyezik, több mint 500 fejlesztés van, amely mindhárom heurisztikának szerepel az 1000 legjobb fejlesztése között. Továbbá az NMD és a PMD heurisztikák nagyrészt ugyanazokat a fejlesztéseket választják, több mint 900 fejlesztésük megegyezik az 1000 -ból. Az NFN heurisztika fejlesztéseinek közel 40% -a olyan, amely nem szerepel a másik kettő heurisztika 1000 legjobb fejlesztése között.

A három heurisztika 1000 legjobb fejlesztését ezután összevontam egy listába és kiegészítettem azokkal a fejlesztésekkel, amelyek a listában lévő fejlesztések előzményei és nem szerepelnek még a listában. Ezen kívül egyesítettem ugyanannak a hálózati elemnek a fejlesztéseit. Például, ha az egyesített listában szerepel egy fejlesztés, amely egy e hálózati elemet fejleszt 7-es toleranciáról 8-as toleranciára és nem szerepel az e hálózati elemnek a 6-os toleranciáról 7-esre való fejlesztése a listában, akkor módosítottam az eredeti fejlesztést úgy, hogy az már 6-os toleranciáról fejleszti az e hálózati elemet 8-asra.

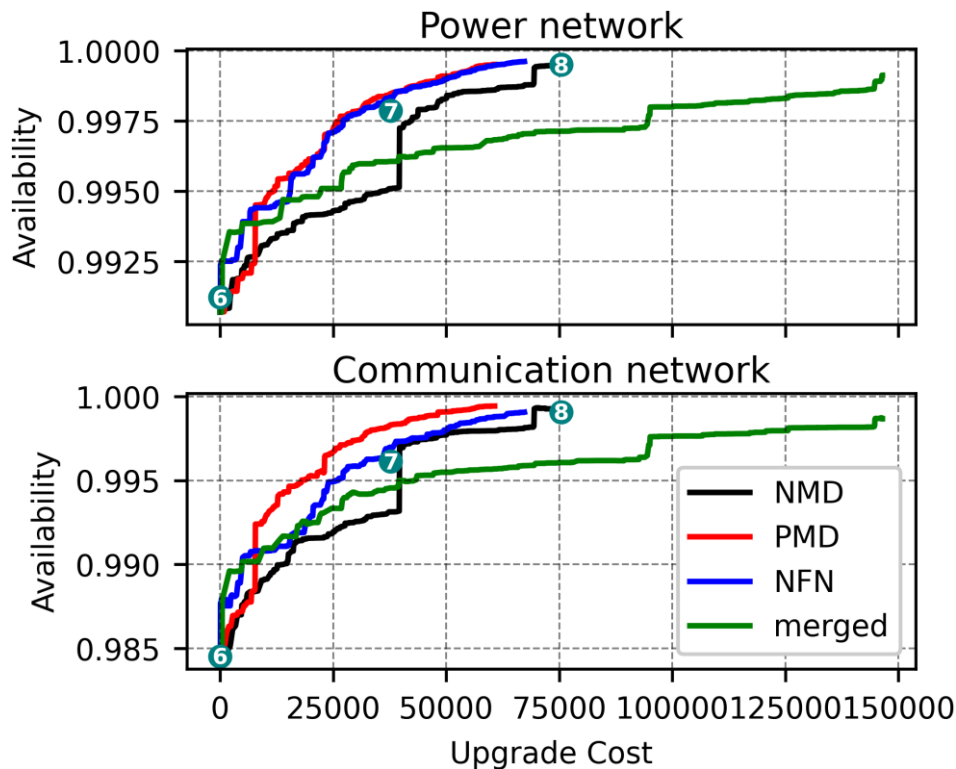
A kész listát ezután rendeztem és elmentettem. Kétféle rendezési módszert vizsgáltam.



3. ábra. Azon fejlesztések száma, amelyek a három algoritmus 100 legnagyobb availability növekedést eredményező fejlesztései közül megegyeznek.

- Az elsőben csak availability növekedés alapján rendeztem a fejlesztéseket
- A másodikban először az alapján rendeztem a fejlesztéseket, hogy hány heurisztika tartalmazta, majd azon belül availability növekedés alapján.

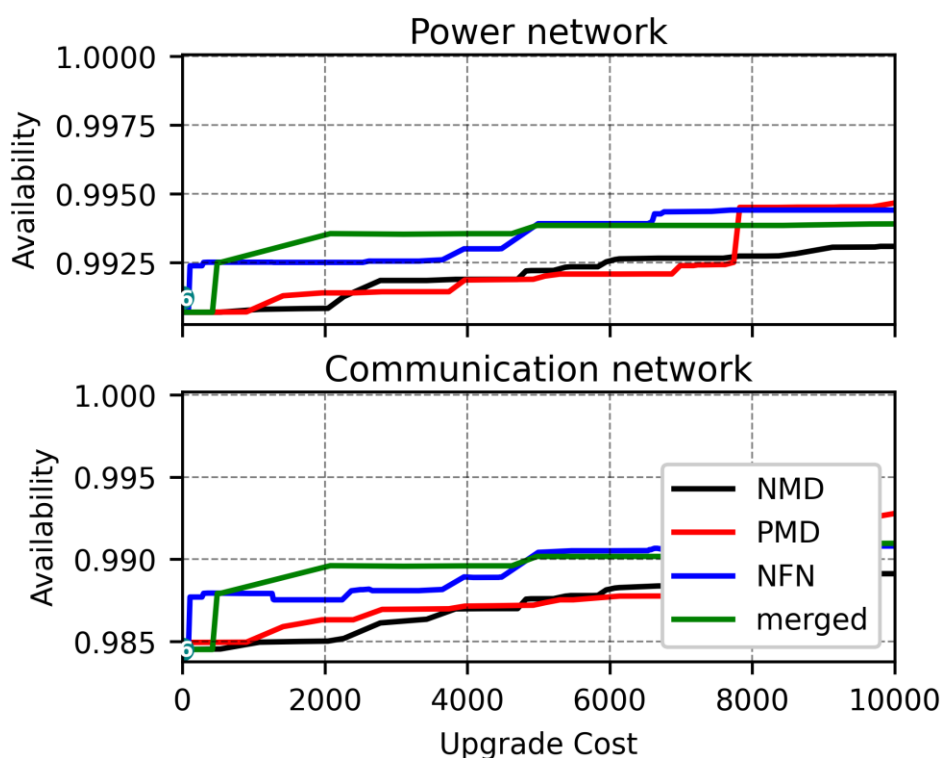
2.3 Új hálózatfejlesztési algoritmusok kiértékelése



4. ábra. Az egyesített és a három eredeti hálózatfejlesztési heurisztika összehasonlítása, amelyben az egyesített listát egyedül availability növekedés alapján rendeztem

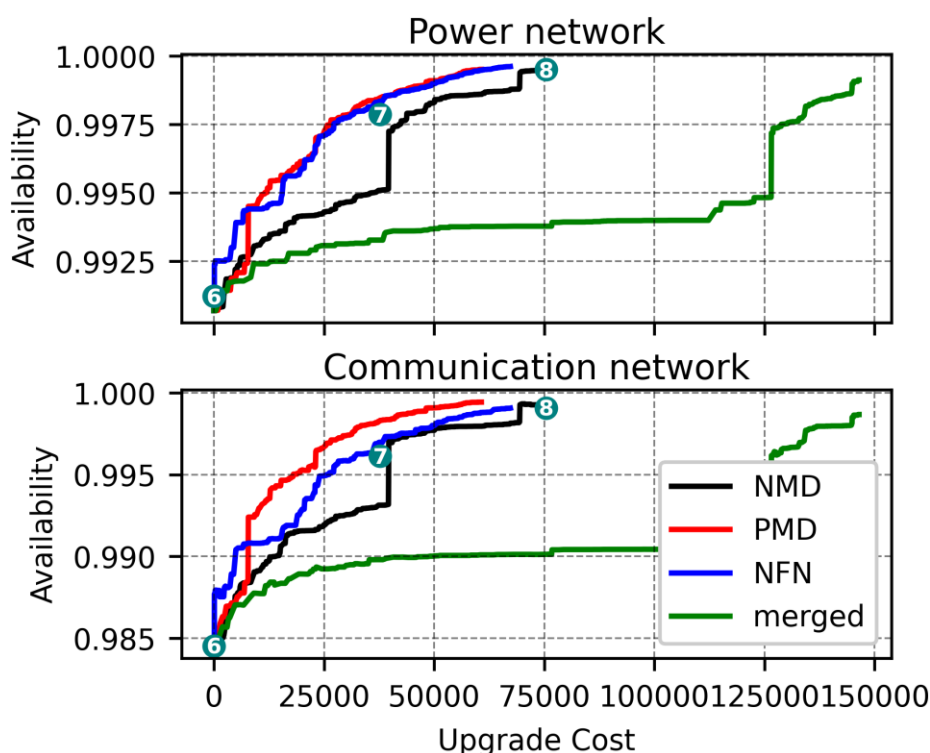
A rendezések után indítottam két szimulációt, amelyekben az összefüggő hálózatunkon azokat a fejlesztéseket hajtjuk végre, amelyek a kapott listában szerepelnek, egyet-egyét a kétfajta rendezési mód szerint. A szimulációk lefutása után kiértékeltem az új hálózatfejlesztési algoritmusokat.

Abban az esetben, amikor csak availability növekedés alapján rendeztem a fejlesztéseket (lásd. 4. ábra) az egyesített heurisztika a fejlesztési folyamat elején a többi algoritmusnál gyorsabban és olcsóbban képes ugyanarra az availability szintre fejleszteni a hálózatokat (lásd. 5. ábra). A fejlesztési folyamat előrehaladtával viszont lelassul az availability növekedésének üteme és egyre költségesebb fejlesztéseket valósít meg a heurisztika. Fontosnak tartom még megemlíteni, hogy futási idő szempontjából az egyesített heurisztika a leglassabb tekintve, hogy a futtatásához szükséges a három másik heurisztika futásának eredménye, amelyek nem minden esetben állnak rendelkezésre. A kiértékelés eredményéből azt a következtetést tudtam levonni, hogy nem hatékony availability növekedés alapján rendezni, mivel bármilyen drága is legyen egy fejlesztés azt fogja választani bármilyen más fejlesztésnél előbb az algoritmus.



5. ábra. A fejlesztési folyamat eleje, abban az esetben, amikor az egyesített listát egyedül availability növekedés alapján rendeztem

A második rendezési szempont (lásd. 6. ábra) vizsgálata során gyorsan le tudtam vonni azt a következtetést, hogy ez nem egy hatékony rendezési szempont. Továbbá annak a száma, hogy az adott fejlesztés hány heurisztika 1000 legjobb fejlesztésében szerepel nem függ össze a fejlesztésnek a hasznosságával. Hasznosság alatt azt értem, hogy a többi fejlesztéshez képest nagyobb költséggel kisebb availability növekedést ér el.



6.ábra. Az egyesített és a három eredeti hálózatfejlesztési heurisztika összehasonlítása, amelyben az egyesített listát először az alapján rendeztem a fejlesztéseket, hogy hány heurisztika tartalmazta, majd azon belül availability növekedés alapján.

2.4 Összefoglalás

A félév során összefüggő hálózatok – jelen esetben egy kommunikációs- és egy energiahálózat – természeti katasztrófákkal szembeni ellenállóképességét és a hálózatok elemeinek fejlesztésére használt algoritmusokat vizsgáltam. A célom az volt, hogy kiderítsem érdemes lenne összevonni három már létező algoritmust és egy új algoritmust készíteni belőle. Az algoritmusok összevonásával azt reméltem, hogy létrehozok egy algoritmust, amely olcsóbban és gyorsabban tudja a hálózatok ellenállóképességét fejleszteni, mint a már létező algoritmusok.

A feladat végrehajtásában segítségemre voltak a már megfogalmazott hálózat- és katasztrófamodellek, illetve a hálózatoknak és katasztrófáknak – jelen esetben földrengéseknek – adatai és egy kész szimulációs környezet.

Először indítottam három szimulációt, amelyben az eredeti három algoritmus alapján 2000 lépésen keresztül fejlesztettem a hálózatot, lépésenként egy hálózati elemet fejlesztve. Ezután a három algoritmus 1000 - 1000 legjobb fejlesztését összevontam és a létrejött egyesített lista fejlesztéseit két szempont alapján rendeztem, majd a két kész algoritmust kiértékeltem.

A kiértékelés után konklúzióként azt vontam le, hogy a hálózatfejlesztési algoritmusok 1000 – 1000 legjobb fejlesztésének összevonása nem bizonyult hatékonyabbnak a három már létező algoritmusnál. Egyedül a fejlesztési folyamat elején volt eredményesebb az egyik szempont szerint rendezett egyesített algoritmus, viszont idővel a három másik algoritmus ezt is túlszárnyalta.

3. Irodalom, és csatlakozó dokumentumok jegyzéke

A tanulmányozott irodalom jegyzéke:

- [2] A. Pašić, P. Revisnyei and F. Mogyorósi, "Disaster-Resilient Upgrade of Interdependent Networks", 2023 13th International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling (RNDM), pp. 1-8, doi: 10.1109/RNDM59149.2023.10293104., 2023.
- [3] J. Shao, S. V. Buldyrev, S. Havlin, and H. E. Stanley, "Cascade of failures in coupled network systems with multiple support-dependence relations," *Physical Review E*, vol. 83, no. 3, p. 036116, Mar. 2011.
- [4] S. V. Buldyrev, R. Parshani, G. Paul, H. E. Stanley, and S. Havlin, "Catastrophic cascade of failures in interdependent networks," *Nature*, vol. 464, no. 7291, pp. 1025–1028, Apr. 2010, number: 7291 Publisher: Nature Publishing Group
- [5] V. Rosato, L. Issacharoff, F. Tiriticco, S. Meloni, S. Porcellinis, and R. Setola, "Modelling interdependent infrastructures using interacting dynamical models," *International Journal of Critical Infrastructures*, vol. 4, no. 1-2, pp. 63–79, 2008.
- [6] A. Rovida, M. Locati, R. Camassi, B. Lolli, and P. Gasperini, "CPTI15, the 2015 version of the Parametric Catalogue of Italian Earthquakes," Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, 2016. [Online]. Available: <https://doi.org/10.6092/INGV.IT-CPTI15>
- [7] B. Vass, J. Tapolcai, Z. Heszberger, J. Bíró, D. Hay, F. A. Kuipers, J. Oostenbrink, A. Valentini, and L. Rónyai, "Probabilistic shared risk link groups modeling correlated resource failures caused by disasters," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 39, no. 9, pp. 2672–2687, 2021.
- [8] A. Kwasinski, "Analysis of vulnerabilities of telecommunication systems to natural disasters," *2010 IEEE International Systems Conference*, pp. 359-364, doi: 10.1109/SYSTEMS.2010.5482356., 2010.
- [9] T. Gomes *et al.*, "A survey of strategies for communication networks to protect against large-scale natural disasters," *2016 8th International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling (RNDM)*, pp. 11-22, doi: 10.1109/RNDM.2016.7608263., 2016.
- [10] A. Mauthe *et al.*, "Disaster-resilient communication networks: Principles and best practices," *2016 8th International Workshop on Resilient Networks Design and Modeling (RNDM)*, pp. 1-10, doi: 10.1109/RNDM.2016.7608262., 2016.

Csatlakozó egyéb elkészült dokumentációk / fájlok / stb. jegyzéke:

- [1] Az interdependent_networks nevű GitHub repository, amely tartalmazza a saját munkámhoz készített jupyter notebookot is a notebooks mappán belül „3.0-greatest-availability-growth.ipynb” néven:
https://github.com/mogyi006/interdependent_networks,
Lestyán Ádám Barnabás, 2024. május 12.