

A KRITIKUS ENERGETIKAI INFRASTRUKTÚRA (VILLAMOS ENERGIA, FÖLDGÁZ, TÁVHŐ) SÉRÜLÉKENYSÉGI VIZSGÁLATÁNAK MÓDSZERTANI MEGALAPOZÁSA

*Készült a „Kritikus energetikai infrastruktúra elemek
(villamos energia, gáz, távhő rendszerek) éghajlati
és földtani sérülékenységének értékelése”*

c. projekt keretében

2023.

Készítette:

Energiastratégia Intézet Nonprofit Kft.

Közreműködők: dr. Ballabás Gábor (szerk.), Fejes Lilian, Varga Erika, Bálinger András, dr. Czakó Kálmán, dr. Czira Tamás, Deczki Zoltán, Hajdú-Toldi Anita, Halupka Gábor, dr. Jáger Viktor, dr. Maigut Vera, dr. Marsi István, Mandler Friderika, dr. Nádor Annamária, dr. Németh Kornél, Rideg Adrienn, Selmeczi János Pál, Szabó Péter

Közreműködő szakmai partnerek:

FGSZ Földgázszállító Zrt. (FGSZ Zrt.)

Magyar Energetikai és Közműszabályozási Hivatal (MEKH)

Magyar Távhőszolgáltatók Szakmai Szövetsége (MaTáSzSz)

Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zrt. (MAVIR Zrt.)

Magyar Villamos Művek Zrt. (MVM Zrt.)

Tartalom

1	Bevezetés	4
1.1	A feladat indokoltsága	4
1.2	A tanulmány célja, elérendő eredmények	4
2.	Háttér, szakirodalmi áttekintés	6
2.1.	Jogszabályi környezet, valamint szakpolitikai irányok és célok	6
2.2.	Az éghajlati sérülékenység-vizsgálat elméleti keretei	10
2.3	Klímamodellek és jelentőségük az éghajlati sérülékenység-vizsgálatokban	11
2.4.	A földtani veszélyforrások, fő csoportjaik és rövid jellemzésük	14
2.5.	A "NATÉR továbbfejlesztése" projektben elért eredmények az energetikai infrastruktúra éghajlati sérülékenységével összefüggésben	18
2.6.	A "NATÉR továbbfejlesztése" projektben elért eredmények a földtani veszélyforrásokkal és hatásokkal összefüggésben	21
2.7.	Nemzetközi szakirodalmi kitekintés	23
2.7.1.	Az energetikai infrastruktúra éghajlati sérülékenysége	23
2.7.2.	Az energetikai infrastruktúra földtani sérülékenysége	27
3.	A villamos energia, távhő és földgáz rendszerlemek földtani kitétsége	30
3.1.	A vizsgálatba bevonandó kitétségi indikátorok köre	30
3.2	Az egyes földtani kitétségi indikátorok számítási metodikája	31
3.3.	Várható eredmények, javaslatok	34
4.	A villamosenergia-szektor infrastrukturális sérülékenysége	36
4.1	Hazai körkép a villamosenergia-szektor fő infrastrukturális rendszereiről és szereplőiről	36
4.2.	A sérülékenység-vizsgálat értelmezési keretei a villamosenergia-infrastruktúra vonatkozásában	40
4.3.	A sérülékenység-vizsgálat javasolt módszere	42
4.3.1.	A fő hatáslánc bemutatása és értelmezése a villamosenergia-infrastruktúra vonatkozásában és a vonatkozó adatok elérhetősége és alkalmazhatósága	42
4.3.2.	A vizsgálatba bevonandó éghajlati indikátorok köre és a számítási metodika	43
4.3.3.	A vizsgálatba bevonandó érzékenységi indikátorok köre és a számítási metodika	44
4.3.4.	A várható hatások értékelése (az „egyedi” hatásmutatók számítása), további vizsgálati irány	49
5.	A földgáz szektor infrastrukturális sérülékenysége	51
5.1	Hazai körkép a földgáz szektor fő infrastrukturális rendszereiről és szereplőiről	51
5.1.1.	Általános helyzetkép	51
5.1.2.	A szállítórendszer	52

5.1.3. Az elosztórendszer	54
5.1.4. A földgáztárolók	54
5.2 A sérülékenység-vizsgálat értelmezési keretei a földgáz infrastruktúra vonatkozásában	55
5.3. A sérülékenység-vizsgálat javasolt módszere	57
5.3.1. A fő hatáslánc bemutatása és értelmezése a földgáz infrastruktúra vonatkozásában és a vonatkozó adatok elérhetősége és alkalmazhatósága	57
5.3.2. A vizsgálatba bevonandó éghajlati indikátorok köre és a számítási metodika	59
5.3.3. A vizsgálatba bevonandó érzékenységi indikátorok köre és a számítási metodika	60
5.3.4. A vizsgálatba bevonandó alkalmazkodóképességi mutatók és képzésük módszertana	62
5.3.5. A várható hatások és sérülékenység értékelése (az „egyedi” hatás- és sérülékenységi mutatók számítása), további vizsgálati irány	63
6. A távhő szektor infrastrukturális sérülékenysége	65
6.1. Hazai körkép a távhő szektor fő infrastrukturális rendszereiről és szereplőiről	65
6.1.1. A távhő infrastruktúra rendszerei sérülékenysége szempontjából fontos alapfogalmak	65
6.1.2. A távhőellátás alapinformációi hazánkban	66
6.2. A sérülékenységvizsgálat értelmezési keretei a távhő infrastruktúra vonatkozásában	68
6.3. A sérülékenység-vizsgálat javasolt módszere	70
6.3.1. A fő hatáslánc bemutatása és értelmezése a távhő infrastruktúra vonatkozásában és a vonatkozó adatok elérhetősége és alkalmazhatósága	70
6.3.2. A vizsgálatba bevonandó éghajlati indikátorok köre és a számítási metodika	71
6.3.3. A vizsgálatba bevonandó érzékenységi mutatók és képzésük módszertana	72
6.3.4. A vizsgálatba bevonandó alkalmazkodóképességi mutatók és képzésük módszertana	75
6.3.5. A várható hatások és sérülékenység értékelése (az „egyedi” és aggregált hatás- és sérülékenységi mutatók számítása), további vizsgálati irányok	78
7. Felhasznált irodalom:	80
a. Jogszabályok és stratégiai dokumentumok:	80
b. Szakirodalom:	80

1 Bevezetés

1.1 A feladat indokoltsága

Magyarországon az energiaszuverenitás és az energia ellátásbiztonság kiemelt célkitűzések, hiszen az energiaellátás jelentős szerepet játszik társadalmi–gazdasági rendszereink folyamatos működésében, ezért az energiaszolgáltatások megbízható, folyamatos biztosítása kulcsfontosságú feladat.

A jelenkori éghajlatváltozás már napjainkban is tapasztalható hatásai több módon is károsan érinthetik az energiatermelő és energiaszállító rendszereket. A fizikai infrastruktúra elemeit (például nagyfeszültségű átviteli hálózat, áramátalakító berendezések stb.) például az erős széllesek, a tapadó csapadékok (a fagy és zúzmara), a fokozódó extrém, főleg nyári időjárási események, illetve egyes, várhatóan növekvő kockázatú földtani veszélyforrások (például omlások, csuszamlások) közvetlenül és bizonyos esetekben közvetve is veszélyeztethetik. Annak érdekében, hogy meg tudjuk ítélni, hogy a villamosenergia-, földgáz- és távhőrendszereket hogyan érintik a klímaváltozás és a várhatóan erősödő földtani veszélyek hatásai, részletesen meg kell vizsgálnunk a hazai energetikai infrastruktúra kiemelt elemeinek érzékenységét és a hatásokhoz való alkalmazkodás lehetőségeit.

1.2 A tanulmány célja, elérendő eredmények

A második munkacsomag jelen munkarészének célja a hazai létfontosságú energetikai rendszerek egyes, kiemelt elemeinek éghajlati- és földtani sérülékenység-vizsgálati megalapozása elsősorban módszertani oldalról. Fontos hangsúlyozni, hogy vizsgálatunkban a kritikus energetikai infrastruktúrák kifejezést széleskörűen, nem kizárólag a létfontosságú rendszerelemekre értelmezzük, azok vizsgálatát rendszerszemléletben végezzük. Célunk tehát azon kiemelt rendszer elemeket vizsgálni, amelyek villamosenergia-, földgáz- és távhőrendszerek éghajlati és földtani hatásokkal szembeni sérülékenységét hosszú távon meghatározzák.

A tanulmány alapvető célja annak bemutatása, hogy a nemzetközi és hazai szakirodalom, valamint saját kutatások, az energetikai szakmai partnerek gyakorlata és tapasztalatai alapján az energetikai kritikus infrastruktúra éghajlati és földtani veszélyekkel szembeni sérülékenysége miként, milyen módszerekkel és milyen adatokkal vizsgálható. A kutatás fókuszában korábbi vizsgálatok alapján elsősorban a szállítási valamint indokolt esetekben a termelő létesítmények éghajlati és földtani sérülékenysége áll. Fontos feladat megvizsgálni, hogy a különböző információk, feldolgozási és értelmezési eljárások, továbbá a jelenlegi és az idővel egyre bővülő adatbázisok és indikátorok milyen módon segíthetik a szélsőséges időjárási események (például extrém szélviharok, tapadó csapadékok, nagy hőmérséklet-ingadozások) és a földtani veszélyforrások (például üreg- és pincebeszakadások, felszínmozgásos folyamatok) területi fókuszú (országos vagy térségi, helyi szintű) bemutatását, jellemzését, értékelését.

A témakör feltárását széleskörű nemzetközi és hazai szakirodalmi feldolgozással alapozzuk meg annak érdekében, hogy látható legyen éghajlati és földtani oldalról is milyen módon közelítenek a tudomány és az egyes ágazatok szereplői a villamosenergia-, a földgáz- és távhőrendszerek vizsgálatához módszertani oldalról, illetve vannak-e hiányos területek az összetett energetikai rendszerek ilyen irányú vizsgálatakor.

Annak érdekében, hogy az energetikai infrastruktúra sérülékenységéről hiteles képet kapjunk, széleskörű adat- és információgyűjtésre van szükség az energiaszolgáltatóktól, rendszerirányítóktól, hatóságoktól, ezért szükséges a MATÁSzSz (Magyar Távhőszolgáltatók Szakmai Szövetsége), a MAVIR Zrt. (Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zártkörűen Működő Részvénytársaság), az FGSZ Zrt. (Földgázszállító Zártkörűen Működő Részvénytársaság), a MEKH (Magyar Energetikai és Közmű-szabályozási Hivatal), az MVM Zrt. (Magyar Villamos Művek Zrt.) partnerként¹, több körben

¹ További segítőnk volt a BM Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság is.

történő bevonása. Egyrészt jelen tanulmány elkészítésében másrészt a rendelkezésre álló adatok, információk, eljárások és használt mutatók megismerése céljából, továbbá azért, hogy szakmai tanácsaikkal, tapasztalatukkal segítsék a vizsgálatot. Mindemellett azért, hogy a sérülékenységvizsgálat gyakorlati hasznosíthatóságát is megalapozzák.

Eredményként módszertani és éghajlat-földtan specifikus szakmai javaslatokat kívánunk megfogalmazni ahhoz, hogy milyen hatásláncok, indikátorok kialakítása, alkalmazása, adatok integrálása lenne javasolható a Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszerbe (NATÉR²) az energetikai infrastruktúra alapállapotáról, továbbá az infrastruktúra klímabarát fejlesztése és az ellátásbiztonság növelése érdekében szükséges információkról. A feladat keretében a szakmai partnerek bevonásával meghatározásra kerülnek az éghajlati és földtani sérülékenységvizsgálat kialakításához szükséges kitettségi, érzékenységi, és alkalmazkodóképességi indikátorok lehetőség szerint.

² Elérése: <https://nater.mbfisz.gov.hu/>

2. Háttér, szakirodalmi áttekintés

2.1. Jogszabályi környezet, valamint szakpolitikai irányok és célok

A kritikus energetikai infrastruktúrák legfontosabb európai szabályozó eszköze a **Tanács 2008/114 EK irányelve** az európai kritikus infrastruktúrák azonosításáról és kijelöléséről, valamint védelmük javítása szükségességének értékeléséről. Az irányelv meghatározza az európai kritikus infrastruktúrák (European Critical Infrastructures - ECI³) azonosításával és kijelölésével kapcsolatos európai uniós folyamatot, valamint a védelmük javításához szükséges megközelítéseket, eszközöket. Az Európai Unió területén ugyanis számos olyan infrastrukturális rendszer illetve rendszerelem van, amelyek működési zavara vagy megsemmisítése akár több tagállamra kiterjedő komoly következményekkel járhat. A jogszabály kritikus energetikai infrastruktúra definíciója is szorosan kapcsolódik ehhez: „A tagállamokban található azon eszközök, rendszerek vagy ezek részei, amelyek elengedhetetlenek a létfontosságú társadalmi feladatok ellátásához, az egészségügyhöz, a biztonsághoz, az emberek gazdasági és szociális jólétéhez, valamint amelyek megzavarása vagy megsemmisítése e feladatok folyamatos ellátásának hiánya miatt jelentős következményekkel járna valamely tagállamban.” A megelőzés és a védelem legfontosabb eszközeinek egyike az ún. OSP, Operational and Security Plan, vagyis üzemeltetői biztonsági terv vagy egyenrangú intézkedések, „amelyek magukban foglalják a jelentős eszközök meghatározását, kockázatértékelést, valamint az ellenintézkedések és -eljárások meghatározását, kiválasztását és rangsorolását.” Az intézkedések kiválasztása és kidolgozása tagállami feladat. Ezen túl a tagállamok évente illetve két évente jelentéseket készítenek az Európai Bizottság számára, amelyek veszélyértékelést tartalmaznak az ECI alágazatokra vonatkozóan. Az átfogó irányelv elsősorban az energetikai, a közlekedési kritikus infrastruktúrák azonosítására és védelmére fókuszál, de további szektorok (pl. IKT, Információs és Kommunikációs Technológiák) bevonását sem zárja ki a későbbiekben⁴. Az irányelvben a kritikus energetikai infrastruktúrák oldaláról a villamosenergia-termelési és -továbbítási módszerek illetve eszközök közül az atomerőművek villamosenergia-továbbításra alkalmas részei vannak nevesítve. Emellett a szabályozó eszköz horizontális kritériumokat is alkalmaz, mint például az esetleges veszteségek, valamint a gazdasági és társadalmi hatások megjelenítését.

A kritikus infrastruktúrákkal összefüggő a **létfontosságú rendszerek és létesítmények azonosításáról, kijelöléséről és védelméről szóló 2012. évi CLXVI. számú törvényt (Lrtv.)** az Országgyűlés 2012. november 12-én fogadta el. A vonatkozó uniós irányelvvvel összhangban a szabályozás elsőként az **energetikai** és a **közlekedési ágazat** vonatkozásában lépett hatályba. Az energetikai létesítmények esetében a törvény az érintett létfontosságú rendszerelem alkotóelemének tekinti a **technológiai hírközlési és informatikai rendszereket** is. A szabályozás célja – összhangban az EU-s irányelvvvel – a nemzeti létfontosságú rendszerelemek azonosítása, kijelölése, védelme és az üzembiztos működés biztosítása. A kijelölés oldaláról a törvény három fontos eszközcsoportot és eljárásokat nevez meg: a nemzeti létfontosságú rendszerelemek kijelölését, az alapvető szolgáltatásokat nyújtó szereplők kijelölését és nyilvántartását és az európai létfontosságú rendszerelemek kijelölését. A törvény az ágazati kijelölő hatóságot⁵ nevezi meg, mint általános javaslattevő hatóságot, a közrend, a közbiztonság, a lakosságvédelem, a nemzetbiztonság, a terrorrelhárítás szempontjaira tekintettel, a nemzeti létfontosságú rendszerelemmé történő kijelölés vonatkozásában. A törvény rögzíti az Európai

³ Az irányelv pontos definíciója szerint: „európai kritikus infrastruktúra” vagy „ECI”: a tagállamokban található olyan kritikus infrastruktúra, amelynek megzavarása vagy megsemmisítése jelentős hatással lenne legalább két tagállamra. A hatás jelentőségét a horizontális kritériumok alapján kell értékelni. Ide tartoznak azok a hatások is, amelyek az egyéb típusú infrastruktúrákkal fennálló, ágazatokon átnyúló kölcsönös függőségből erednek.

⁴ Lásd: az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2016/1148 irányelvét, az „A hálózati és információs rendszerek biztonságának az egész Unióban egységesen magas szintjét biztosító intézkedésekről szóló irányelvet” (NIS Irányelv).

⁵ Ez a hatóság a tanulmány készültekor a BM Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság.

Bizottság számára készítendő éves jelentés kritériumait is. Ágazati oldalról a következő ágazatokat rögzíti a törvény, amelyekben kijelölhető nemzeti létfontosságú rendszerelem: energia, közlekedés, agrárgazdaság, egészségügy, társadalombiztosítás, pénzügy, infokommunikációs technológiák, víz, honvédelem, közbiztonság-védelem. Az energiaszektorban négy alágazatot nevez meg: a villamosenergia-rendszer létesítményeit (kivéve az atomerőmű bizonyos rendszerelemei), a kőolajipart, a földgázipart, a távhőt (1. táblázat).

A törvény általános végrehajtási rendelete (továbbiakban Vhr.) a **65/2013. (III. 8.) Korm. rendelet**. A Vhr. a következő érintett ágazatokat jelöli meg mint létfontosságú rendszerekhez kapcsolódókat: energia, közlekedés, ivóvízellátás, egészségügy, pénzügy, digitális infrastruktúra. A Vhr. a következő alapvető szolgáltatásokat⁶ jelöli ki az energiaszektorban:

ÁGAZAT	ALÁGAZAT	ALAPVETŐ SZOLGÁLTATÁS MEGNEVEZÉSE
Energia	villamos energia	villamos energia átviteli hálózat üzemeltetése
		villamos energia- átviteli rendszerirányítás
		villamosenergia-elosztás
		villamos energia termelése
		Black Start szolgáltatás (az átviteli rendszerirányító részére a rendszer újraindításához alkalmas eszközök készenlétben tartása)
	kőolaj	kőolajkésztermék- gyártás
		kőolajkésztermék gyártásához szükséges tárolás
	földgáz	földgázszállítás
		földgáz rendszerirányítás
		földgázelosztás
		földgáztárolás
	távhő	távhőszolgáltatás

1. táblázat: A létfontosságú rendszerelemek fő csoportjai a hazai szabályozás alapján

Forrás: a 65/2013. (III. 8.) Korm. rendelet 3. mellékletének egyszerűsítése

Az energetikai létfontosságú rendszerek és létesítmények azonosításáról, kijelöléséről és védelméről szóló kormányrendelet [**374/2020. (VII.30.) Korm. rendelet**] jelen vizsgálat⁷ szempontjából kiemelt nemzeti létfontosságú rendszerelemek kijelölését tartalmazó kritériumai az alábbiak.

A villamosenergia-rendszerben ötféle rendszerelem-csoportot különít el a kormányrendelet:

- a villamos energia rendszerirányítás tekintetében az számít kritikus elemnek, amelynek kiesése esetén nem tartható fent az ellátásbiztonság, és amely 30 percen belül nem helyettesíthető;
- a villamosenergia-termelés nagyerőművei esetén nemzeti létfontosságú rendszerelemek azok, amelyek 200 MW és ezt meghaladó névleges teljesítőképességűek, illetve az adott erőmű a

⁶ Az Lrtv. szerint: „a kritikus társadalmi vagy gazdasági tevékenységek fenntartásához szükséges, elektronikus információs rendszertől függő, az alapvető szolgáltatások jegyzékében feltüntetett szolgáltatás.”

⁷ Tanulmányunk nem törekszik teljességre abban az értelemben, hogy nem vizsgálja minden nemzeti létfontosságú rendszerelem éghajlati és földtani sérülékenységét. Jó magyarázó erejű, fajsúlyos rendszerelemek kerülnek csak módszertani vizsgálatra. Vizsgálatunk éppen ezért a villamos energia, a földgáz és a távhő alágazatokra koncentrál. Ezek vizsgálatának jellemzői és összefüggései a későbbiekben azonban alkalmazhatóak lesznek a további létfontosságú rendszerelemekre is.

vizsgálatot megelőző három évben átlagosan elérte az 1 TWh villamosenergia-termelést. Ide tartozik aktuálisan például az MVM Zrt. Paksi Atomerőmű, az MVM Zrt. Mátrai Erőmű, a Gönyői Kombinált Ciklusú Erőmű is;

- a Black Start szolgáltatást nyújtó termelők is létfontosságú rendszerelemnek számítanak, vagyis ide tartoznak azok az erőművek, amelyek a hazai villamosenergia-rendszer esetleges összeomlását (black-out esemény) követően képesek újraindítani bizonyos nagyerőművek egyes kijelölt blokkjait (például ilyen a Lőrinci gyorsindítású gázturbinás erőmű);
- a nagyfeszültségű átviteli hálózatban azok a kritikus rendszerelemek, amelyek kiesése hatására bármely további elemnek a meghatározott feszültségszinttől való eltérése a 24 órát meghaladja és az adott tevékenység szempontjából nem pótolható;
- az elosztói hálózat közép- és nagyfeszültségű elemei (1 kV-132 kV) közül az nemzeti létfontosságú rendszerelem, amelynek
 - „a 24 órát meghaladó, de a 48 órát el nem érő kiesése legalább 10 000 felhasználót,
 - a 48 órát elérő vagy meghaladó, de a 72 órát el nem érő kiesése legalább 5000 felhasználót vagy
 - a 72 órát elérő vagy meghaladó kiesése legalább 2000 felhasználót zár ki a vételezésből.”

A földgáz alágazat esetében szintén öt rendszerelem-csoport került kialakításra nemzeti szinten. A földgázszállítás (például nagynyomású vezetékrendszerek) elemeinek azonosítása összetett kritériumok mentén történik⁸, a szállítási rendszerirányítás (például az FGSZ Zrt. országos rendszerirányító központja, Siófokon) 8 órán túli kiesése esetén számít kritikus rendszerelemnek. A földgáztermelés és a földgáztárolás rendszerelemei közt a nemzeti létfontosságú rendszerelem, amelynek legalább 72 órás kiesése esetén a lekötött kitermelési, illetve tárolási kapacitás rendelkezésre állása legfeljebb 40%, és az az adott tevékenység ellátása szempontjából más módon nem pótolható. A földgázelosztás esetén a nagynyomású és nagyközépnomású vezetékek esetén azonosak kritériumok a villamosenergia-rendszer elosztói hálózati kritériumaival. Európai létfontosságú rendszerelem azonosításhoz a földgáz ágazatban a minimális kiesési idő a rendszerirányítás, a földgázszállítás és a földgázelosztás esetén 1 nap. Ugyanezek az értékek a kereskedelmi tárolás esetén 10 nap, a stratégiai tárolás esetén 30 nap, a földgázimport esetén 50 nap és végül a földgáztermelés esetén 90 nap.

A távhőrendszer vonatkozásában nemzeti létfontosságú rendszerelemként azonosítja a kormányrendelet azt a kijelölt rendszerelemet, amely más kijelölt létfontosságú rendszerelem üzemfolytonos működését biztosítja, vagy kiesése legalább 20.000 felhasználó vagy díjfizető fűtési és melegvízcélú felhasználását egyaránt érinti.

Az energetikai létfontosságú rendszerelemek vonatkozásában a Kormányrendelet rögzíti továbbá azt is, hogy részleteiben mit jelent a jelentős zavar mértéke, hogy mik az alapvető szolgáltatásokhoz tartozó küszöbértékek és azt is, hogy mik a rendkívüli esetekre vonatkozó részletes szabályok.

Mindezekén túl fontos megemlíteni, hogy a létfontosságú energetikai infrastruktúrák és védelmük ezentúl természetesen hangsúlyosan jelenik meg a **katasztrófakockázat-értékelési és katasztrófakockázat-kezelési** tervezési dokumentumokban, amelyeket hazánk rendszeresen benyújt az európai szervek felé. Az Európai Unió számára készülő és a hazai **energetikai és klímavédelmi tervezési dokumentumokban** is fontos elemek létfontosságú energetikai infrastruktúrák rendszerei és rendszerelemei. Példaként említhető meg a Nemzeti Energia és Klímaterv (NEKT), vagy a Második

⁸ Alapvetően a létfontosságú rendszerelem kiesése esetén a gázátadó állomások kiadási ponti lekötött kapacitásainak 85% alá csökkenése a határ és az adott tevékenység nem pótolhatósága.

Nemzeti Éghajlatvédelmi Stratégia (NÉS-2) is, melyben részletezésre kerül a kritikus energetikai infrastruktúrák több jellemzője is.

A kritikus energetikai infrastruktúra rendszer elemeket közvetlenül és közvetve is érintik azok a közelmúltbeli európai uniós és hazai energetikai, valamint klíma- és környezetpolitikai kötelező jogi szabályozások illetve stratégiai tervezési célkitűzések, amelyekről csak néhány fontosabb kerül most kiemelésre. Ezekből elsőként meg kell említeni **az Európai Zöld Megállapodást (European Green Deal) azt 2019. decemberében útjára indított összetett programcsomagot**, amelynek elsődleges célja az Európai Unió klíma-, környezet- és energiapolitikai céljaink megerősítése és bővítése, azért, hogy az Unióban az üvegházgázok nettó kibocsátását nullára csökkentsék, és eközben a gazdasági növekedést elválasszák az erőforrások felhasználásának és a szennyezőanyagok kibocsátásának növekedésétől (decoupling). Számos európai közös politikát érint ez a csomag, személyek és térségek nem lehetnek ennek vesztesei, és kötelező érvényű jogszabályok sorának módosítását hozta magával.

Hosszú távú célkitűzés az Európai Unió teljes klímasemlegességének (nulla nettó kibocsátás egyensúlyi állapota) elérése 2050-re. Ez nemcsak tervezési cél, hanem jogszabályi kötelezettség is. Ezt Magyarország EU-s tagállamként a **2020. évi XLIV. törvényben a klímavédelemről** rögzítette. Ennek fő lépéseit a 2021. májusában a Kormány által elfogadott Nemzeti Tiszta Fejlődési Stratégia (NTFS) tartalmazza három, egymástól némileg eltérő forgatókönyv alapján. Példaként említjük a földgázfelhasználás változásainak előrejelzését, vagyis azt, hogy 80%-os földgáz igény csökkenést prognosztizál 2050-ig a végső energiafelhasználásban két forgatókönyvében is 2016-hoz, mint bázisévhez képest. Ennek fő oka az lehet, hogy 2050-re a villamosenergia-mixből kivételre kerülnek a fosszilis tüzelőanyagok, ami az energia és a közlekedési ágazatok ÜHG-kibocsátásának meredek csökkenését eredményezi forgatókönyvek). A harmadik forgatókönyv stagnáló földgázigénnyel számol 2050-ig. Valamennyi forgatókönyv egységes a szén/lignit kivételében a teljes hazai energiamixből (NTFS).

Középtávú jogszabályi kötelezettség és célkitűzés 2030-ig, „hogya a nettó üvegházhatásúgáz-kibocsátás (...) az Unió területén és gazdaságának egészében 2030-ig legalább 55 %-kal csökkenjen az 1990-es szinthez képest. Ezt az Európai Parlament és Tanács EU 2021/1119. rendelete tartalmazza. A hazai klímátörvény 3. § -ában is rögzíti, hogy Magyarország az üvegházhatású gázok kibocsátását legalább 40%-kal csökkenti 2030-ig az 1990. évhez képest. Ennek fő lépéseit a 2020. januárjában a Kormány által elfogadott Nemzeti Energia- és Klímaterv (NEKT) valamint a Nemzeti Energiastratégia (NES), mint stratégiai tervezési dokumentumok is tartalmazzák. A földgáz példájánál maradván a NES szerint a teljes hazai gázfogyasztás a jelenlegi évi mintegy 10 milliárd m³-ről 2030-ra közel 8,7 milliárd m³-re csökken, 2040-re pedig 6,3 milliárd m³ alá süllyedhet. Ezt kiegészíti, hogy „a földgázimport-függőségünk a jelenlegi 80%-ról 70% közelébe süllyedhet 2030-ra, 2040-re pedig tovább csökkenhet 70% alá. További stratégiai cél, hogy a 2030-ban fennmaradó évi mintegy 6,2 milliárd m³-es importigényt a lehető legdiverzifikáltabb forrásból tudjuk fedezni.” A dokumentum szerint az éves lakossági földgáz-fogyasztás 2 milliárd m³-rel (3,54-ről 1,54 milliárd m³-re) csökken fejlesztéseknek, illetve az energiahatékony, Zöld Táv hő Program végrehajtásának köszönhetően 2030-ig. A földgáz részarányát a távhőtermelésben 2030-ra a jelenlegi 70% feletti szintről 50%-ra kívánja csökkenteni, amivel évi mintegy 120 millió m³ földgázimport váltható ki (NES). A NEKT a szén/lignit kivételét tervezi 2030-ig a villamosenergia-szektorból, a Mátrai Erőmű lignittüzelésű blokkjainak leállításával (NEKT). Ezek a szabályozások és tervezett célok valamint a hozzájuk kapcsolódó intézkedések a kritikus energetikai rendszer elemek közül például a hazai nagyerőműveket, távfűtőműveket közvetlenül, a szállítási rendszereket (például nagynyomású földgázrendszerek, átviteli hálózat) közvetve fogják érinteni.

Ezekhez kapcsolódóan fontos kötelezettségeket és célkitűzéseket tartalmaznak az EU-s és hazai jogszabályok a megújuló energiaforrások arányának növelése valamint az energiahatékonyság fokozása irányába is az energiagazdálkodás fő szektoraiban. Például az EU 2018/2001/EU megújuló

energiaforrásokból előállított használatának előmozdításáról szóló irányelve tartalmazza 2030-ig azt a kötelező célt is, hogy „a megújuló energia részarányára vonatkozó kötelező uniós célt legalább 32%-ban (kell) meghatározni”. Ennek a tervezett növelése az Unió különféle szereplői előtt van egyeztetés alatt. Várhatóan 2030-ra az Unió és gazdaság vonatkozásában ez legalább 40%-ra kerül megemelésre. Magyarország vállalása ehhez kapcsolódóan a klímátörvény alapján jelenleg az „Magyarország a bruttó végső energiafogyasztásban legalább 21%-os megújuló energiaforrás részarányt ér el a 2030. évig.”

Mindezeket a szabályozásokat és célkitűzéseket, kapcsolódó intézkedéseket a 2022. február 24-én kezdődött orosz-ukrán háború átalakíthatja, ám ezekre vonatkozóan e tanulmány zárásakor (2022. december) még nem voltak konkrétumok.

Fontos hangsúlyozni még azt, hogy az 1.2 fejezetben rögzített célkitűzések alapján jelen vizsgálatban nem kívántunk teljes körűen és kizárólag a létfontosságú rendszerekkel és rendszerelemekkel foglalkozni. Ennek egyrészt az volt az oka, hogy olyan rendszereket és azon belül rendszerelemeket kívántunk vizsgálni, amelyek a földfelszínen vagy pont a felszín alatt jól vizsgálható hatásviselői az éghajlati, a földtani, valamint az összeadódó éghajlati és földtani hatásoknak, sérülékenységnek, és így vizsgálatuk más rendszerelemek számára is releváns, jó példák lehetnek. Ebben a megközelítésben fontos szempont az is, hogy egyes rendszerelemekre, például a nagyfeszültségű átviteli hálózat egyes szakaszaira, vagy a nagynyomású földgázvezetékek egyes felszíni létesítményeire is kiterjesztettük a vizsgálatot, amelyek önmagukban nem feltétlenül létfontosságú rendszerelemek. Másrészt a felhasznált szakirodalom alapján és szakmai szereplőkkel (például a távhő infrastruktúra vonatkozásában) folytatott egyeztetéseken több esetben is megjelentek, és elfogadásra kerültek olyan kritériumok a vizsgálandó rendszerekre és rendszerelemekre, amelyek nem egyeznek a jogszabályi kritériumokkal és lehatárolással. Ezeket a vonatkozó fejezetekben magyarázatokkal ellátva jelezzük is a következőkben. Mindezeket túl lényeges, hogy a létfontosságú rendszerelemekre vonatkozó részletes információk, összefüggések információbiztonsági szempontból érzékeny témának számítanak, így nem minden vonatkozásban hozzáférhetőek. Ez az utóbbi megállapítás vonatkozik erre a tanulmányra is.

2.2. Az éghajlati sérülékenység-vizsgálat elméleti keretei

Az éghajlati sérülékenység-vizsgálatok módszertana azon a megfigyelésen és megállapításon alapul, hogy a klímaváltozás által egy adott hatásviselőn okozott közvetlen és közvetett károk mértéke nem kizárólag a klímahatás nagyságától, hanem egyéb, a hatásviselőt jellemző faktoroktól is függ. Az egyes rendszerek (területek, ágazatok, egyéb hatásviselők stb.) klímaváltozással, illetve annak következményeivel szembeni sebezhetőségének vizsgálatához egy lehetséges eszköz az éghajlati sérülékenység-vizsgálat, ami az éghajlati hatások teljes láncolatának (közvetlen éghajlati hatások, közvetett hatások, társadalmi–gazdasági következmények) megismerésére épül és a kitettség, érzékenység és alkalmazkodóképesség együttes értékelésén alapul, lehetővé téve egységes módszertani keret biztosítását a kvantitatív éghajlati hatásvizsgálatokhoz.

A Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszerben az éghajlati sérülékenység értékelésére használt módszer a CLAVIER⁹ nemzetközi klímakutatási projektben kidolgozott CIVAS modell (Climate Impact and Vulnerability Assessment Scheme) (Pálvölgyi et al., 2008), amely az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület Negyedik Értékelő Jelentésében (IPCC 2007) közzétett megközelítésen alapul és

⁹ CLAVIER (Climate Change and Variability: Impact on Central and Eastern Europe) – a projekt célja az volt, hogy segítse a közép- és kelet-európai országok alkalmazkodását az éghajlatváltozás hosszú távú hatásaihoz és az egyre gyakoribbá váló szélsőséges klímaeseményekhez, valamint a megváltozott politikai és gazdasági helyzethez.

a környezeti állapotértékelésben széles körben alkalmazott, az Európai Unióban kidolgozott vizsgálati modellhez hasonló elvet követ.¹⁰

A modell a kitétség (exposure) → érzékenység (sensitivity) → várható hatás (impact) → alkalmazkodóképesség (adaptive capacity) → sérülékenység (vulnerability) kontextusban vizsgálja az éghajlatváltozás hatásait. A módszer használatával megállapíthatjuk azt, hogy a különböző érzékenységet és alkalmazkodóképességet mutató rendszereknek az egyes klímahatások milyen mértékű sérülékenységet okoznak (Sütő, 2016a). A modellben használt legfontosabb fogalmak a következők (Rotárné et al., 2016):

- **A kitétség** (exposure) az egy földrajzi helyre jellemző éghajlatváltozást mutatja meg. A különböző regionális klímaindikátorok változásairól (pl. a hőmérséklet értékeinek szélsőségei) adatokat és információkat a korábbi meteorológiai mérési adatsorokból, illetve klímamodellekből nyerhetünk.
- **Az érzékenység** (sensitivity) a hatásviselő rendszer viselkedése az időjárás függvényében. Ezen rendszerek érzékenysége a klímaváltozástól független, és elsősorban a fizikai paramétereiből tevődik össze.
- **A várható hatás** (potential impact) a kitétség és az érzékenység kombinációjaként határozható meg, amely egyaránt jellemző a földrajzi helyre és a vizsgált hatásviselő rendszerre.
- **Az alkalmazkodóképesség** (adaptive capacity) olyan nem-klimatikus tényező, amely magába foglalja a klímaváltozásra adott helyi társadalmi-gazdasági válaszokat és alkalmazkodási stratégiákat, amelyek célja a kedvezőtlen hatások enyhítése.
- **A sérülékenység** (vulnerability) komplex mutató, amely kombinálja a kitétséget, az érzékenységet, valamint az alkalmazkodóképességet. Megmutatja, hogy ugyanaz a várható hatás egy gyengébb alkalmazkodóképességű térségben súlyosabb következményekkel járhat.

Jelen projektben az éghajlati sérülékenységvizsgálat módszerét adaptáljuk a kritikus energetikai infrastruktúrákra (villamosenergia-, földgáz-, távhőrendszerek) abból a célból, hogy az éghajlatváltozás energiaszolgáltatásokat veszélyeztető hatásait értékeljük.

2.3 Klímamodellek és jelentőségük az éghajlati sérülékenység-vizsgálatokban

Az éghajlati sérülékenység-vizsgálatokat az ENSZ Éghajlatváltozási Kormányközi Testületének (IPCC) tudományos jelentései is részletesen tárgyalják. Ezek a nagy részletezettségű tudományos jelentések több ezer kutató és szakember munkáját szintetizálják és alapjául szolgálnak az üvegházhatású gázok csökkentését célzó (mitigációs) és a várható hatásokhoz való alkalmazkodást elősegítő (adaptációs) stratégiáknak. A korábbi, ún. 4. IPCC Értékelő Jelentésben (IPCC AR4 WG1, 2007) került meghatározásra a sérülékenység definíciója, valamint kitétségi, érzékenységi és alkalmazkodóképességi indikátorokat hoztak létre az éghajlati sérülékenység vizsgálatához. Ugyanakkor a legújabb, 5. IPCC Értékelő Jelentés (IPCC AR5 WG1, 2013) csupán érzékenységet és alkalmazkodóképességet definiál a sérülékenység függvényeként és éghajlati veszélyekre bontva tekinti a rendszer sérülékenységét – így nem is definiál kitétségi indikátorokat. Mivel az éghajlatváltozás nagysága a rendszer külső tényező okozta kitétségének részeként, a korábbi definíció szerint explicite leírható, így sok kutatás továbbra is ezt a megközelítést veszi alapul, noha ezzel a korábbi paradigmával az eredményekben rejlő bizonytalanságokkal kell szembenéznünk és a

¹⁰ Az Európai Unióban kidolgozott és elfogadott környezetértékelési vizsgálati modell DPSIR („Driving Force – Pressure – State – Impact – Response”) -Hajtóerők – Terhelés – Állapot – Hatás – Válasz. A keretrendszer a társadalom és a környezet közötti kölcsönhatásokat, az egymástól való függésüket írja le. A társadalmi tevékenységek terhelik a környezetet, mennyiségi és minőségi átalakulásokat idézve elő benne, ugyanakkor a környezetben történő változások a társadalom válaszreakcióival járnak együtt.

sérülékenység-vizsgálatokat eszerint kell értelmeznünk. Ezen bizonytalanságokat az érintett alfejezetekben később tárgyaljuk.

Az éghajlati indikátorok jövőbeli meghatározásához ismernünk kell az éghajlat várható alakulását. Ennek vizsgálata hasonló módon történik, mint az időjárás előrejelzése, de míg az utóbbi a légkör pillanatnyi (vagy legfeljebb egy-két hetes) állapotát igyekszik leírni, az éghajlati vizsgálatok az éghajlati rendszer viselkedését tekintik. Itt a folyamatok általában lassabban zajlanak, ezért a meteorológiai változók (hőmérséklet, csapadék, szél, nedvesség stb.) hosszú időn át felvett, általában több évtizedes statisztikáit vesszük alapul. A globális éghajlati rendszer viselkedését az egyes komponensek (légkör, óceán, bioszféra, jég- és földfelszín) fizikai törvényein alapuló, matematikai egyenletrendszerrel kifejezett, ún. *globális éghajlati modellekkel (GCM)* tudjuk vizsgálni. Mivel ezeknek a modelleknek a horizontális rácsfelbontása még ma is 100 km körüli és futtatásuk rendkívüli számítási kapacitást igényel, ezért a lokális folyamatok pontosabb megismerésére ún. regionális éghajlati modelleket (RCM) használnak az éghajlatkutató központok. Az RCM-ek alkalmazásával a GCM-ek eredményeit határfeltételként skálázzuk le, melyet hazánkban az ELTE Meteorológiai Tanszékén (ELTE) és az Országos Meteorológiai Szolgálatnál (OMSZ) végeznek. A NATÉR rendszerben az említett két intézmény hazai futtatású modelljei mellett feldolgozásra kerültek még további, ingyenesen elérhető, európai intézetekben futtatott RCM-ek is. Ezek az ún. EURO-CORDEX regionális modellek is nagyjából 10 km-es horizontális rácsfelbontással rendelkeznek és a hazai modellekénél nagyobb területen, teljes Európára rendelkezésre állnak (*Jacob et al., 2014*). A NATÉR-ben található szimulációkat az 2. táblázat foglalja össze, melyek a projekt során kiegészítésre fognak kerülni további modellfuttatásokkal is.

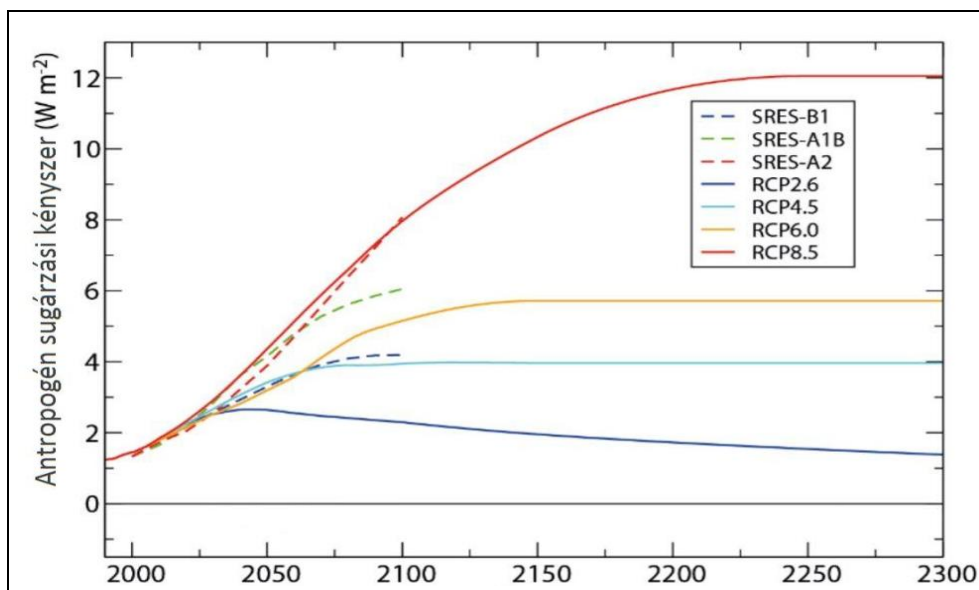
Regionális modell	ALADIN-Climate4.5	RegCM3	ALADIN-Climate5.2	RegCM4.3	RCA4	RCA4
Globális határfeltétel	ARPEGE-Climate	ECHAM5	CNRM-CM5	HadGEM2-ES	CNRM-CM5	EC-EARTH
Forgatókönyv	SRES A1B	SRES A1B	RCP8.5	RCP4.5	RCP4.5, RCP8.5	RCP4.5, RCP8.5
Adatforrás	OMSZ	ELTE	OMSZ	ELTE	EURO-CORDEX	EURO-CORDEX

2. táblázat: A NATÉR rendszerben jelenleg elérhető regionális klímamodellek néhány jellemzője

Forrás: saját szerkesztés

A klímamodellek a természetes éghajlatalakító folyamatok (vulkánkitörések, napfoltok, a Föld pályaelemeinek módosulásai) mellett az emberi tevékenységet is figyelembe veszik. Erre a hatásra a légköri üvegházgázok koncentrációján keresztül külső kényszerként, a rendszer sugárzási viszonyait módosító tényezőként tekintenek. Az ember által okozott éghajlatváltozást meghatározó gazdasági és politikai folyamatok jövőbeli alakulása nem ismert, ezért különböző ún. hipotetikus forgatókönyveket hoznak létre. A klímamodellekkel arra keressük a választ, hogyan reagál az éghajlat a kevésbé vagy jelentősen megváltozott jövőbeli sugárzási viszonyokra. Korábban a modellek az ún. SRES forgatókönyveket (*Nakicenovic et al., 2000*) alkalmazták a jövőre, amit mára felváltottak az ún. RCP forgatókönyvek (*Moss et al., 2010*)¹¹. Ezek a sugárzási viszonyok tekintetében lehetnek átlagos (SRES A1B), pesszimista (RCP8.5) vagy optimista (RCP4.5) forgatókönyvek. A két forgatókönyvcsalád (SRES és RCP) egymáshoz való viszonyát az 1. ábra mutatja.

1 ¹¹ Míg az SRES forgatókönyvek (Special Report on Emissions Scenarios) társadalmi-gazdasági folyamatokon alapulnak, addig az azt felváltó RCP-k (Representative Concentration Pathways) a sugárzási kényszer változásán. Az RCP-knél az előbbivel szemben lehetséges politikai és mitigációs lépések bevezetése is.



1. ábra: Az ember okozta sugárzási kényszer változása az iparosodás előtti szinthez az SRES és RCP forgatókönyvekre 2000 és 2300 között

Forrás: IPCC AR5 WG1, 2013

Az éghajlati modellek természetüknél fogva nem alkalmasak arra, hogy belőlük szezonális, több hónapra vagy évre vonatkozó előrejelzéseket készítsünk. Mivel ezek nem előrejelzések, ezért a jövőbeli évek vagy napok nem beazonosíthatók, azonban az eredményeikből számolt statisztikákon keresztül (átlagok, szórások, percentilisek, eloszlások) számszerű indikátorokat tudunk képezni. Nem lehetséges megadni, hogy pl. 2022 vagy 2040 nyarán milyen maximumhőmérsékletre számíthatunk, ezáltal mekkora lehet a hűtési igény, azonban azt igen, hogy a 2040-es években valamilyen valószínűség mellett milyen nyári maximumok várhatóak, amely a hűtési igény valamekkora növekedését eredményezi. Az éghajlati projekciókat általában egy 20-30-éves jövőbeli időszakra vizsgáljuk, mely gyakran a rövidtávú adaptáció szempontjából fontos 2021–2050-re, illetve a hosszútávú stratégiáknál lényegesebb 2071–2100-ra vonatkozik. Az átlagos modellhibák kiküszöbölése végett egy múltbeli kontroll időszakot is megvizsgálunk, amely korábban az 1971–2000 időszak volt, azonban az éghajlati vizsgálatokban mára előfordul a jelenhez közelebbi vagy rövidebb referenciaidőszak használata is.

Fontos leszögezni, hogy a jövőbeli éghajlati modelledmények nem tökéletesek és bizonytalanságokkal terheltek, amelyek közül kiemeljük az alábbiakat.

1. A természetes vagy belső változékonyság az éghajlati rendszer külső kényszer nélkül is fellépő tulajdonsága. Ezzel magyarázható például az egymást követő hidegebb vagy melegebb évek és évszakok váltakozása.
2. Mivel az éghajlati modellek nem azonos módszerekkel írják le egyes fizikai folyamatokat (pl. a csapadékképződést), ezért azok válasza egy megváltozott külső kényszerre is mások lesznek. Ezt nevezzük modellbizonytalanságnak.
3. Az emberi tevékenység jövőbeli alakulása is bizonytalan, azaz nem mindegy, hogy a leírásukra használt forgatókönyvekből a modellek melyiket veszik figyelembe. Ezt forgatókönyv bizonytalanságnak nevezzük. Az egyes bizonytalanságok a különböző meteorológiai változókra más-más időskálán jelentkeznek, de a modelledmények csakis az azokban rejlő bizonytalanságok megfelelő figyelembevételével értelmezhetők (Szabó és Szépszó, 2016). Egy jó hatásvizsgálat törekszik arra, hogy több regionális és globális klímamodell által több kibocsátási forgatókönyvet követő szimulációját tekintse, mely megfelelően reprezentálja a három bizonytalanságot, illetve ez alapján valószínűségi formában is megadható az egyes éghajlati indikátorokban bekövetkezett változás.

A legújabb regionális éghajlati modell az éghajlati skálán a legtöbb meteorológiai változót nagyon jól tudja szimulálni, azonban ahhoz, hogy pontos múltbeli indikátorokat számolhassunk a sérülékenységvizsgálat során, szükségünk van elfogadott éghajlati megfigyelésekre is. Ezt egyrészt különböző statisztikák alkalmazásával elvégezhetjük a modellek validációját az adott változóra vagy származtatott indikátorra – vagyis hogy mennyire tér el a múltbeli megfigyelt értéktől. Másrészt az így felmért múltbeli hibával korrigálhatjuk a jövőbeli modellezett értékeket különböző hibakorrekción módszerek segítségével. Ma már a legtöbb, jó minőségű éghajlati sérülékenységvizsgálat, ahol van erre lehetőség, ilyen hibakorrigált adatokat vesz figyelembe a jövőre.

Az általunk ismert és a projekt során felhasználható megfigyelési adatbázisok a következők: a NATÉR-ben is megtalálható, hazánkat lefedő CARPATCLIM-HU adatbázis, a Kárpát-medence térségét érintő CARPATCLIM, az azt felváltó, jelenleg legjobb hazai rácsponti HUCLIM adatbázis, az egész Európára létrehozott E-OBS, illetve a magaslégköri éghajlati indikátorokhoz szükséges ERA5 reanalízis. Ezen adatbázisok értelmezését és elemzését jelen alfejezetben nem részletezzük.

2.4. A földtani veszélyforrások, fő csoportjaik és rövid jellemzésük

A földtani veszélyforrások fogalma alá sokféle jelenség és folyamat besorolható, amelyek figyelembevételére és általános jellemzése alapvető fontosságú, különösen, ha éghajlati sérülékenységvizsgálattal kívánjuk azok vizsgálatát összekapcsolni. Megállapítható, hogy hazánk földrajzi–földtani helyzetéből következően két fő jelenségcsoportot jelen tanulmányunkban elhanyagolhatunk. Ezek a földrengések és a vulkáni aktivitás megnyilvánulásai. Közismert, hogy Magyarország területe vulkanikus szempontból békés, de a földrengések nem ismeretlenek itthon sem. Mivel azonban a tektonikai eredetű földmozgások legtöbbször csak műszerekkel érzékelhető, ezért a kritikus infrastruktúrára gyakorolt hatásuk elemzésétől itt eltekintünk.

A földtani veszélyforrások harmadik csoportja azonban Magyarországon sokkal gyakoribb – külső földi erők okozta veszélyforrások Magyarországon 942 települést, a településállomány harmadát érintik –, s így nem elhanyagolható természeti hatás, mint arra Tildy et al. (2019) a NATÉR2 projekt egyik szakmai jelentésében felhívta a figyelmet. Ide azok az ún. sekélyföldtani, azaz felszíni és felszín közeli veszélyforrások tartoznak, amelyeket a 2014-ben készített országos katasztrófa kockázatértékelési jelentésben két fő csoportra osztottak, tömegmozgásokra és üregbeszakadásokra. E jelenségek akkor okoznak károkat, ha építményeket, vagy valamilyen (jellemzően vonalas) infrastrukturális létesítményt érintenek.

Ezen túlmenően érintenünk kell a hidrológiai, hidrogeológiai közegben lejátszódó folyamatokat is, mert ezek is okozhatnak (pl. árvizek, villámárvizek, a talajvízszint tartós megváltozása, a talajvíz kemizmus révén) súlyos problémákat, haváriákat a kritikus infrastruktúra elemek számára. Ezek közül jelen tanulmányban a felszín alatti jelenségekre koncentrálnak.

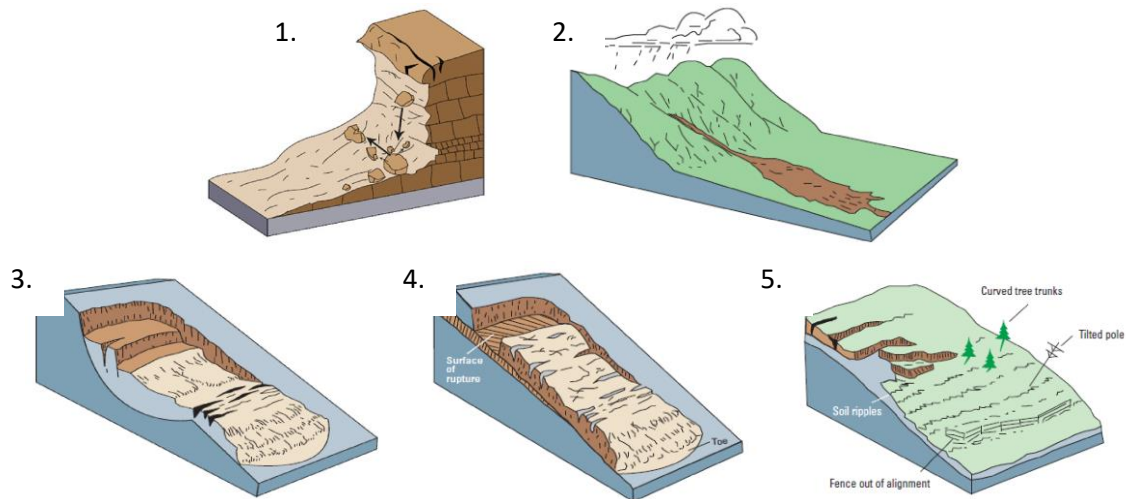
Fő csoportok

a.) Felszínmozgások

A sekélyföldtani veszélyforrások csoportosítása számos módon lehetséges. Az osztályozhatóság túlmutat a természetes tényezőknél: a jelenségek közvetlen bekövetkezési oka lehet tisztán természetes (pl. extrém esőzés), tisztán mesterséges (pl. szivárgó szennyvízvezeték), de akár a kettő kombinációja is. Ez arra hívja fel a figyelmet, hogy a felszínmozgások bekövetkezése sok esetben több, elsőre függetlennek tűnő ok „együttállására” vezethető vissza. Ez azt is jelenti, hogy gondos vizsgálatra van szükség a tényleges szituáció leírásához, majd az általános megelőzési protokoll finomításához.

A természetes eredetű földtani veszélyforrásoknak többféle, eltérő részletességű csoportosítása található meg a szakirodalomban. Az 1. ábra mutatja be a számunkra most legfontosabb típusokat, Highland és Bobrowsky (2008) nyomán. Ezek az omlás, törmelékfolyás, csuszamlás, valamint a kúszás. A csuszamlás löszvidékeken jellemző válfaja a suvadás. Mint a tömbszelvény ábrák jelzik, jelentős morfológiai meghatározottság rögzíthető az egyes típusok esetében, így – figyelemmel hazánk

általános domborzati viszonyaira – magyarországi gyakoriságuk, esetszámuk sem egyforma. Az omlások, törmelékfolyások hegyvidékeken lesznek általánosságban gyakoribbak, míg pl. a Duna mentén a suvadások, csuszamlások kerülhetnek relatív többségbe. A kúszások morfológiailag neutrális területeken is okozhatnak problémát, de itt a folyamat sebessége jelentősen kisebb.













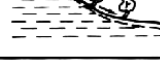







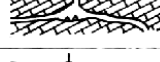

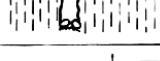

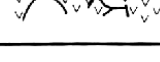

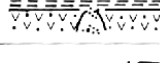





2. ábra: A kritikus infrastruktúra elemek szempontjából legfontosabb felszínmozgás típusok,

Forrás: Highland, Bobrowsky (2008) nyomán

Típusok: 1. Omlás, 2. Törmelékfolyás, 3. Suvadás, 4. Csuszamlás, 5. Kúzás

A 2. ábrán bemutatott típusok sorrendje egyúttal azok lefolyási sebességének csökkenését is tükrözi, amely a havária helyzet voltaképpen kialakulására, vagy bekövetkezés esetén annak terjedelmére, társadalmi-gazdasági hatásaira, másként fogalmazva: kezelhetőségére erősen kihat. Ebből a szempontból a kúzás jelenségét (2. ábra 5. típus) érdemes kiemelni az energetikai infrastruktúra elemek veszélyeztetése szempontjából, mert a folyamat lassúsága elfedheti a kritikus infrastruktúrát érintő (megelőző) beavatkozás szükségességét, noha a (rejtett) károkozás akkor is valós forgatókönyv, ha nem jár kifejezett (hirtelen) havária helyzettel.

A 3. ábrán bemutatott csoportosítás (Fodorné és Kleb, 1986) fő kategóriái jól megfeleltethetőek a 2. ábrán bemutatottnak, de osztályozásbeli eltérések is felfedezhetők (pl. a kúzás itt nem önálló kategória). Ugyanakkor számunkra lényeges többlet az amerikai besoroláshoz képest, hogy itt szerepelnek a beszakadások (természetes és mesterséges eredetűek egyaránt). Mivel a hazai havária események egy jelentős része az alábányászottság, alápincézettség, illetve barlang eredetű beszakadásokhoz köthető, ezért ezt a kategóriát mindenképp figyelembe kell vennünk.

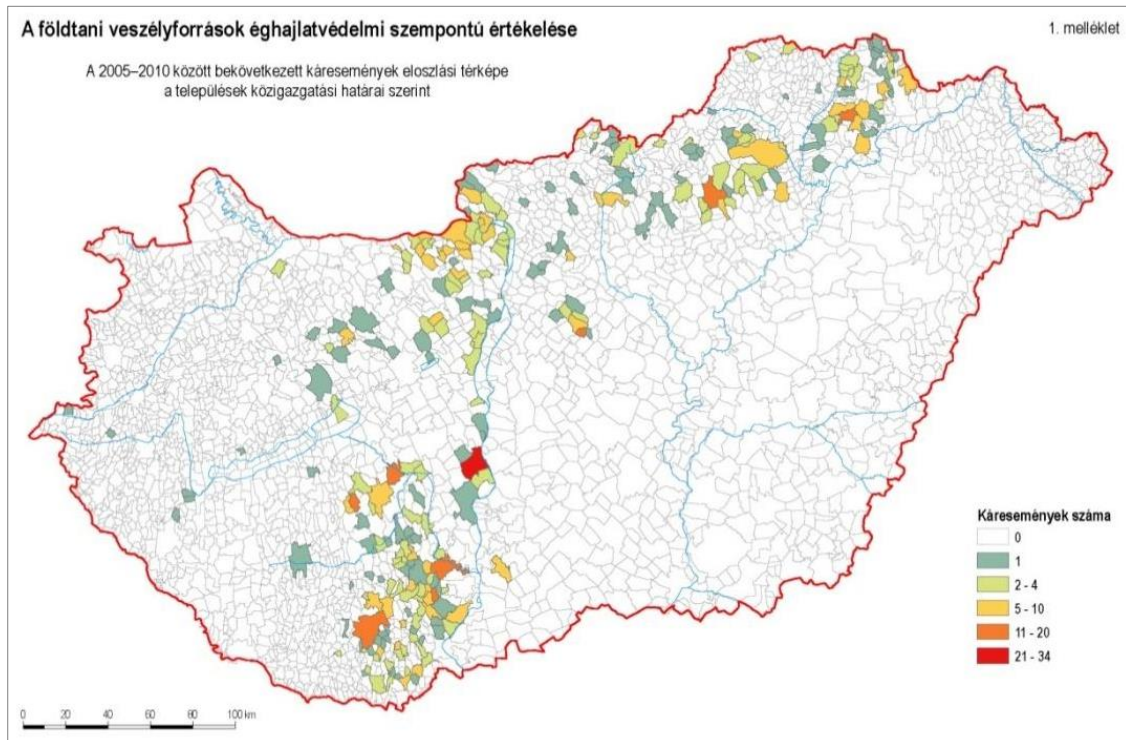
	mozgástípus	jelenség	térképi jel
omlás	kőzetomlás		
	föld-(löss)omlás		
csuszamlás	rétegcsúszás sík-, összetett, lemezes		
	rogyás szelletes földcsúszás, rogyásos suvadás		
	suvadás		
	kúszás földfolyásos csúszás		
folyás	sárfolyás		
	kőfolyás		
	törmelékmozgás		
beszakadás	karszt-beszakadás		
	löss-rozkadás		
	mesterséges üreg beszakadása bányák, pincék		
egyéb	süllyedés		
	rézsűhámítás és kagylósodás		
	hányók folyása		

3. ábra: A magyarországi felszínmozgások főbb típusai,
Forrás: Fodorné és Kleb (1986) nyomán

Fontos hangsúlyozni azt is, hogy adott területen a mozgások kiújulhatnak, megismétlődhetnek, amire Szabó Kiss, Mezősi (2008) is felhívja a figyelmet. Az anyagi kárt okozott felszínmozgásoknak Magyarországon is kataszteri eseményleltára van. Ennek alapján körvonalazható, hogy mely területek érintettek a leginkább ebből a szempontból (4. ábra). Ilyen klasszikus helynek számít a természetes okokra visszavezethető mozgások csoportjában a fonyódi-, vagy a dunaújvárosi lösz-magaspart, de akár a nagymarosi Szent Mihály hegy előtere is, ahol gyakran károsodik az alatta futó vasút. Ezeket túlmenően lényeges megemlíteni, hogy nem országos léptékben ugyan, de helyenként rejtett

barlangjáratok (pl. erre Budapest), valamint régi, elfeledett pincék is okozhatnak havária helyzeteket (például Eger, Pécs, Nagymaros környékén).

A mesterséges háttérű mozgások szempontjából a mélyművelésű bányavidékek, valamint alápincézett falvak, városok területén jellemzőek az ismétlődő beszakadások, még ha nem is mindig épp ugyanazon a helyen. E területeken a kritikus infrastruktúra működésének biztosítása, megvédése érdekében speciális megelőzési és/vagy helyreállítási beavatkozásokra, műszaki megoldásokra van szükség.



4. ábra: A földtani veszélyforrások országos eloszlása a 2005-2010 közötti esetek alapján

Forrás: NATÉR, Tildy et al., 2019

b.) Felszíni, felszín alatti vizekkel kapcsolatos havária helyzetek

A felszínmozgások, mint földtani veszélyforrások nem fedik le teljesen azokat a természetes tényezőket, amelyek havária helyzetet teremthetnek a kritikus infrastruktúra létesítmények számára. A felszíni és felszín alatti közegben lejátszódó hidrológiai és hidrogeológiai jelenségek jelentette kockázatokat az éghajlatváltozás hatásai erősítik fel, hiszen az egyre gyakoribbá váló extrém csapadékesemények úgy a felszíni, mint a felszín alatti vízháztartásra, vízmozgásra erőteljes hatást gyakorolnak. Ezen kockázatokat kiindulási alapnak tekintve a következő jelenségeket szükséges feltétlenül megemlíteni: a talajvízszint tartós megváltozása, valamint a talajvíz kemizmus.

A talajvízszint tartós megváltozása – kivált, ha ez rövid idő alatt következik be – számottevő stabilitási kockázatot jelent az épületek, létesítmények számára, miként arra már Mosonyi és Papp (1959) felhívták a figyelmet. A talajok, illetve üledékek, laza kőzetek pórusait kitöltő víz helyzete, nyomása alapvetően kihat a közeg nyírószilárdságára, s ez pedig a felszínen megtalálható épület, létesítmény, tartóoszlop stabilitására. Ennek megfelelően a (kritikus) infrastruktúra elemek tervezésekor, illetve kivitelezésekor igen fontos a talajvíz szintjének, illetve várható fluktuációjának figyelembevétele.

Szót kell ejtenünk a talajvíz kemizmusához fűződő negatív hatásokról is. Balázs et al. (2017) a betonok korróziójára hívták fel a figyelmet, és megállapították, hogy a betonok duzzadásos, illetve oldódásos károsodásáért a kémiaiag agresszív talajvízben található, annak fizikai-kémiai jellegét befolyásoló alkotóelemek tehetők felelőssé. Előbbi jelenséget elsőként az 1890-es években írták le, s mostanra általánosan elterjedt védekezési megoldássá vált a szulfátálló cement alkalmazása. Az utóbbi problémátípusra azonban még most sincs teljesen kiforrott megoldás, tekintettel arra, hogy az oldódásos betonkorrozó sokféle megjelenési formája ismert.

A fentebb bemutatott jelenségtípusok már pusztán az azokat jellemző lefolyási sebesség miatt sem kezelhetők egységesen. Így könnyen belátható, hogy az infrastruktúra elemekre inkább a sokszerű, hirtelen bekövetkező, nagyobb léptékű csuszamlások, beszakadások, omlások, jelentenek nagyobb kockázatot.

A kritikus infrastruktúrára irányuló ilyen hatások valós károkozása bekövetkezéséhez még egy további láncszem is hiányzik. Ez pedig az, hogy van-e egyáltalán bármilyen létesítmény e jelenségek hatósugarában? Másként fogalmazva teljesülnie kell annak, hogy a természeti tényezők szempontjából kockázatos szituációban, az adott földrajzi helyen és időben legyen voltaképp egyáltalán kritikus infrastruktúra elem. És ez egy olyan faktor, amely leginkább az emberi jelenlét, területhasználat kiterjedésével erősödik fel, mint arra Tildy et al. (2019) rámutatott. Ráadásul az emberi jelenlét hatása kettős, mint ahogy erre a csoportosítást tárgyaló fenti részben utaltunk. Nevezetesen az emberi tevékenység nem csupán tárgyként (talán az angol „target” ezt jobban kifejezi), hanem kiváltó tényezőként (ezt jelöli a „trigger” angol szó) is megjelenik egy-egy földtani veszélyforrás aktiválódásakor. Azaz a természetes okokon túlmutatóan, magából az emberi jelenlétből, tevékenységből fakadóan is azonosíthatunk kockázatot, konfliktusforrást.

2.5. A "NATÉR továbbfejlesztése" projektben elért eredmények az energetikai infrastruktúra éghajlati sérülékenységgel összefüggésben

Az MBFSZ NAKFO által 2016-2019-ben végzett „A NATÉR továbbfejlesztése” projekt keretein belül többek között olyan tanulmányok kerültek elkészítésre, amelyek a klímaváltozás hatásait vizsgálják hazánkban, különböző keretek között. Ide sorolhatjuk a távhő-, a villamosenergia- és a gázellátás (együtt említve a továbbiakban: kritikus infrastruktúrák), valamint a földtani veszélyforrások éghajlati szempontú értékelését. Legutóbbi a vizsgálati tárgy típusában eltér a másik három tanulmánytól, de benne hasonlóképpen a sérülékenység-vizsgálat módszertana került alkalmazásra. A vizsgálat módszertanában különböző fázisig jutottak el az egyes tanulmányok, amelyek egyenkénti értékeléseik kifejtésénél bővebben is bemutatásra kerülnek. A kritikus infrastruktúrák esetében az igényoldal kihasználtság-változására és a kínálati oldal infrastruktúra-sérülékenységére gyakorolt hatások elemzése egyaránt végbement, ezen összegzés azonban kizárólag az energetikai infrastruktúra sérülékenységi módszertanainak összefoglalóját tartalmazza. Ebből kifolyólag a földgáz értékelése nem került bele, mivel ott egyedüli kivételként az igényoldali vizsgálat történt meg (Geogold Kárpátia Kft. 2019 b). A távhő és a földtani veszélyforrások esetében a klímaméterek adatai az RCA4 regionális modell, EC-EARTH globális modell adatokkal meghajtott szimulációk alapján, az ötödik IPCC jelentés RCP 4.5 (enyhébb), illetve az RCP 8.5 (extrémebb időjárás változásokat előrevetítő) forgatókönyvei alapján lettek kiszámolva, több időszak átlagértékeinek változását lekövetve. A bázisév az 1971 – 2000-es periódus a jövőbeli időszak pedig 2021 – 2050 közötti évek voltak a távhő esetében, a földtani veszélyforrások vizsgálatánál az előbbi kettő mellett a hosszú távú adaptáció elemzésére a 2071-2100-as időszakot is figyelembe vették. Ezzel szemben a villamos energia infrastruktúrájának sérülékenységét az elmúlt időszakok káreseményei alapján becsülték meg.

A **villamosenergia-ellátásról** szóló tanulmány (FICÉP 2019) részletesen bemutatja a villamosenergia-ellátórendszer hálózati felépítését, a sérülékenység szempontjából releváns rendszer elemeket és azok jellemzőit. A villamosenergia-előállítás az **erőművek** végzik (nagy-, kis- és törpeerőművek). A villamos energia szállítását a **villamos hálózat**: átviteli hálózat, nagyfeszültségű elosztóhálózat,

középfeszültségű elosztóhálózat, kiefeszültségű elosztóhálózat (az első kettő egyaránt nagyfeszültségen működik, így műszaki megoldásaik hasonlóak, illetve egymást kiegészítő feladatokat látnak el, ezért sérülékenységi szempontjából a kettő lényegében együtt kezelhető lehet). A hálózati infrastruktúra lehet **szabadvezetékes**, vagy **kábelvezetékes**. A **villamos állomás** azoknak a berendezéseknek az összessége, amelyek a villamos energiát transzformálják, elosztják és a villamos hálózat vezetékeit összekötik, kapcsolják és védik. Az hálózati állomásoknak három típusa van (erőművi állomás, hálózati állomás, fogyasztói állomás). Az állomások között megkülönböztetünk **kapcsoló- és transzformátor állomásokat**.

A villamosenergia-ellátó rendszer éghajlati sérülékenysége esetében a következő klímamutatókat szükséges figyelembe venni (fontosságuk sorrendjében, röviden meghatározva a hatásláncokat) a tanulmány szerzői szerint:

- **szél, szélnyomás** (szélnyomás a maximális szélsébségből és a tartóoszlop szélirányban mért szélességéből adódik) – a szélnyomás hatására általában a tartóoszlopok szerkezete károsodik vagy a szélsébség esetleges zúsmarapótteherrel kapcsolódva a távvezetékek sodronyait veszi fokozottabban igénybe, szakadást előidézve, illetve oszloptörést okozva;
- **tapadó csapadék** (ónos eső, zúsmara, hó) – elsősorban a szabadvezetésekre és tartóoszlopokra veszélyes (széllel kiegészülve a leginkább veszélyes);
- **fagypont körüli hőmérsékletingadozás** – szabadvezetékekre és oszlopokra jelenthet veszélyt (főleg ha hóesés után következik be), emellett a betonoszlopok esetében is okozhat problémát (beszivárgó víz megfagy és repedések keletkezhetnek);
- **hirtelen, nagy mennyiségű eső** – talajeróziót (továbbá talajfolyást, földcsuszamlást) okozhat, amely az oszlopok kidőlését, illetve kábelvezetékek esetében a kábel törését eredményezi. A záporok által keltett lokális villámárvizek az oszlopokra és a vezetékekre nem jelentenek veszélyt, de egyes transzformátor- vagy kapcsolóházak érintettek lehetnek (érzékenységi alacsony);
- **hőhullámok** - közvetlenül a kapcsolóállomások elektronikus irányítástechnikai berendezéseire – amelyek a magas hőmérsékletre érzékenyek – hat; közvetetten a talajok szárazodásához vezet, aminek következtében a talajok egy része veszíthet a teherbíró képességéből, így veszélyeztetve a tartóoszlopokat,
- **légnedvesség** – következtében a vasoszlopokon korrózió indulhat,
- **villámcsapás** – csak a szigetetlen szabadvezetékekben, illetve nagyon ritka esetben a tartóoszlopokban tehetnek kárt. Utóbbi hatás is csak hosszú távon, az anyagok szerkezetének megváltozása miatt érvényesül,
- **talajvíz** – Rövid távú hatásként a megemelkedett talajvízszint egyes típusú talajoknál a teherbíró képesség romlásához vezet, amely széllel párosulva az oszlop kidőlését okozhatja. Ha belvíz alakul ki, az hosszabb távon főként az alapozást és a szerkezetet összekötő csonk korrodálódásához vezethet, amely nagy terhelésnél eltörhet, így szintén oszlopdőlést okozva. A talajvizek kémiai összetétele az alapozásra van hatással. A tervezéskor ugyan felmérték a talajvíz korrozivitását, de évtizedes távlatban ez átalakulhat, roncsolva az alapozást.

A tanulmányban bemutatott hatásútvonalak mentén végigkövethető, hogy melyek azok a kulcsterületek, amelyeket a villamosenergia-ellátó rendszer infrastruktúrájának sérülékenységi vizsgálata során érdemes figyelembe venni. Ezek főként a tartóoszlopok szerkezete, alapozása; illetve a felszín alatt futó kábelvezetékek. Az ezekre legnagyobb hatást gyakorló időjárási elemek a szélsébség; csapadék (tapadó csapadék és hirtelen lezúduló nagy esők); hőmérséklet (nyári maximumhőmérsékletek és téli fagypont körüli ingadozó hőmérsékletek). A kulcstényezők (lásd fent) alapján felállítható azon indikátorok rendszere, amelyek a NATÉR-be integrálhatók és gyűjtésükkel a villamosenergia-ellátás területi éghajlati sérülékenysége adatain alapuló vizsgálat végrehajtható. A tanulmány javaslatot tesz konkrét indikátorokra is mind az infrastruktúrára, mind a klimatikus elemekre, mind pedig az egyéb természeti elemekre vonatkozóan.

A **távhőrendszer** infrastruktúrájának elemzése során – ellentétben a villamos energiával – a sérülékenység-vizsgálat módszertanát a legutolsó szakaszáig sikerült elvégezni (Geogold Kárpátia Kft. 2019 a). Az infrastruktúra sérülékenységének vizsgálatához a klimatikus paraméterek közül a nagy széllelkésekkel terhelt napok számának változását, az extrém hőmérsékletváltozású napok számának változását, illetve a hőségnapok számának változását használták fel.

Az infrastruktúra sérülékenységét külön vizsgálták a hőforrások (ezen belül **fűtőművi egységek**, továbbá **fűtőerőművek és speciális hőtermelő egységek** bontásban) a **hőszállító és hőelosztó vezetékrendszer**, illetve a **hőközpontok** esetében. A fűtőművi egységek **kitettséget** a helyi klímáparaméterek határozzák meg, a klímaváltozás hatásai a műszaki infrastruktúrára fűtőművenként eltérők lehetnek, ezért a vizsgálatokat mindegyikre egyedileg kell elvégezni. A vizsgált időjárási paraméterváltozások az alábbiak voltak: **extrém hőmérsékletváltozás, nagyobb szélviharok, hőségnapok számának növekedése és az egy nap alatt lehulló nagyobb csapadékmennyiség gyakoriságának növekedése.**

Az **érzékenység** vonatkozásában a fűtőművek az extrém hőmérsékletváltozásra általában nem érzékenyek, de a tartós melegedés okozhat zavarokat. A hőségnapok számának növekedése akkor okozhat gondot, ha valamelyik helyi berendezés (villamos berendezések, motorok, frekvenciaváltók, valamint a számítógépes folyamatirányító rendszerek, klíma berendezések lehetnek érintettek) túlmelegszik és kiesik. A szélviharok hatásaira a szabadban felállított építmények – különösen a kémények – érzékenyek (az érzékenység mértékét a statikai állapot ismeretében lehet besorolni). A szélviharok a fűtőmű áramellátását is veszélyeztethetik, amely esetben az érzékenység mértékét az áramszolgáltatóval együtt lehet meghatározni. A nagyobb csapadékmennyiség közvetve, ár- vagy belvíz kialakulása által okozhat problémát abban az esetben, ha a meglévő helyi csatornarendszer a lehulló csapadékot nem tudja elvezetni, a fűtőmű környezetében olyanok a terepszint viszonyok, hogy a fűtőmű területén összegyűlő víz nem tud mélyebb területek felé elfolyni, és a fűtőműben olyan berendezések vannak a várható belvízszint alatt, amelyeket az oda folyó víz károsíthat. A belvíz emellett a fűtőmű áramellátását is veszélyeztetheti. Amennyiben a csapadék hó formájában hullik, úgy a szilárd tüzelőanyag kitermelése és beszállítása nehezebbé válhat, továbbá a deresedés az áramellátást is veszélyeztetheti (légkábel esetében). A kidolgozott módszertan alapján mind a kitettségi, mind pedig az érzékenységi paraméterek 0, 1, és 2 értékeket vehetnek fel, ahol a magasabb szám magasabb kitettséget/érzékenységet jelent, a **várható hatás** a kitettség és érzékenységi pontszámok szorzataként alakul.

Az **alkalmazkodóképesség** azon műszaki intézkedések együttese, melyekkel a klímaváltozás miatt várható negatív hatásokat csökkenteni lehet. Értelemszerűen csak ott értelmezhető, ahol az érzékenység is fennáll. A hőségnapok számának növekedése esetében a fűtőmű fontos berendezéseit hűtő alrendszerek felülvizsgálatát és szükség esetén kapacitásának megnövelését jelenti. A szabadtéri építmények (kémények, távközlési antennák) esetében célszerű a berendezések statikai felülvizsgálatát szakcéggel elvégeztetni, és ha szükséges, a megerősítésükről dönteni. A csapadékmennyiség növekedése esetében az alkalmazkodás vízszigeteléssel, belső földkábel cseréjével, az érintett berendezések áthelyezésével valósítható meg. Az egyes klímáparaméterek szempontjából külön-külön értékelt fűtőművi **sérülékenységet** a tanulmány értékelt táblázata úgy számolja ki, hogy a várható hatás értékét az alkalmazkodóképesség értékével arányosan csökkenti.

A **fűtőerőművek és speciális hőtermelő egységek** éghajlati sérülékenységének értékelését a fűtőművekéhez hasonlóan javasolja a módszertan. Megállapítja továbbá, hogy a távhőellátó rendszerek **hőszállító és hőelosztó vezetékrendszerei**, aknáin a klimatikus változásokra nem érzékenyek. Sérülékenységet esetükben egyedül a nagymennyiségű csapadékhullás esetén létrejövő belvíz, vagy fagyveszélyes időszakban a pangó vezetékszakaszok elfagyása okozhat. A módszertan szerint a **hőközpontok** épületen belüli telepítésük miatt a várható klimatikus változásokra nem érzékenyek. Az infrastruktúra-sérülékenység értékelésének támogatásához a feladat keretében excel számoló tábla is készült.

A tanulmány eredménye, hogy a távhő fizikai infrastruktúrája – a fűtőművek, a csővezetékek, a hőközpontok – a mintavizsgálatok szerint kevésbé érzékeny a klímaváltozás közvetlen hatásaira. Az

általános hőmérséklet-emelkedés és a szélsőséges időjárási események a szakszerűen fenntartott fizikai infrastruktúrára nem jelentenek számottevő veszélyt (Geogold Kárpátia Kft. 2019 a).

A NATÉR-2 projektben készült tanulmányok kapcsán összességében fontos megjegyezni, hogy a villamosenergia-ellátás infrastrukturális sérülékenységi oldalát vizsgáló tanulmány bár meghatároz kitétséget jelentő klímáparamétereket és az infrastrukturális elemek érzékenységét is megállapítja (sőt még a várható hatásokról is tesz említést) konkrét sérülékenység-vizsgálati tematikát nem vizsgál végig, viszont a hatásvonalak vizsgálatával kiválóan megalapozza azt. A távhőrendszer sérülékenységi mutatói azt jelzik, hogy az ágazat nagyobb mértékben nem érzékeny, a klímaváltozás hatásai kiküszöbölhetők.

2.6. A "NATÉR továbbfejlesztése" projektben elért eredmények a földtani veszélyforrásokkal és hatásokkal összefüggésben

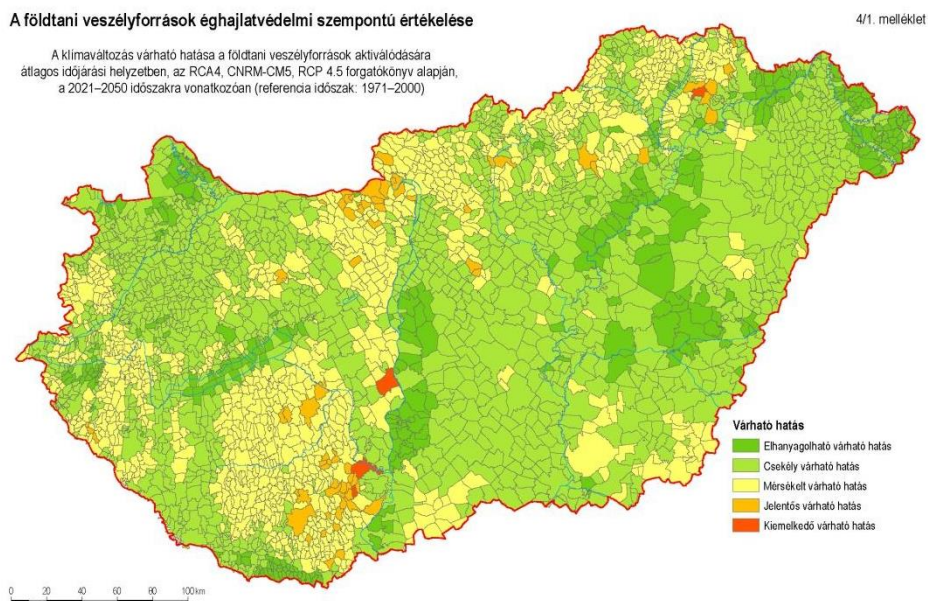
A földtani veszélyforrások vizsgálata némiképp eltér az előző esetektől, hiszen itt nem egy szolgáltatóegység infrastruktúrája kerül elemzésre, hanem egyes természeti jelenségek rendszere a hatásviselő (Tildy et al. 2019). Ebből adódóan a hatásokat meghatározó vizsgálat véghezvitele is mutat nagyobb eltéréseket. Mivel a Magyarországon releváns sekélyföldtani veszélyforrások esetében szinte kizárólag a csapadék időtartam-intenzitás a mérvadó klímáindikátor, így a kidolgozott módszertan szerint a felszínmozgás előfordulásokat – lejtőmozgások, partfalomlások, üregbeszakadások – kizárólag ilyen klímáadatsorokkal kell összevetni. Ez alapján olyan küszöbesemények határozhatók meg, amelyek tipizálhatók földtan, domborzat és kártípus szerint, így az egyes típusok klímáérzékenysége is megbecsülhető az időjárási küszöb jelenségek (a már említett éghajlati forgatókönyvekben szereplő) gyakoriságváltozása alapján.

A felszínmozgási kataszter mintegy 120 évet felölelő adatbázisa olykor hiányos, megbízhatósága változó volt. Főleg a bekövetkezési dátum adatai hiányoztak, illetve az adatok heterogenitása miatt a projekt első szakaszában egy megbízható adatbázis létrehozása volt a cél. A legegységesebb adathalmaz, legalábbis ami statisztikai elemzésre alkalmasnak bizonyult, a 2005-2010 közötti Vis Maior jegyzőkönyvekben található. Ezek alapján egyértelműen megállapítható, hogy a káresemények legnagyobb hányadát a pincebeszakadások adják (45% az összes esetnek). Ezekre magyarázat lehet a használaton kívüli pincék magas száma, valamint az, hogy ezekkel a káreseményekkel hamarabb kezdtek el állami szinten foglalkozni, így az önkormányzatok jobban ismerik az efféle eljárásokat.

A fentiek meghatározásában a Pince és Partfal Bizottság szakértői segítettek, az 1:100000 méretarányú földtani térképen található képződmények osztályozásával, illetve az egyes előfordulásokhoz tartozó lejtőszögek meghatározásával (a globálisan elérhető NASA SRTM programja során készített magassági adatokból). Nem meglepő, hogy a lösszel borított tájakon fedezhető fel a legtöbb felszínmozgásos eset, mivel ilyen területeken a legnagyobb a pincekárok aránya, összhangban a löszbe vájt pincék nagy számával. A káresemények lejtőszögekkel való kapcsolatában egyértelmű korreláció látszik a károk emelkedése és a lejtőszög növekedése között. Amennyiben a gravitáció mellett a víz is szerepet játszik, egy adott felszínmozgás nyomán kisebb lejtőszög mellett is keletkezhet ugyanolyan mértékű kár, mint egy száraz, nagyobb lejtőszögű térszínen.

A kialakított részletes földtani adatbázis alkalmassá vált a csapadékatadatokkal való összevetésre, amelyeknek a CarpatClim-HU adatsor szolgált forrásául. Az adatok értelmezési korlátai abban nyilvánultak meg, hogy azok kizárólag napi értékeket tartalmaznak, míg a felszínmozgás szempontjából releváns küszöb intenzitás érték az 5-6 perc és 1,5 hónap közötti intervallumra esik a szakirodalomban. Mivel hazánkban főleg a hosszabb időtartamú, ún. áztató esőzések lehetnek kiváltó okok, ezért az adatsor így is alkalmazható az összefüggések feltárására. Az elvégzett korrelációs számítások egyértelműen rámutattak arra, hogy a felszínmozgás előfordulások függenek a csapadéktól, azonban a küszöbérték kiválasztására mindez nem elégséges, így annak meghatározására további módszereket kellett alkalmazni. A kumulált maximumok szerint két küszöbérték volt meghatározható: a normál időszakokra 23 mm, az extrém csapadékos időjárás esetében 44 mm.

Az értékelés utolsó lépése a küszöbértékek gyakoriság-vizsgálata volt, amelyhez a NATÉR továbbfejlesztése során az EURO-CORDEX adatbázisban elérhető klímamodellek kerültek kiválasztásra (két modell-kombináció két forgatókönyvre alapozott szimulációja). Az IPCC jelentés forgatókönyveivel együtt összesen 4 szimuláció lett tehát az eredmény. A különböző forgatókönyvek területi pontjaira elkészültek a csapadékösszegek küszöbértéket meghaladó gyakoriságok. Ezeknek lehetővé vált a pontonkénti átlagértékek szerinti vizsgálata az egyes klíma-időablakokban és ezek hányadosaival megadták az adott pontra vonatkozó rövid és hosszú távú gyakoriság-változásokat. A küszöbértékek gyakoriság-változásai több térképtematika által is bemutatásra kerültek: esemény-eloszlás és érzékenység (1-1 db), csapadékos napok eloszlás-gyakorisága és a klímaváltozás várható hatása a felszínmozgások aktiválódására (16-16 db térkép). Az elkészült térképek alapján jól kirajzolódik, hogy a felszínmozgási események döntő többsége a hegy- és dombvidékekhez, valamint a Mezőföld Duna menti löszplatóihoz, magaspartjaihoz köthető. A legnagyobb, ismert (dokumentált) esetszám Dunaújvároshoz kapcsolódik. A figyelembe vett éghajlati forgatókönyvek alapján a csapadékos napok gyakoriságának várható változását 16 térkép szemlélteti (normál és extrém időjárási helyzetre, 2 éghajlati forgatókönyv 2-2 sugárzási küszöbértékére, 2-2 jövőbeli időszakra vonatkozóan). A térképeket vizsgálva az a következtetés vonható le, hogy az extrém időjárási helyzetre vonatkozó előrejelzés szignifikánsabb változásokat jelez negatív irányba, valamint az RCP 4.5 számolt scenárió kedvezőbb képet mutat. Ugyanakkor az eltérő éghajlati forgatókönyvvel készült számítások eredményei között jelentős különbségek fedezhetők fel, különösen az RCP 8.5 forgatókönyv tekintetében (lásd: 5. és 6. ábra).



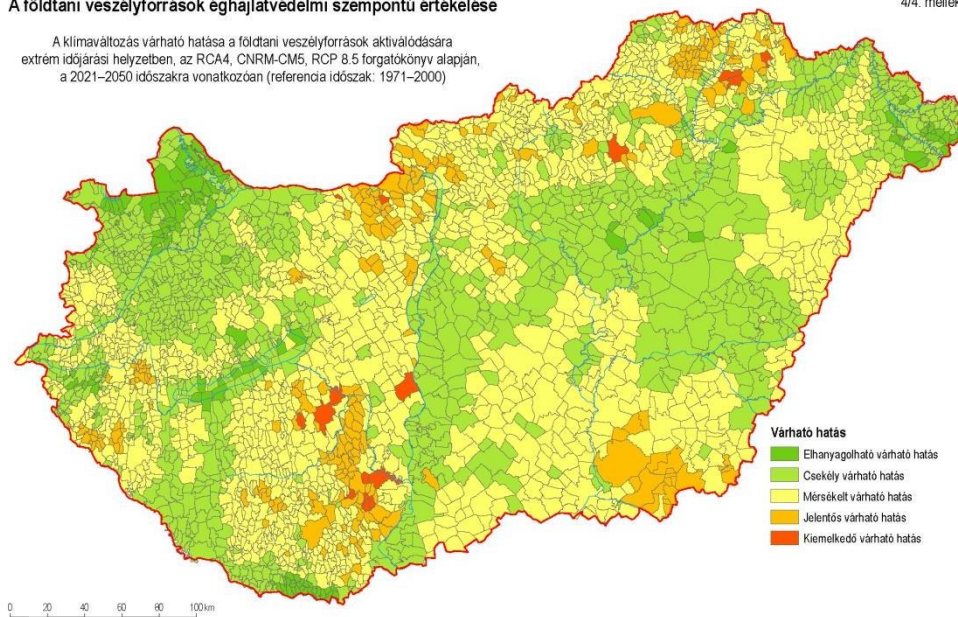
5. ábra A klímaváltozás várható hatása a földtani veszélyforrások aktiválódására átlagos időjárási helyzetben, RCA4, CNRM-CM5, RCP 4.5 forgatókönyv, 2021-2050 időszakra vonatkozóan (referencia időszak: 1977-2000)

Forrás: NATÉR, Tildy et al., 2019

A földtani veszélyforrások éghajlatvédelmi szempontú értékelése

4/4. melléklet

A klímaváltozás várható hatása a földtani veszélyforrások aktiválódására extrém időjárási helyzetben, az RCA4, CNRM-CM5, RCP 8.5 forgatókönyv alapján, a 2021–2050 időszakra vonatkozóan (referencia időszak: 1971–2000)



6. ábra A klímaváltozás várható hatása a földtani veszélyforrások aktiválódására extrém időjárási helyzetben, RCA4, CNRM-CM5, RCP 8.5 forgatókönyv, 2021-2050 időszakra vonatkozóan (referencia időszak: 1977-2000)

Forrás: NATÉR, Tildy et al., 2019

A földtani veszélyforrások vizsgálata alapján elmondható, hogy az elkészített ábrák és az elvégzett hipotézisvizsgálatok nem tekinthetők teljes mértékben megfelelő statisztikai vizsgálatnak a felszínmozgások bekövetkezési adataiból fakadó hiányosságok miatt. A hiányosságok feltárással minőségileg javuló adatbázisban rejlő potenciál és a kutatás eredményei azonban rávilágítanak arra, hogy a téma további és hangsúlyos szakmai vizsgálatra érdemes.

2.7. Nemzetközi szakirodalmi kitekintés

2.7.1. Az energetikai infrastruktúra éghajlati sérülékenysége

Az energetikai rendszerek sérülékenysége nem egy univerzálisan meghatározható fogalom, inkább több oldalról megközelíthető, de indikátorokkal számszerűsíthetővé válik. Korábban az éghajlatváltozást nem tekintették a sérülékenységet jelentősen befolyásoló tényezők között, és elsősorban például az energiafüggőséget, a hazai termelés nagyságát, a gazdasági és ipari tényezőket, a fejlett technológia arányát és az ún. blackoutok¹² kezelését vették ide (Percebois, 2007). Mára azonban világossá vált, hogy a rendszer elemeinek egyik jelentős potenciális sérülékenységi tényezőjét az egyre gyorsuló éghajlatváltozás okozza.

Az energiabiztonsághoz elengedhetetlen az energiatermelés folyamatos, megfelelő és az igényekhez igazított biztosítása. A villamosenergia-ellátás kapacitásváltozása a jövőben a hőség és szárazság együttes előfordulásakor jelentősebb lesz, és a használható kapacitás a legtöbb erőműtípus esetében

¹² A blackoutok (amikor a villamosenergia-rendszer összeomlik és a szolgáltatás kimarad) jellemzően a villamosenergia-szektor esetében fontosak – vagyis mekkora extra kapacitástűrést bír el a rendszer, mekkora más országok szolgáltatásának aránya stb. –, de ugyanígy a blackoutokhoz sorolandók a gáz tárolásából adódó problémák is. Az előbbi közvetlenül kapcsolódik az éghajlatváltozás okozta hatásokhoz, hiszen a szolgáltatás-kimaradást okozhatja időjárási esemény is.

várhatóan inkább csökkenni fog (Bartos és Chester, 2015). A megújuló energiaforrások közül a napenergia használható kapacitása is várhatóan alacsonyabb lesz a nyári hőhullámok gyakoribb válása miatt. Ennek egyik oka a meghibásodások valószínűségének növekedése lehet a termelő és szállító létesítmények esetén. A rendszer éghajlati sérülékenységét tovább erősíti, hogy ez a kapacitáscsökkenés egybeesik azzal az időszakkal, amikor extra energiaigény jelentkezik a hűtésre: a nyári extrém meleg idején és napközben egyrészt csökken a vezetékek maximális terhelhetősége, másrészt nő a napközbeni csúcsterhelés. A csúcsterhelésbeli várható változás ugyan kissé nagyobb, de a két mennyiség összemérhető nagyságú (Bartos et al., 2016). Ezzel párhuzamos, hogy a leghidegebb téli napokon a távhő esetében a legnagyobb igény idején a csövekben keringtetett víz és a külső hőmérséklet közötti különbség okozza a balesetek jelentős részét (Tereshchenko és Nord, 2016). Mindezen rendszerek sérülékenységét tovább növeli, hogy a meglévő infrastruktúra elemei a múltbeli, kevésbé szélsőséges éghajlat alapján lettek megtervezve. Termelési oldalon az éghajlatváltozás tekintetében a leginkább sérülékeny rendszerelemek az erőművek és fűtőművek gőz- és gázturbinái (és azok üzemeltetése például a szén- és atomenergia hőerőművei esetén), ahol az édesvizet technológiai- és hűtővízként használják fel. Ezek a csökkenő nyári vízhozamoktól, a melegedő víz- és léghőmérséklettől jelentősen függenek: a 23 °C feletti vízhőmérséklet és a 25%-kal csökkent vízhozamok együttes előfordulása mellett a 25-50-90%-os kapacitáscsökkenés éves előfordulását számszerűsítették (Vliet et al., 2012).

A teljes energiaszektor részeire ható éghajlati indikátorokat a legátfogóbban az USA egyes területeire a Zamuda et al. (2015), az USA Energiaügyi Minisztériumának jelentése részletezi. Ezek egy része (pl. a hurrikánok gyakoriságának növekedése) hazánkra kevésbé releváns, de a legtöbb hatás nálunk is hasonlóan számszerűsíthető az éghajlati paraméterek segítségével. A villámárvizek gyakoriságának és intenzitásának növekedése, melyek a heves esőzések következtében az erőművek és a szállítórendszerek biztonságát veszélyeztetik (elsősorban a felszín feletti rendszerelemek esetében). Az erősebb szelek/széllelkések, a zivatarok és erdőtüzek szinte minden infrastrukturális elemekben kárt okoznak és jelentősen növelik a távvezetékek szakadásának lehetőségét vagy a tartóoszlopok sérülésének esélyét. Az extrém éjszakai és nappali hőség és a magasabb páratartalom együttes fennállása (Guan et al., 2017), és a tartós hőhullámok ugyanakkor a transzformátorok élettartamának hosszát rövidíthetik meg, valamint, túlterhelési képességeit csökkentik, illetve a vezetékek szakadásának valószínűségét is fokozhatják. ezáltal gyakran áramkimaradást, vagy a szolgáltatás akadályozását eredményezve. A jelentős napi hőingás vagy a gyors, – 3-6 órán belüli – hőmérsékletváltozás pedig a felszín feletti vezetékek élettartamát rövidítik le jelentős mértékben. Ezen felül hasonló, de inkább hosszútávú hatást fejt ki a hőtágulást befolyásoló, éven belüli hőingás is (ez a távhő- és gáz-rendszert is érintheti).

A nemzetközi szakirodalom általában kevésbé koncentrálna a gáz- és távhőrendszerek elemeinek éghajlati sérülékenységére, hiszen a szállítási rendszerelemek itt zömmel a felszín alatt helyezkednek el, de az extrém csapadék és erdő- vagy bozóttűz okozta kettős hatás jelentős károkat tud gázvezetékben is okozni (Moftakhari és AghaKouchak, 2019). A villámok az egyik legnagyobb gáztározói- és elosztói természeti veszélyforrások, melyeket a zivatarok előfordulásának és intenzitásának változásával lehet legjobban számszerűsíteni (Cruz és Krausmann, 2013).

Burillo (2018) a villamos energiára fókuszálva írta össze a szektor infrastruktúráját érintő éghajlati indikátorokat. A növekvő extrém (35 °C feletti) hőmérséklet a vezetékek és a transzformátorok szállítási kapacitáscsökkenését eredményezheti, míg a növekvő intenzitású csapadék a földalatti (elsősorban gáz és távhő) infrastruktúra elárasztását és a villamosenergia-hálózatok tartóoszlopainak erózió általi megrongálódását okozhatja. A földgáz és a távhő esetében további veszélyt jelent a csövek időjárás okozta korróziója (melyet természetesen a talaj fizikai félesége is befolyásol a légnedvesség mellett; Tereshchenko és Nord, 2016). A tapadó hó és jég (az ónos esővel együtt) a tömegük következtében mind a kis- és nagyfeszültségű vezetékek szakadását, megsemmisülését okozhatják. Burillo (2018) szerint a csökkenő csapadéknak nincs nagy jelentősége a villamosenergia-rendszerek infrastrukturális elemeinél, azonban az időjárási szélsőségek (pl. aszály) gyakoriságának, hosszának és

intenzitásának (ún. IDF-görbén jól leolvasható módon szemléltethető) növekedése az elemek jelentős, és azonnal bekövetkező károsodásához vezethet, mely a termelés biztonságát is veszélyezteti.

A fentebb említett éghajlati változók egy része nemcsak a villamosenergia-rendszerekre, hanem a fogyasztásra is hathat (3. táblázat). Ezek zöme csak jelentéktelen hatással bír az igényekre, például a felhőborítottság változásából fakadó világítási igények növekedése vagy csökkenése alig befolyásolja az éghajlati skálán (20-30 éven át) tekintett fogyasztást, illetve a szárazság miatt sem költöznek el jelentős számban a fogyasztók. Ugyanakkor például hőség idején nagymértékben növekszik a magasabb hűtési igény következtében a villamosenergia-fogyasztás is, miközben a vezetékek terhelhetősége is csökken (lásd fentebb).

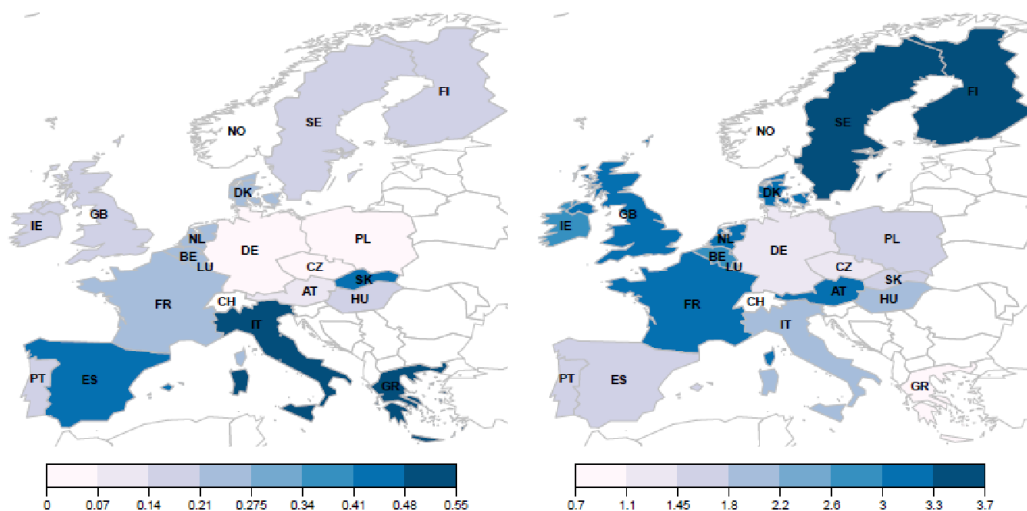
Éghajlati változó	Hatása a villamosenergia-rendszerekre	Hatása a villamosenergia-fogyasztásra
Hőmérséklet	Van	Növekedés a magasabb hűtési igények miatt
Felhőborítottság	Nincs ¹³	Kis változás a világítási igények miatt
Viharok	Távvezeték meghibásodása	Kissé alacsonyabb igény a lakóházak és ipari létesítmények károsodása miatt
Árvizek	Berendezések meghibásodása az elárasztott erőműveknél	Alacsonyabb igény az elárasztott ipari létesítményekben / szünetelő fogyasztás a lakóházakban
Aszály	Távvezeték károsodása az erdőtüzek következtében	Kissé alacsonyabb fogyasztás az ipari létesítmények nyersanyag-hiánya miatt / megszűnt fogyasztás a szárazság miatt elköltözőknél

3. táblázat: A klímaváltozás válogatott hatásai a villamosenergia-rendszerekre és -fogyasztásra

Forrás: Michaelowa et al., 2010

Az energiaszektor általános érzékenységet sokféle mutatóval lehet mérni. *Klein et al. (2013)* egy univerzális, számszerű indikátorcsomagot alkotott, amellyel meghatározható a villamosenergia-szektor EU-n belüli, relatív érzékenysége. Itt a napi átlaghőmérsékleten és a lakosság számon túl elsősorban szektorspecifikus adatokra volt szükség, melyet a szolgáltatók könnyen biztosítani tudtak: áram termelése, exportja, importja és a fogyasztás, illetve kellett még egyéb adat is, pl. a lakossági légkondicionálók aránya (7-8. ábra). Ezen egyszerűbb indikátorokkal számszerűsítve kimutatták, hogy az érzékenység az ő definíciójukat alkalmazva leginkább a klímaváltozás indikátoraitól függ, amik jelen esetben egy jövőbeli évszakos középhőmérséklet-változás és a hűtésre-fűtésre külön számolt, a termelés és fogyasztás napi vagy havi átlaghőmérséklettel vett meredeksége voltak.

¹³ Megjegyzendő, bár a forrásban nem szerepel, hogy a felhőborítottság miatt a naperőművek kieső termelése jelentős hatást gyakorol a rendszerre, mert hagyományos erőművi forrással kell pótolni.



7-8. ábra A légkondicionáló berendezések előre jelzett elterjedése 2030-ra (1 főre jutóan), illetve a 2005 és 2030 közt előre jelzett növekedési arányok (%-ban)

Forrás: Klein et al. 2013

Korábban relatíve kis összeget fordítottak az energiaszektorban a számszerű eredményekre támaszkodó éghajlatváltozási stratégiák készítésére, de mára egyre nagyobb hangsúlyt fektetnek nemzetközi szinten az éghajlati sérülékenységek csökkentésére vagy az abban rejlő lehetőségek kiaknázására. Erre *Audinet et al. (2014)* mutat kiváló esettanulmányokat, hogy az egyes energetikai szereplők (szolgáltatók, energiahivatalok, tanácsadó központok) a világ különböző részein milyen lépéseket tesznek az éghajlatváltozási hatások csökkentésére vagy megelőzésére. Főbb megállapításaik a következők:

- 1) Elengedhetetlen a kutatás és fejlesztés az éghajlati információ pontosítására: azzal például, hogy az éghajlati normált a jelenhez közelebbi időszakra frissítették, az előre jelzett energiaterhelést jelentősen csökkenteni tudta a Hydro-Québec (Kanada) cég, és további stratégiákkal -14%-ról +1-15%-ra növelték a hatékonyságukat.
- 2) Külön kell kezelni a jelenlegi és a jövőbeli éghajlati eseményeket, mert a legtöbb korábbi tanulmány a jelen „éghajlati helyzetből” kiindulva következtet a jövőre, ezzel pedig az éghajlatváltozást nem veszik megfelelően figyelembe (példa erre, hogy a National Grid (Egyesült Királyság) céget 2008-ban törvényileg kötelezték a jövőbeli éghajlatváltozás figyelembevételére).
- 3) Fontos az éghajlati indikátorok és módszertan a szektor szereplőivel való közös kidolgozása: erre példa a CLP Holdings (Kína) cégcsoport Climate Vision 2050 jelentése vagy az Eskom (Dél-Afrika) klímaváltozási stratégiája, ahol éghajlati kutatásokat, esettanulmányokat és kérdőívezést végeztek a felhasználókkal.
- 4) Akad ugyan olyan szolgáltató is, amely nem tekint nagy veszélyként az éghajlatváltozásra (pl. E.ON UK (Egyesült Királyság)), ugyanakkor az számukra is fontos, hogy valamilyen szektorspecifikus és számszerű súlyozást végezzenek a bekövetkező éghajlati hatás valószínűségére és a hatás nagyságára, azaz a sérülékenység mértékét számszerűsítsék.
- 5) Mindezek segítségével az adaptációs költségeket is lehet becsülni, mely a folyamat egy következő lépése. Példaként a Hydro-Tasmania-t (Ausztrália) hozva: 1000 GWh extra termelési kapacitást érhet el 420 millió ausztrál dollár (AUD) adaptációs költséggel vagy olcsóbb technológiai változtatásokkal, 58 millió ausztrál dollárért 300 GWh-A fenti jó példákat megfontolva, és a nemzetközi szakirodalomban elérhető éghajlati indikátorokat hazánk viszonyaira szabva, az adatok és adatbázisok függvényében jelen tanulmányban is számszerűsíteni kívánjuk az energetika szereplőivel közösen a három alszektor infrastrukturális elemeit érintő éghajlati hatásokat és az így jelentkező sérülékenységet.

2.7.2. Az energetikai infrastruktúra földtani sérülékenysége

A projekt keretében megtett szakirodalmi áttekintés alapján látható, hogy valamennyi, általunk most vizsgált energetikai szakág (elektromos, távhő, gáz) érintett a földtani veszélyforrások oldaláról. Ugyanakkor általános sémával leírunk ezek kiterjedését nem lenne szerencsés, hiszen a tárgyi szakágakhoz tartozó infrastruktúra elemek eltérő közegben (felszínen, felszín alatt), térbeli kiterjedéssel (pontoszerűen, vonalasan) és a földtani (természeti) tényezőkhöz eltérő kapcsolódási pontokkal jellemezhetők. E sokféleség miatt szerencsésebbnek tűnik a jellemzőket szükségszerűen egyszerűsítő, egységes kezelés helyett az azok összetettségét jobban hangsúlyozó, rendszerszerű megközelítés.

A kritikus infrastruktúra és a földtani kockázatok

Számos esettanulmány alapján (pl. Yin et al., 2006; Flentje és Chowdhury, 2001; Swiss Re – Johns Hopkins University, 2017; Hervás, 2003; World Bank, 2017) látható, hogy elsősorban a hirtelen, nagy tömegű, illetve jelentősebb földrajzi kiterjedésű mozgások okozzák a legnagyobb károkat. Ezek a földcsuszamlásoktól a földrengésekig széles skálán változhatnak mind a megmozgatott földtömeg, mind a felszabaduló energia szempontjából. Ugyanakkor lényeges látni, hogy míg a földrengések a Föld belső, tektonikai folyamatainak felszíni leképezéseként jelentkeznek, globálisan-regionálisan jól kijelölhető zónák mentén, addig a csuszamlások, omlások nem csak földrengések miatt, hanem a külső erők¹⁴ nyomán is bekövetkeznek. Emiatt utóbbi jelenségcsoport olyan vidékeken – így hazánkban is – okozhatnak problémákat, amelyek szeizmikusan nem különösebben aktívak. A helyzetet az teszi igazán összetetté, hogy a nem földrengés eredetű felszínmozgások egy részét a jelenleg épp dinamikus változáson áteső éghajlatunk generálja, a nagyobb számban bekövetkező extrém csapadék események, s azoknak a földtani közegre gyakorolt hatása révén.

A felszínmozgások, mint klasszikus földtani veszélyforrások mellett megemlítendő a hidrológiai, hidrogeológiai közegben jelentkező kockázati hatások is. Ilyenek az árvizek, illetve a talajvíz agresszivitása, vagy szintjének, kemizmusának tartós változásai is. Előbbiek a jelentős dinamikai hatás révén képesek kárt okozni a létesítményekben (ld.: pl. a World Bank (2017) által hozott Sierra Leone-i felszínmozgás és árvíz esettanulmányát), utóbbiak a pórusnyomás lecsökkenése, vagy épp növekedése nyomán (vö.: Mosonyi és Papp, 1959), illetve korróziós hatások (vö.: Balázs et al., 2017) miatt az építmények statikai problémáiért lehetnek felelősek.

A bevezetően említett sokféleség alapján feltehető, hogy komplex megközelítéssel kerülhetünk közelebb a kritikus infrastruktúra földtani kockázataihoz. Mint azt a Swiss Re – Johns Hopkins University (2017) tanulmánya aláhúzza, egy havária esetében a tartalékként kezelt infrastruktúra is sérülhet, akár elsődlegesen, akár másodlagosan, pl. az elektromos energia-továbbító rendszer elemek kiesése miatt a tartalékerőmű sem tud energiát eljuttatni a környezeti baleset sújtott vidékre. Ez megfordítva azt is jelenti, hogy épp egy havária esemény „zárja be” azt a kapcsolatrendszert az eltérő szakágak infrastruktúra elemei között, amely „békeidőben” nem feltétlenül látható. Tehát valójában nem releváns csupán egyetlen szakág infrastruktúrája földtani sérülékenységének górcső alá vétele, hanem teljes rendszerben szükséges gondolkodnunk. Így Dai et al. (2002) alapján adódik, hogy valamilyen mátrixként próbáljuk meg leképezni ezt a kapcsolatrendszert. Ha ezt elfogadjuk, akkor egyfelől számos tényezőt tudunk egymáshoz viszonyítani, összehasonlítani, másfelől kimutathatóvá válhat az eltérő kritikus infrastruktúra elemek (és eltérő szakágak!) egymás között fennálló kapcsolatrendszere is. Ugyanakkor, ha ezen az úton indulunk el, kulcsfontosságú lesz a megfelelő minőségű és mennyiségű indikátorok, faktorok kiválasztása, s emellett legalább ilyen fontos lesz a

¹⁴ Például: 1) lejtőszög megváltozására fellépő gravitációs hatásra (bemosódás patakok, időszakos vízfolyások mentén, útbevágás), vagy 2) intenzív csapadékot követően az üledék részecskék közötti kohéziót és az üledék nyírószilárdságát csökkentő víz hatására, illetve 3) duzzadó agyagásványos zóna hidratációja és 4) egyéb mechanikus hatásra pl. fagyás-olvadás.

közöttük lévő reláció meghatározása is. Az elsőre csábító megközelítés tényleges bonyolultságát azonban sejteti, hogy a számba veendő indikátorok, faktorok között éppúgy várható technológiai jellegű, mint természeti, vagy társadalmi-gazdasági eredetű, és ezek háttéradatainak rendelkezésre állását valamint objektív összemérhetőségét biztosítani nem egyszerű. Közelebb kerülhetünk a megoldáshoz akkor, ha egy havária eseményt annak okai és következményei szerint tekintjük át. Ám – mint fentebb szó volt róla – egy havária esemény elsődleges károkozása, mint következmény oka lehet egy másodlagos hatásnak, amely dominószzerűen futhat végig egy adott terület energiaellátásán (vö.: Swiss Re – Johns Hopkins University, 2017). Azaz rendszerben (mátrixban) tekintve a kiváltó hatásokat és (negatívan) érintett infrastruktúra elemeket, igen összetett kép tárul a szemünk elé.

A fentiek alapján az általános cél nyilvánvalóan az, hogy csökkenthessük a földtani veszélyforrások okozta kockázatokat, még hozzá racionális költségekkel. Ez történhet a rendszerelemek megerősítésével (pl. korrózióálló építési technológiák alkalmazásával), vagy az ellenállóképesség növelésével (pl. a rendszer újraindíthatóságához szükséges idő lerövidítésével) (Swiss Re–Johns Hopkins University, 2017). A két megközelítés természetesen összefügghet. Mindazonáltal mindkét megközelítés igényel prioritizálást, osztályozást, végső soron mégiscsak valamilyen tipizálást annak érdekében, hogy a teendők pénzügyileg tervezhetők legyenek (vö.: World Bank, 2017). Ide tartozhat az ellátásbiztonsági oldalú osztályozás egy újrainduláskor, vagy a sérült infrastruktúra elemek helyreállíthatóságára vonatkozó kategorizálás alkalmazása.

Konkrét hatások konkrét infrastruktúra elemekre

A jelzett három szakág (elektromos energia, távhő, gáz) esetében – a korábbiakban említettek szerint – nem várható el reálisan, hogy egységes módon tudjuk infrastruktúra elemeik földtani sérülékenységét kezelni. Ugyanakkor, ismerve e három szakág főbb infrastruktúra elemeit, műszaki jellemzőit, körvonalazhatók azok a kölcsönhatások, kölcsönhatás-csoportok, amelyek jellemzően leírhatják egy havária esemény következményeit.

A villamosenergia-ellátás esetében a leginkább sérülékeny infrastruktúra elemek a távvezeték oszlopok, illetve a vezetékek. A földtani veszélyforrások természetesen az oszlopok statikai állapotát befolyásolhatják, ronthatják, sokszor nagy területi kiterjedésben. A Swiss Re (2017) az Egyesült Államok nyugati térségét és Dél-Kanadát vizsgáló tanulmánya arra is felhívja a figyelmet, hogy a villamosenergia-hálózatok nemzetközi összekapcsolása az ellátásbiztonság általános javulása mellett akár a rendszer tágabb regionális sérülékenységét is növelheti oly módon, hogy a rendszer távoli elemeiben bekövetkező üzemzavar hatástávolsága sokkal nagyobb lehet, mint a rendszerek összekapcsolását megelőző állapotban volt. Maguk a hőerőművek is sérülékenyek egy felszínmozgás esetén, de stratégiai jelentőségük miatt a műszaki biztonsági megoldások méretezése vélhetően nagyobb tűrőképességgel is jár egy természeti katasztrófa esetén. Ez általánosságban az eltérő energiahordozóra alapozott valamennyi villamos erőműben igaz lehet, ám vélhetően érdemes az egyedi technológiai, és műszaki biztonsági elemek egyediségét is figyelembe venni. Mindezek ellenére a földtani értelemben pontszerű, ám társadalmi-gazdasági szempontból igen jelentős sérülékenységet feltétlenül vizsgálni kell lokálisan.

A távhő esetében az energia forró víz formájában csővezetéken jut el a termelő erőműtől, hőközponttól a felhasználókig (jellemzően társasházakig, közintézményekig). Mivel ez a típusú szolgáltatás jellemzően lakott területen történik, ezért a vezetékek döntően a földfelszín alatt futnak. Ennek következtében – mint arra Gibson et al. (2005) felhívja a figyelmet – egy felszínmozgás nem fog feltétlenül látható, érzékelhető kárt okozni a vezetékhalózathoz, ám a megjelenő csavaró, húzó, nyomó terhelések nyilvánvalóan csökkentik a vezeték élettartamát, s adott esetben hirtelen változással (töréssel, repedéssel) reagálva kerül a földtani közeghez mért új egyensúlyba. Ezt azt jelenti, hogy a távhővezetékek esetében azok földtani sérülékenysége sok esetben nehezen igazolható a valóságban, mert a tényleges, nyomáseséssel járó repedés, törés bekövetkezéséig a probléma csak a regionális eseménytörténet ismeretében fogható, vagy alkalmasint sejthető meg konkrétan.

A távhővel kapcsolatban még egy földtani tényezőre érdemes felhívni a figyelmet, szintén a hivatkozott, Gibson et al. (2005) tanulmány nyomán. A Nagy-Britanniában lefolytatott kutatás rámutatott az oldható üledékes kőzetek, mint a kritikus infrastruktúra elemeinek befogadó, vagy alapját adó geológiai képződmények sérülékenységére. Ezek különböző sebességű oldódása szintén eredményezhet hirtelen omlásokat, beszakadásokat, amelyek az épp közelben lévő infrastruktúra elemek károsodását okozhatják. Ismerve hazánk geológiai adottságait, e kérdés pl. a Dunántúli-középhegység területén releváns lehet. Megjegyzendő azonban az a másodlagos hatás is, amelyet távhő vezeték szivárgása, törése okozhat. Nevezetesen a földtani közegbe jutó forró víz felgyorsíthatja a befogadó közeg erózióját, nem csak oldás, hanem – laza üledékes kőzetek (homok, kavics, agyag stb.) esetén – kimosódás révén. Amennyiben a nyomásesés nem jelentős rendszerszinten, úgy a szivárgás komoly eróziót okozhat hosszabb távon a felszín alatti közegben, s így ez generálhat felszínmozgást roskadás, omlás, beszakadás formájában. Tehát a következmény okká léphet elő. E speciális eset az infrastruktúra hálózat folyamatos karbantartásával, monitoringjával megelőzhető.

Az erőművekkel kapcsolatosan elmondottak a távfűtő művek esetében is igazak lehetnek. Azaz a legalább regionális szintű stratégiai szerepük miatt a létesítmények műszaki paramétereinek tervezése nyilvánvalóan számol havária helyzettel, és annak passzív, a létesítmény paramétereire támaszkodó kivédésével. Ugyanakkor egy-egy település távhőellátását biztosító erőmű havária miatti kiesése jelentősebb problémának látszik a helyettesíthetőség szempontjából, hiszen tartalékrendszer ebben az esetben nem jellemző.

A gáz szakág infrastruktúra kiemelt elemeit esetünkben a nagytávú és nagynyomású gázvezetékek képviselik, amelyek hasonló módon viselkednek, mint a felszín alatti távhővezetékek. Emiatt sérülékenységük első közelítésben hasonló (v.ö.: Gibson et al., 2005). Ugyanakkor érdemes figyelembe venni, hogy az ország energiaellátásában beöltött, jóval nagyobb stratégiai szerep messze hangsúlyosabbá teszi ugyanezen sérülékenységet, mint a földtani közeg változásaival szemben hasonlóan viselkedő távhővezetékek esetében láttuk. Ez pedig arra világít rá, hogy – mint fentebb szó került róla – a társadalmi-gazdasági faktorok jelentősen befolyásolhatják az adott kritikus infrastruktúra sérülékenységi megítélését. Másként fogalmazva a sérülékenység bár egzakt indikátorokkal, mérőszámokkal jellemezhetővé válhat, ám a társadalmi-gazdasági jelentőség mindezt relativizálhatja.

3. A villamos energia, távhő és földgáz rendszerelemek földtani kitettsége

3.1. A vizsgálatba bevonandó kitettségi indikátorok köre

A földtani kitettségi indikátorok összegyűjtésének fő szempontja azoknak a földtani vonatkozású veszélyforrásoknak a kiválasztása volt, melyekre nézve friss adatbázisok állnak rendelkezésünkre, és paramétereiket közvetlen vagy közvetett módon befolyásolhatja a jelenleg zajló klímaváltozás (pl. hirtelen nagy mennyiségben lezúduló csapadék). Ezen szempontok alapján az alábbi tíz kategóriát különítettük el.

1. *kőzetállékonyság*
2. *talajtani veszélyesség*
3. *veszélyforrás események*
4. *üregbeszakadások*
5. *lejtőgörbület*
6. *lejtőkategória*
7. *mélyfekvésű területek*
8. *talajvíz terep alatti mélysége*
9. *tájsebek*
10. *erózió*

A rendelkezésre álló, az egész ország területén értelmezhető indikátorok tíz kategóriája antropogén, ill. természeti tényezők adatgyűjteménye. Döntően antropogén tényezők közé tartoznak az üregbeszakadások és a tájsebek. A természeti tényezők közül kőzetállékonyság és a talajtani veszélyesség a felszíni, felszín közeli képződmények földtani felépítését mutatják. A lejtőkategória és lejtőgörbület adatok, valamint az eróziós kitettség a felszínpusztulás dinamikájának potenciális lehetőségét és tényleges helyzetét mutatja. A mélyfekvésű területek és a talajvíz terep alatti mélységére vonatkozó adatok a belvízelöntés, ill. a talajvizek okozta korrózió potenciális lehetőségeire utalnak. A veszélyforrás események adatbázisa a lakott területeken és közvetlen környezetükben végbement felszínmozgások helyére, idejére, típusára és gyakoriságára ad információt.

A földtani kitettségi indikátorok fő témakörei

A létesítményeket potenciálisan fenyegető földtani veszélyek nagyon összetett rendszerekből vezethetők le, melyeket a földtani közeg sajátosságain túl a növényzettel való borítottság, topográfiai tényezők, éghajlati hatások, antropogén hatások és a felszín alatti vizek sajátosságai határoznak meg.

A 10 fő tematika lefedi a hazánkban eddig regisztrált különböző tömegmozgás és üregbeszakadás eseményeket, valamint a felszín alatti (természetes és mesterséges) üregrendszereket, az aljzat minőségéből és fizikai tényezőiből fakadó viszonyokat, a topografikus tényezőket, talajeróziót, tájsebek eloszlását és a felszín alatti vizek sajátosságaiból fakadó veszélyeztetettséget.

Az egyes tematikák esetében a kiindulási pont az energetikai infrastruktúrákat érhető veszélyek összegyűjtése, tematizálása és veszélyességi skála felállítása. Ahol szükséges volt,

pufferzónákat határoztunk meg, mely a konkrét veszélyforrást jelentő terület és a nem veszélyes terület között húzódik, meghatározott sávban. Pl. üregbeszakadások esetében az alábányászott területeknél 300 m-es, pincebeszakadásoknál 100 m-es, barlangok esetében 200 m-es pufferzónát jelöltünk ki az üreg felszíni vetülete körül. A tematikák (indikátorok) egyes paramétereinek veszélyességi fokozatainak pontozását relatív skálán értékeljük, ahol az 1-es fokozat jelzi a legkisebb veszélyt (4. táblázat).

3.2 Az egyes földtani kitétségi indikátorok számítási metodikája

1. Kőzetállékonyság:

A kőzetállékonyság területi adatait az 1:100.000-es léptékű EOFT földtani térkép szolgáltatta. A térkép közel 50.000 foltja, 652 geológiai indexe mindegyikéből meghatároztuk a kőzettípust, a földtani kort és a földtani genetikát. Az így előállt nyers adatok fokozatos összevonásával, csoportosításával végül négy földtani korra, 15 kőzetkifejlődésre és 23 földtani genetikára vonatkozó osztály keletkezett.

A képződmények tömörödöttsége, konszolidáltsága összefüggést mutat a korokkal, besorolásuk 3 fő konszolidáltsági kategóriát képez. A kőzetek földtani kora alapján tehát a konszolidáltsági kategóriák növekvő hipotetikus állékonysággal negyedidőszak, harmadidőszak, mezozoikum, paleozoikum. Vagyis a legnagyobb kockázatot a legfiatalabb képződmények jelentik.

A litológiai osztályozás alapján a különböző típusú kőzetek 15 nagy egységét osztottuk 1–8 terjedő állékonysági csoportba. Pl. szerves üledék: legnagyobb kockázat, mélységi kristályos kőzet: legkisebb kockázat.

A képződmények építésföldtani tulajdonságai összefüggést mutatnak a képződési körülményeikkel (pl. tavi-mocsári; eolikus, plutonikus). A 23 genetikai típus alapján 8 relatív állékonysági csoport különíthető el, ahol a példaként szereplő mocsári képződmények magas kockázatot jelenthetnek az infrastruktúrákra, míg a plutonikus eredetű kőzetek a legalacsonyabb kockázati csoportba tartoznak.

2. Talajtani veszélyesség

A kritikus energetikai infrastruktúra elemek talajtani veszélyessége területi becsléséhez az MTA TAKI által létrehozott agrotopográfiai adatbázis „talajtípus” adatsora állt rendelkezésre. Az adatbázis talajtípusai a magyar genetikai talajosztályozás nomenklatúráját vette alapul (Stefanovits, 1999.).

A 31-féle genetikai talajtípusok építésföldtani szempontok alapján három fő csoportra lettek osztva. Például a kőzethatású rendzina talajok infrastruktúrákra potenciálisan kis veszélyt, míg a síklápi (és általában a vízhatású) talajok potenciálisan nagyobb veszélyt jelenthetnek az épített infrastruktúrákra.

3. Veszélyforrás események

A veszélyforrás események adatbázisa az ország területén kb. az elmúlt 120 évben végbement, károkat okozó felszínmozgások — különböző hatóságoknál tárolt — dokumentációira, azok digitalizálására és egységesítésére épül.

27 mozgástípust (pl. kőzetomlás, csuszamlás, kúszás) relatív veszélyeztetettségű fok alapján 6 kategóriába soroltuk. Pl. a kúszás legkisebb veszély, az omlás legnagyobb veszélyt jelentő mozgástípusok.

A ténylegesen lezajlott és dokumentált felszínmozgási folyamatok és környezetük pontosabb kockázati elemzéséhez — jelen projekt keretében — az egyes események 3 szintű földtani tájra, ill. fekü- és fedőkőzetre vonatkozó csoportosítása is megtörtént.

4. Üregrendszerek

A három fő kategóriára osztott indikátorrendszer alapja a pincék, az alábányászott területek és a barlangok előfordulása. A különböző eredetű üregek felszíni vetületeit vettük az infrastruktúrákat esetlegesen fenyegető veszélyforrásnak, valamint kisebb veszélyeztetettségi pontértékkel ezen üregek övezetében pufferzónákat jelöltünk ki.

A mesterséges üregek adatait az MBFSZ által folyamatosan fejlesztett bányáüregekre és pincerendszerekre vonatkozó adatok adták. A barlangok és pufferzónáik adatait a természetvédelmi hatóság által fejlesztett barlangkataszter szolgáltatta.

5. Lejtőgörbület

Az erózió potenciális lehetőségeinek legfontosabb területi adatait a lejtőgörbület, ill. a lejtőszög adatok adják. Úgy a lejtőgörbület, mint a lejtőkategória tényezőinek kiértékelési alapja a 10x10 m-es felbontású DTA-50 domborzatmodell, melyet az MBFSZ folyamatosan fejleszt. A raszteradatokból az egyéb tényezők határfoltjaival összemetszésre alkalmas vektoros térinformatikai adatbázis épült.

A pusztuló, épülő és neutrális lejtőkategóriák közül a neutrális (sík) felületek jelentik a legkisebb veszélyt az infrastruktúrákra, míg a konkáv épülő közepes, és a legnagyobb veszélyt a konvex, vagyis pusztuló lejtő jelentheti.

6. Lejtőkategória

A 0-2°; 2-12.5°; >12.5° feletti lejtők sorrendben három csoportot képeznek, ahol az utolsó, legnagyobb dőlésű lejtők jelentik a legmagasabb kockázati fokozatot.

7. Mélyfekvésű területek

A projektben a mélyfekvésű területekre, valamint a talajvízterep alatti mélységre vonatkozó adatokat az MBFSZ 1:500.000-es léptékű tematikus térképei szolgáltatták.

Belvíz-veszélyeztetettség alapján történt az osztályozás (5 csoport) a felszíni és felszín alatti képződmények vízáteresztő képessége és a talajvíz terep alatti mélysége szerint. A besorolás alapja, hogy minél mélyebben fordul elő a legfelső vízzáró, vízrekesztő réteg egy területen és az minél vékonyabb, annál inkább csökken a belvíz előfordulásának kockázata. A belvíz előfordulása a legkisebb azokon a területeken, ahol a felszín közeli 10 méteres mélységben nem található vízzáró réteg.

8. Talajvíz terep alatti mélysége

Öt csoport került kialakításra a talajvízmélység alapján. A 0-2 m közötti talajvízszint jelenti a legnagyobb veszélyt az infrastruktúrákra, mind a fizikai (állékonyság), mind a kémiai (korrózió) szempontokból.

9. Tájsebek

A tájsebeket a külszíni bányák és a meddőhányók képezik. A kategóriák előfordulása esetleges veszélyforrásként van értelmezve, enyhébb veszélyt jelenthet a körükön vont 200 m-es pufferzóna.

A kiértékelés alapadatait az MBFSZ szolgáltatta. Az egyes foltok a felszíni bányatelkek nyilvántartásából és a rekultivációra vonatkozó adatokból származnak. A helyi jelentőségű anyagkitermelő helyek pontszerű jelet kaptak.

10. Erózió

Az erózió főként a létesítmények alapjainak kimosásában jelenthet veszélyt. Felületi erózió, vonalas erózió, felületi és vonalas erózió együttes előfordulásának területei sorban, növekvő veszélyként lettek értékelve.

A felszíni erózió értékelése 1:100.000-es léptékű, színhelyes színes LANDSAT űrfelvételek manuális kiértékelésén alapul. Az erózió fedvény a felületi leöblítődés 1990-es években tapasztalt országos állapotát mutatja, azzal a megkötéssel, hogy az erősen erdős területek pontossága korlátozott.

Az egyes indikátorok csoportosításait, pontértékeit és részletes értékelését az 1. táblázatban összesítettük.

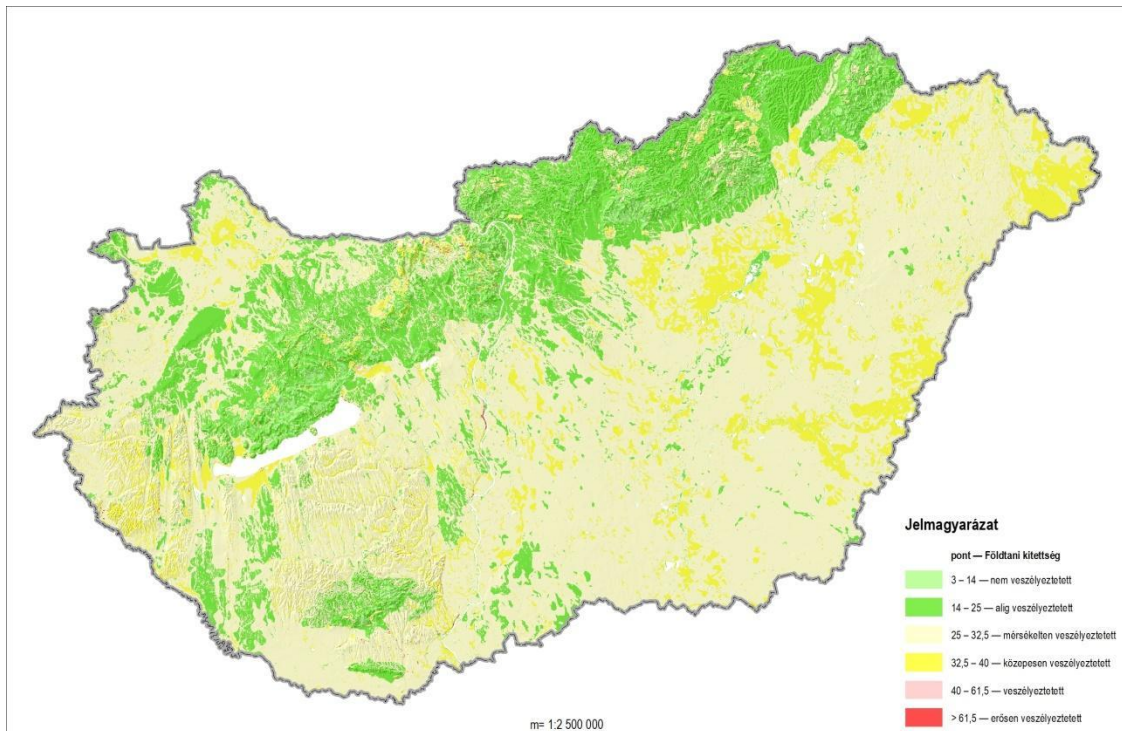
indikátor	adatállomány	súlyozás	pufferzóna	veszélyeztetettség	példa
1. kőzetállékonyság	653 formáció és tagozat, 4 földtani kor (1-3p), 15 kőzettípus (1-8p), 23 genetikai típus (1-8p)	1	nincs	3 csop. 0-6p: nem veszélyeztetett, 7-12p közepesen veszélyeztetett; 13-18p: veszélyeztetett	Mórágy. kor: paleozoikum: 1p, litológia: gránit, monzogranit: 1p; genetika: plutonikus: 1 p. = nem veszélyeztetett
2. talajtani veszélyesség	31-féle genetikai talajtípus, 3 csoport	1	nincs	3 csop. 1p: nem veszélyeztetett; 2p: gyengén veszélyeztetett; 3p: veszélyeztetett	Tárnokréti. síklápi talaj: 3 p, veszélyeztetett
3. veszélyforrás események	27-féle mozgástípus	6	200 m	3 csop. 1-12p: gyenge veszélyeztetettség; 13-24p: közepes veszélyeztetettség; 25-36p: magas veszélyeztetettség; puffer (-1p)	Bp. Gellért-hegy. Kúszás: 6p, gyenge veszélyeztetettség
4. üregrendszerek	pincék, alábányászott területek, barlangok felszíni vetülete	6	pince: 100 m; barlang: 200 m; alábányászott terület: 300 m	2 csop. 6p: pufferzóna, potenciális veszélyeztetettség; 12p: üreg felszíni vetülete, magas veszélyeztetettség	Zobákpusztá. Alábányászott terület: 12 p, magas veszélyeztetettség
5. lejtőgörbület	neutrális, épülő (konkáv), pusztuló (konvex) lejtők	1	nincs	3 csop. 1-3p sorrendben, nem veszélyeztetett-közepes-magas veszélyeztetettség	Békéscsaba. Neutrális felszín, nem veszélyeztetett
6. lejtőkategória	0-2°; 2-12.5°; >12.5°	2	nincs	3 csop. 2-6p sorrendben, kicsi, közepes, magas veszélyeztetettség	Nagyharsány. 6p, veszélyeztetett terület
7. mélyfekvésű területek (belvízveszély)	képződmények vízáteresztő képessége és legfelső vízzáró réteg elh.: Felső 10m	1.5	nincs	5 csop. 1.5-7.5p (legkisebb-kicsi-közepes-nagy-legnagyobb)	Záhony. 4.5p, közepes belvízveszély
8. talajvíz terep alatti mélysége	10-20m; 5-10m, 2-5m; 0-2m	1.5	nincs	4 csop. 1.5-6p (igen gyengén veszélyeztetett-gyengén v.-veszélyeztetett-erősen veszélyeztetett)	Bánréve. 6p. Erősen veszélyeztetett

9. tájsebek	kőbányák, meddőhányók	2	200 m	2 csop. 4p: kőbányák, meddőhányók, veszélyeztetett; 2 p: pufferzóna, potenciálisan veszélyeztetett	Komló, andezit- bánya, 4p. Veszélyeztetett
10. erózió	felületi, vonalas, felületi és vonalas erózió	2	nincs	3 csop. 2p: felületi; 4p: vonalas; 6p: felületi és vonalas erózió. Enyhén veszélyeztetett, veszélyeztetett, erősen veszélyeztetett	Majs. Vonalas erózió, 4p. Veszélyeztetett terület

5. táblázat Földtani kitétségi indikátorok csoportosítása és kategóriái

3.3. Várható eredmények, javaslatok

A tíz részadatbázis térinformatikai feldolgozásával, vagyis az egyes térképi rétegek analitikus foltjai összemetszésével és az egyes foltokhoz tartozó kitétségi értékek összegzésével készült el a szintetizáló GIS állomány, az eredménytérkép. Az egyes területeket érintő földtani indikátorok pontértékeinek összegzése alapján három-osztatú kategóriát képeztünk: (zöld: nem vagy kevésbé veszélyeztetett, sárga: közepesen veszélyeztetett, piros: veszélyeztetett) zóna. Ezen zónák adják a végső értékelés eredményét, a komplex kitétségi térképet, amely a jelzőlámpa-módszer alapján tünteti fel az energetikai infrastruktúraelemek földtani sérülékenységét (9. ábra). A feldolgozás nyomán létrejött kitétségi adatbázis foltjainak összegzett pontértékei 3-83,5 közötti tartományban szóródnak. A 100.000-es léptékű végtérkép kartográfiai megjelenítéséhez több változatban elvégeztük az adatbázis tesztelését. Az adatok tesztelési eredménye azt mutatta, hogy a mechanikus harmadolásos osztályozásnál a tényleges földtani veszélyességi folyamatokat jobban tükrözi a skála magasabb értékek felé történő eltolása. Az így jóváhagyott skála fő határai a 3–25; a 25–40 és a 40–83,5 közötti értéktartományokban húzódnak, melyeket még további két-két csoportra bontottunk. A végtérkép szerkesztése, az adatbázis foltjainak összevonása ezen határok szerint történt.



9. ábra Kritikus energetikai infrastruktúra elemek komplex földtani kitétsége

A 9. ábra adataiból az látszik, hogy a legnagyobb földtani kitétségű területek döntően az antropogén tényezőkhez, ezek pufferzónáihoz, valamint a tényleges felszínmozgásos folyamatokhoz kapcsolódnak. A „sárga öv” magasabb kitétségű, kiemelt tervezési figyelmet, karbantartási figyelmet igénylő részei zömmel a sík- és dombvidéki területek alluviális és tavi-mocsári térszíneivel korrelálnak.

A tíz földtani kitétségi indikátor-típus esetében a rendelkezésünkre álló legfrissebb adatbázisokból dolgoztunk, azonban vannak olyan, a földtani közeghez köthető veszélyforrások is, melyeknek adatbázisa jelenleg nem épült ki, illetve a legújabb kutatások homlokterében vannak. Ilyenek pl. a korróziós adatok országos adatbázisa, ezen belül pedig a biokorrózió, melyekre nézve nagyon fontosnak tartjuk egy országos adatbázis létrehozását, ugyanis több infrastruktúraelemet ért káresemény esetében is kimutatható volt a kémiai és biokorrózió destruktív szerepe. Az említettekén kívül a jövőben a vizsgálatokba érdemesnek tartjuk bevonni a földrengés-veszélyeztetettséget a klimatikus hatásoktól függetlenül. Érdemes azonban annyit megjegyezni, hogy földrengések során, amennyiben az infrastruktúrák alapjait képező közeg nagycsapadékok során víztelítetté válik, annyiban az üledékek és talajok tixotróp viselkedésre hajlamosá válhatnak egy-egy rengés során, és a talajfolyósodás a rengések erősségének és hosszának mértékétől függő károkat okozhat a műtárgyakban.

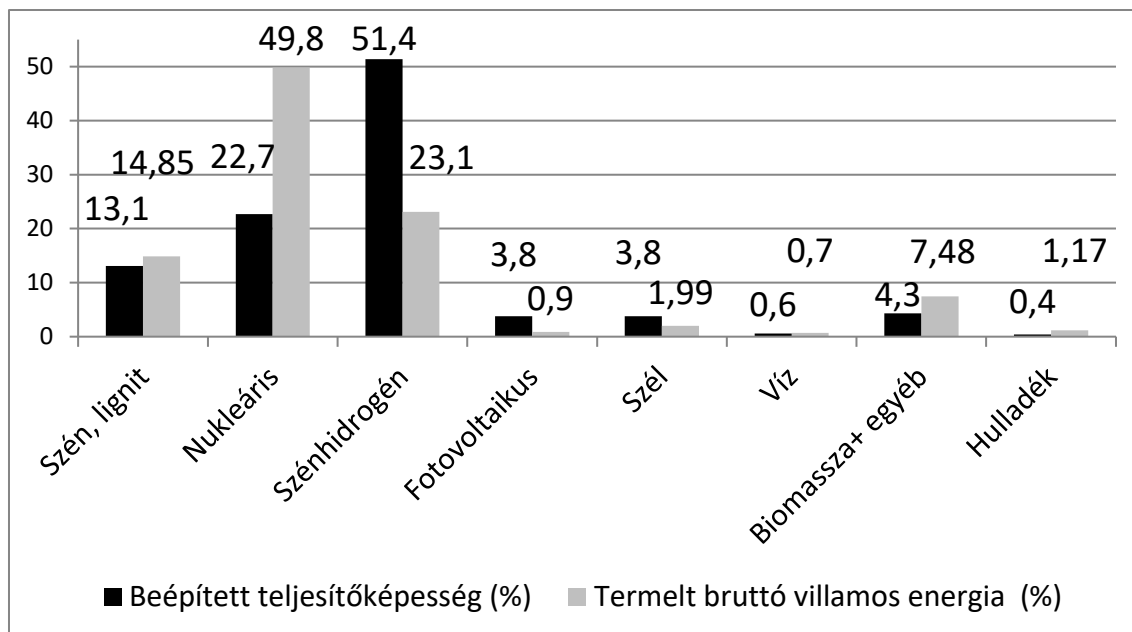
4. A villamosenergia-szektor infrastrukturális sérülékenysége

4.1 Hazai körkép a villamosenergia-szektor fő infrastrukturális rendszereiről és szereplőiről

Az EU-s irányelveknek megfelelően 2020-ban hazánkban is azonosítani kellett azokat a villamosenergia-ágazatban kritikus rendszerelemeket, amelyek folyamatos működése az energiaellátás biztonságának feltétele¹⁵. A hazai villamosenergia-rendszer alapvetően három fő részre bontható: a termelést végző erőművekre, a nagy –akár nemzetközi– távolságú szállítást lehetővé tevő átviteli hálózatra és létesítményeire, valamint a fogyasztók ellátását biztosító elosztókra, villamos hálózataikra és létesítményeikre. A villamosenergia-szektorban fontos a termelés és fogyasztás összehangolása, azaz a rendszer irányítása. Jelen tanulmányban elsősorban a nagyobb területi kiterjedéssel bíró villamos hálózati infrastruktúrára fókuszálunk, de az erőművek sérülékenysége is tanulmányunk részét képezi.

A villamos energiát az erőművek generátorai állítják elő, amelyek teljesítményük szerint lehetnek nagy és kis erőművek – a nem engedélyköteles, 50 kW alatti beépített teljesítőképességű, háztartási méretű kiserőműveket (HMKE)) nem számítva. A megtermelt hazai bruttó villamos energia mennyisége gyengén csökkenő trendet mutat, ugyanakkor a behozott mennyiség növekvőt, így a 2017-es értékhez képest 2018-ban néhány százalékos növekedést láthatunk az import-export mérlegében is. Hazánkban a legalább 50 MW teljesítményű (nagy) erőművet üzemeltető társaságból mindössze 12 volt 2018 végén, mely a bruttó hazai villamosenergia-termelés 84%-áért voltak felelősek, míg a 0,5 és 50 MW közötti teljesítményű, ún. engedélyköteles kiserőművi társaságból 171 volt működésében aktív. Egy másik, az energiát előállító technológiai csoportosítás szerint az erőművek lehetnek gőz- vagy gázturbinás, gázmotoros, kombinált gáz-gőzciklusú erőművek, illetve a megújuló energiaforrásokra vonatkozó technológiát használók (*Balla, 2014*). A felhasznált primer energiaforrás alapján hazánkban megkülönböztethetünk nukleáris anyagot, szénhidrogéneket, szénféleségeket (azon belül lignitet) és a megújulókat felhasználó erőműveket is. Nukleáris energiahordozó adta a hazai bruttó termelés közel 50%-át, míg a szénhidrogének 23%-ot, a szén alapúak 15%-ot tettek ki. Ettől az erőművek beépített teljesítőképesség szerinti megoszlása és annak aránya, több oknál fogva, jelentősen eltér (10. ábra). A megújulókhöz tartozik a biomassza, a nap, a szél, és a víz felhasználása. Nem számítva a Háztartási Méretű Kiserőművek (HMKE) termelését, ezek együttese adta a 2018-as villamosenergia-termelés 10-11%-át (hulladékkal együtt több mint 12%) (*MEKH, MAVIR, 2019*).

¹⁵ Ezt megelőzően már 2014-ben és 2019-ben is történt hasonló azonosítási eljárás.



10. ábra A hazai erőművek beépített teljesítőképességének és a bruttó villamosenergia-termelésének megoszlása energiaforrások szerint 2018

Adatok forrása: MEKH-MAVIR 2019.¹

Üzemük szerint, korábban gyakran használt kategorizálás szerint létezik a folyamatos termelést biztosító alaperőmű, a napon belüli terhelés változásának kiszabályozására használt menetrendtartó erőmű, és a szükség esetén indítható csúcserőmű. Az alaperőmű éves csúskihasználási óraszámja 5500 óra felett van. Hazánk energiatermelésének egyik alaperőműve a Paksi Atomerőmű, mely gazdaságosan termel energiát, de szabályozása csak kis mértékben megoldott – szinte zérus – így nem alkalmas a felhasználói igények változásának figyelembevételére. Ehhez ún. menetrendtartó erőműveket használnak, melyek gazdaságossága alacsonyabb az alaperőművéknél, de rugalmasan tudnak alkalmazkodni az igényekhez. Itthon napjainkban a viszonylag új, nagy teljesítményű és jó hatékonyságú, főleg gázturbinás erőműveket használják erre a célra (például a Gönyű vagy a Százhalombatta GT3 erőművek). Az extrém hideg vagy meleg napokon, vagy a napközben jelentkező csúcscsökkentés időszakában a nagyobb fajlagos költségű és drágább üzemeltetésű csúcserőműveket vesznek igénybe, melyek alkalmasak a fogyasztói extra igények kielégítésére, továbbá az energiapiac nagyobb kilengéseinek és az időjárási hatások okozta nagyobb kapacitáscsökkenés kezelésére. Éppen ezért itt fontos az alacsony beruházási költség és a gyors rendelkezésre állás. Végül vannak az évi néhány száz órát üzemelő, kisebb tartalékerőművek (például a Litéri, Lőrinci, Sajószöged Gázturbinák), amelyek egy nagyerőmű termelő blokkjának hirtelen kiesése (akár időjárási vagy földtani veszély) esetén gyorsan képesek a hiányt pótolni és így a rendszer egyensúlyát fenntartani. A Háztartási Méretű Kiserőművek (HMKE), valamint a nem engedélyköteles erőművek (melyek szintén a kiserőművek kategóriájába tartoznak 500 kW alatt) teljesítőképessége 2011 óta dinamikusan növekszik. A 2018-as év adatai alapján az időjárásfüggő technológiák teljesítőképessége mintegy 660 MW (ebből a lényegében időjárásfüggő energiatermelőkből álló HMKE 334 MW), melynek döntő része (332 MW) fotovoltaikus rendszer. 2019-ben és 2020-ban a HMKE-k beépített teljesítőképessége tovább növekedett 481 majd 721 MW-ra elsősorban a fotovoltaikus rendszerek jelentős növekedése (2019. 479 ill. 2020. 719 MW) miatt. A HMKE és a nagyobb méretű fotovoltaikus erőművek területén tapasztalható növekedés, figyelembe véve a klímavédelmi európai uniós és hazai célkitűzéseket és támogatásokat, várhatóan tartós marad 2030-ig, illetve 2050-ig.

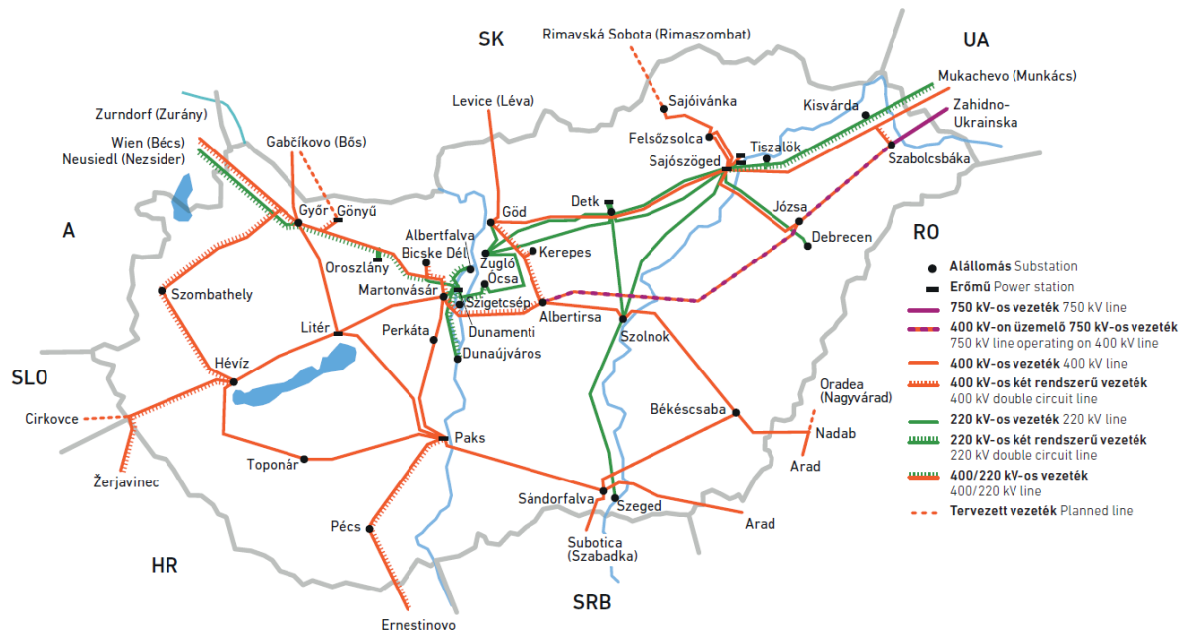
Az erőművektől a felhasználókhöz történő villamosenergia-szállítást az átviteli és az elosztóhálózat látja el. Az átviteli hálózat az egész rendszer fő artériája, mellyel az erőművektől először a nagyobb

transzformátorállomásokig (vagy átviteli hálózati állomásokig) szállítják az áramot, illetve a nemzetközi hálózatba való bekapcsolódást biztosítják, így az import-exportot is ezen keresztül végzik. Feszültsége 220, 400 vagy 750 kV lehet (10. ábra). A hálózat tartóoszlopai általában 25-50 m magasságú, rácsszerkezetű-osztott lábú acéloszlopok. Az oszlopok vasbeton alapozást kapnak, és minden lábnak külön alapteste van. Az oszlopok több vezetékcsoportot tartanak, amelyeket a feszültséghez illeszkedő szigetelőkkel rögzítenek az oszlophoz.

Ezután következik az elosztóhálózat, melyen belül a nagyfeszültségű elosztóhálózat (ma már 132 kV feszültségű) szerepe a kisebb elosztóhálózat és az elosztóhálózat összekapcsolásában van – hozzájuk közvetlenül kapcsolódnak a nagyipari üzemek. Szerkezetei az átviteli hálózatéhoz hasonlóak. A középfeszültségű hálózat (10, 20, 35 kV) a nagyfeszültségű elosztóhálózattal köti össze a középfeszültségű felhasználókat és a fogyasztói transzformátorállomásokat. Tartóoszlopai általában 10-15 m magas, áttört szerkezetű, vagy pörgetett vasbeton oszlopok. A nagyobb terhelésű tartóoszlopok, ún. feszítőoszlopok, melyek rácsszerkezetű acéloszlopok. Az oszlopokon 3 db vezeték fut, ezek egymástól 50-70 cm-es távolságra helyezkednek el. Míg a rendszer alján a kiefeszültségű hálózattal (400 V) a háztartásokat, a közlekedést és a közvilágítást ellátó rendszer helyezkedik el. Tartóoszlopai 7-10 m magas, áttört szerkezetű vasbeton oszlopok és beton gyámmal ellátott faoszlopok, amelyeken általában 4 db vezeték fut az oszlopokon, 20 cm-es távolságra egymástól.

Az átviteli hálózat vezetékossza mintegy 4800 km, a nagyfeszültségű elosztóhálózat nyomvonalhossza 6400 km, míg a közép- és kiefeszültségű rendszeré közel 68 és 88 ezer km.

A hazai villamos hálózat háromnegyede szabadvezetékes rendszerrel van kiépítve – azaz a felszín felett, oszlopra helyezett vezetékeken történik az áramszállítás. Ugyanakkor egyre népszerűbb a kábelvezetékes rendszer kiépítése, mellyel leginkább a föld alatt, szigeteléssel ellátva történik az ellátás, de történhet oszlopokon is szigetelt légvezetéként. A felszín alatti szigetelt kábelvezetékeket közvetlenül a talajban, vagy valamilyen alépítményben helyezik el. Ezeket a vezetékeket árnyékolni, illetve szigetelni kell. Ez az előbbinél jóval drágább technológia, de általa az időjárás hatásoknak sokkal kevésbé lesz kitéve a hálózati infrastruktúra. Lakott területen belül vegyesen használják a két technológiát, de főként a kiefeszültségű hálózat esetén a szigetelt lég- és földkábeles is egyre inkább terjed. A lakott területen kívül a természetvédelmi területek kivételével szinte csak szabadvezetékes rendszert alkalmaznak, de a nagyfeszültségű kábelek esetén egyébként is fizikai okai vannak a kábelvezetéses rendszer kiépítésének. Az elosztóhálózat teljes hossza meghaladja a 161 ezer km-t, melynek 23%-a szabadvezetékes rendszer (amely a kis- és középfeszültségű hálózatban fordul elő; *FICÉP, 2019*). Tehát az átviteli hálózat csupán 17 kilométerén van felszín alatti kábelvezeték, a közép- és kiefeszültségű rendszerekben a felszín alatti kábelvezeték 14 és 23 ezer km-t tesz ki, amely megfelel a teljes vezetékrendszer 20-25%-os arányának.



11. ábra: A hazai villamosenergia-rendszer átviteli hálózata 2019-ben.

Forrás: MEKH-MAVIR (2020)

A rendszer részét képezik azok a berendezések, amelyek a villamos energiát átalakítják, elosztják, a vezetékeket összekötik, illetve kapcsolják és védik a rendszert, azaz a hálózat csomópontjaiban helyezkednek el. Az állomásokat csoportosíthatjuk aszerint, hogy csomópontok biztosításával vezetékeket kapcsol össze a rendszerben, vagy esetleg a feszültségszintet alakítja át különböző feszültségű hálózatok között. Az erőművi állomás feladata, hogy az erőmű által termelt áramot az átviteli- vagy elosztóhálózatban való szállításhoz szükséges feszültségre alakítsák, míg a hálózati állomás regionálisan elhelyezett egységei az átviteli hálózatot kötik össze az elosztóhálózattal. Az átviteli hálózat részének 2018-ban 33 ilyen állomást tekintettünk¹⁶. A fogyasztói állomás feladata, hogy a fogyasztói elosztóhálózatot összekösse a magasabb szintű elosztóhálózattal. A kevesebb felhasználót kiszolgáló körzetekben a fogyasztói transzformátort oszlopon helyezik el.

Az elosztói hálózatok fejlesztését, üzemeltetését, irányítását, karbantartását és a villamos energia elosztását az elosztói engedélyesek végzik¹⁷. Feladataik elosztása földrajzi helyzettől függ, az egyes régiók egy adott elosztói hálózati engedélyeshez tartoznak. Rendszerhasználati díjak fejében feladatuk a villamos energia elosztói hálózaton történő eljuttatása a felhasználók, rendszerhasználók csatlakozási pontjáig, illetve a felhasznált és betáplált villamos energia mérése.

Az átviteli hálózat fenntartója és üzemeltetője a Magyar Villamosenergia-ipari Átviteli Rendszerirányító Zrt. (MAVIR Zrt.). Feladata a villamosenergia-rendszer megbízható és hatékony irányítása. A hálózat felügyeletén túl elvégzi a megfelelő ellátáshoz szükséges fejlesztéseket, felújításokat és karbantartásokat. Az ellátásért felelős piaci szereplők adatokat szolgáltatnak a MAVIR Zrt.-nek, mely összegzésre kerül és a hálózatfejlesztési stratégia elkészítésében segítséget nyújt. Feladatai közé tartozik továbbá a villamosenergia-rendszer összehangolása a szomszédos hálózatokkal, valamint a nemzetközi szakmai együttműködések koordinálása.

A villamosenergia-piac másik fontos szereplője Magyar Energetikai és Közmű-Szabályozási Hivatal (MEKH). Alapvető feladata, hogy a termelői, illetve elosztói engedéllyel rendelkező piaci szereplők

¹⁶ 2020-ban lépett be a 34. Szabolcsbákán, 2021-ben pedig a 35. Bujon a rendszerbe.

¹⁷ 2018-ban összesen 6 elosztó vállalat (NKM Áramhálózati Kft., E.ON Dél-dunántúli Áramhálózati Zrt., E.ON Észak-dunántúli Áramhálózati Zrt., E.ON Tiszántúli Áramhálózati Zrt., ELMŰ Hálózati Kft., ÉMÁSZ Hálózati Kft.), és az elosztókból létrejött 3 egyetemes szolgáltató vett részt az elosztói rendszer irányításában és a termelésen túli, folyamatos működtetésében.

tevékenységét vizsgálja, és felügyelje a vonatkozó szabályozások alapján. A fogyasztóvédelem, továbbá a tájékoztatás és felügyelet mellett egyre nagyobb súlyt kap a versenypiac felügyelete, a verseny elősegítése és tisztaságának megőrzése, annak kikényszerítése, illetve a versenypiaci környezet folyamatos figyelése és szükség esetén változtatása, annak kezdeményezése. A hivatalos statisztikáról szóló törvényben foglaltak szerint a MEKH, szervesen együttműködve a MAVIR Zrt.-vel, az előállított, illetve szolgáltatott adatokat, statisztikákat kiadvány formájában közzé teszi, mely részletesen taglalja az ország energiaigényeit, valamint nemzetközi adatszolgáltatási tevékenységet is végez.

Ami a **közel- és középtávon a legnagyobb kihívást** jelenti a hazai villamosenergia-iparnak, szereplőinek és rendszereinek azok a következő folyamatok:

- a korábban már említett **dekarbonizáció** (például: Európai Zöld Megállapodás, lásd 2.1 fejezet), amelynek révén például az energiahatékonysági intézkedések és az úgynevezett low carbon rendszerek (például megújuló, nukleáris energia) fejlesztése indult meg;
- folyamatosan nő az ügyfelek szakmai tudásának és egyes műszaki megoldásoknak a megértési vágya, amelyhez kapcsolódnak az egyre szélesebb körben terjedő smart rendszerek és megoldások, ezt **demokratizációnak** is nevezhetjük,
- a **decentralizáció**, az elosztott termelés bővülését jelenti, amelyben nagy szerep van és lehet a kis teljesítményű megújuló alapú villamosenergia-termelő rendszereknek és az ezeket támogató megoldásoknak (pl. energiaközösségek). Így viszont csökkenhet a koncentrált, nagy teljesítőképességű rendszerelemek szerepe;
- az **elektrifikáció** sem állt meg, számos fogyasztói és eszközcsoport igényel egyre növekvő mennyiségű villamos energiát (például hűtési, fűtési funkciók és eszközök terjedése);
- kiemelkedő szerepe van a **digitalizációnak** az energetikában (példaként említve az épületenergetikát vagy a rendszerirányítást);
- jellemző folyamat az energiarendszerek „összefonódása”, vagyis az **energiarendszerek konvergenciája**, vagyis például az, hogy a háztartási méretű kiserőművek (HMKE) esetén termelőként és fogyasztóként is jelen van egy-egy háztartás vagy más ügyfél a rendszer szempontjából (MVM közlés).

4.2. A sérülékenység-vizsgálat értelmezési keretei a villamosenergia-infrastruktúra vonatkozásában

A kritikus energetikai infrastruktúrák éghajlati és földtani sérülékenységét vizsgáló projektünk végső célja jelen esetben, hogy a villamosenergia-rendszer infrastruktúrájára vonatkozó sérülékenységet meghatározzuk. A korábban vázolt sérülékenységi keretrendszerünk részeként a várható hatás megadásához először a villamosenergia-rendszer kiterjedését és annak érzékenységét kell külön meghatároznunk. A kiterjedési (K) és az érzékenységi (É) indikátorokat a kiemelt ágazati szereplőkkel (MEKH, MAVIR Zrt., MVM Zrt.) közösen határozzuk meg, de míg a kiterjedési adatokat az MBFSZ NAKFO NATÉR rendszere szolgáltatja, addig az érzékenységi jellemzőket egyértelműen csak a rendszerirányítók tudják megadni, hiszen az a rendszer érzékeny elemeit és azok fizikai paramétereit írja le. A módszertanban továbbmenve, a rendszer alkalmazkodóképességét (A) olyan nem-klimatikus tényezők jelentik, amelyek adaptációs stratégiák bevezetésével a rendszerre ható kedvezőtlen hatások enyhítésére szolgálnak. Ezek általában gazdasági-társadalmi mutatók, amelyeket az ágazati szereplők tudnak a gazdasági-társadalmi fejlettség függvényében megadni, azonban az indikátorok képzése közösen kerül kialakításra. Végül a rendszer sérülékenysége (S) ezek kombinációjának eredménye, mely mindhárom mutatótól függ.

A kitettségi indikátorok tanulmányunkban egyrészt a klímaváltozás hatásait írják le a jelenlegi és a jövőbeli éghajlati változók számszerűsítésével, azaz éghajlati megfigyelések és klímamodellek felhasználásával. Ezen mutatók olyan komplex mérőszámokat tartalmaznak, mint például az extrém hőhullámok (napi átlaghőmérséklet legalább 3 napig 27 °C feletti) 20–50–100 éves visszatérési értékei, az extrém csapadékú napok intenzitása, tartama és gyakorisága, vagy a zivataros napok valószínűségének változása. A rendszer szereplőivel ezután pontosítjuk, hogy mely infrastrukturális elemet (például milyen nagyfeszültségű távvezeték) érint érzékenyen az adott veszély. Ezek mellett a felszínmozgásból adódó és a felszíni és felszín alatti vizekkel összefüggő földtani veszélyforrások is tanulmányunk kitettségi részét képezik. Az éghajlati indikátorokkal ellentétben ezek a jelenlegi talaj- és kőzetféleségtől függenek elsősorban, de az időjárásfüggő (pl. nagycsapadék esetén bekövetkező) földtani veszélyforrások valószínűségére, a talajvízszint változására, a talajvízforgalomra tudunk jövőbeli kitettséget meghatározni. A földtani közeg fizikai–kémiai jellegéből adódó és a vízminőségre vonatkozó kitettséget természetesen csak a jelenlegi értékek alapján adhatjuk meg. A kitettségi indikátorok pontosítása és az érzékeny rendszerelemekre vonatkozó hatásuk alapján való súlyozása ún. hatásláncokon keresztül a villamosenergia-rendszer szereplőivel közösen kerülnek véglegesítésre a következők fejezetekben.

A 374/2020 (VII. 30.) Korm. rendelet szerint az számít kritikus elemnek, amellyel legalább 30 percig nem tartható fenn az ellátásbiztonság. A Black Start szolgáltatást nyújtó elemeket is ide sorolják, amelyek a blackout-ok esetén indítják újra a rendszert. Termelés tekintetében a 200 MW-t elérő névleges teljesítőképességű, illetve a megelőző három évben 1 TWh termelésű erőműveket veszik a kritikus elemek közé. Az átviteli hálózatban bekövetkező, a meghatározott feszültségszinttől való jelentős eltérés legalább 24 óráig tartó fennállása, míg az elosztói hálózatban azok az 1–132 kV közötti elemek tartoznak ide, amelyek 1-2-3 napos kiesése legalább 10-5-2 ezer felhasználót érint. Ezen rendszerelemek közül elsősorban a klímamodellek horizontális felbontása és azok felhasználási korlátai végett a nagyobb, 200 MW-t elérő és éves szinten 1 TWh feletti villamosenergia-termelést végző (például a Mátrai Erőmű, Paksi Atomerőmű) és a Black Start szolgáltatást nyújtó (például Lőrinci, Gönyű, Dunamenti Erőmű) erőművek sérülékenységet elemezzük. Emellett a teljes átviteli hálózat mind a négy nagyfeszültségű (120, 220, 400, 750 kV) vezetékrendszerére vonatkozó sérülékenységet is meghatározzuk a rájuk vonatkozó hatásláncok kifejtésével, azaz az általunk nyújtott kitettségi és a rendszer szereplői által ismert érzékenységi, valamint az alkalmazkodóképességi mutatók összekapcsolásán keresztül. Az érzékenységi információknál kiemelt jelentőségű a rendszerelemek térbeli elhelyezkedése, domborzati viszonyainak ismerete, hiszen tudnunk kell, hogy például az erőmű vagy a nagyfeszültségű vezetékrendszer lejtőn van-e és esetleg nagycsapadékkal jobban érintett terület környékén. Ide sorolandók még az erőművek egyes építési és termelési paraméterei vagy a távvezeteki tartóoszlopok magassága, tájolása, alapozási értékei. Alkalmazkodóképesség alatt olyan gazdasági-társadalmi jellemzőket például stratégiai, tervezési vagy black start újraindítási (vészhelyzeti) információkat értünk, amelyekkel a rendszer éghajlati vagy földtani veszélyforrással szemben sérülékenységét tudjuk csökkenteni. Az elosztói hálózat sérülékenységét annak bonyolult térbeli kiterjedése és túl hosszú vezetékrendszere végett, illetve az éghajlati és földtani veszély esetén kevesebb fogyasztót érintő kiesése végett nem elemezzük, megjegyezzük ugyanakkor, hogy a meghatározott kitettségi paraméterek az elosztók számára is értékes információt adhatnak az elosztórendszert érintő éghajlati hatások becsléséhez.

Célunk tehát, hogy kvantitatív indikátorok formájában a villamosenergia-rendszer szereplőivel közösen határozzuk meg azokat az éghajlati és földtani veszélyeket, amelyek hatással vannak az érzékeny infrastrukturális elemekre, majd hatásláncok felépítésével egy módszertant dolgozzunk ki a sérülékenység számszerűsítésére. A következő fejezetekben ezen módszertant dolgozzuk ki a meghatározott kritikus elemekre.

4.3. A sérülékenység-vizsgálat javasolt módszere

Az elvégzett vizsgálat módszertanilag alapvetően három fő lépésre tagolható: 1.) a CIVAS-modell alapján kialakított logikai keretre, az úgynevezett hatásláncra a vizsgálandó energetikai rendszerre (átviteli hálózat) vonatkozóan, 2.) majd az átadott és számított adatok alapján az egyes kategóriákban kidolgozott dimenzió (mértékegység) nélküli egyedi és aggregált indikátorokra, 3.) és végül a komplex sérülékenységi vagy hatásoldali mutatók képzésére, valamint a továbbfejlesztés lehetőségeinek összegyűjtésére.

4.3.1. A fő hatáslánc bemutatása és értelmezése a villamosenergia-infrastruktúra vonatkozásában és a vonatkozó adatok elérhetősége és alkalmazhatósága

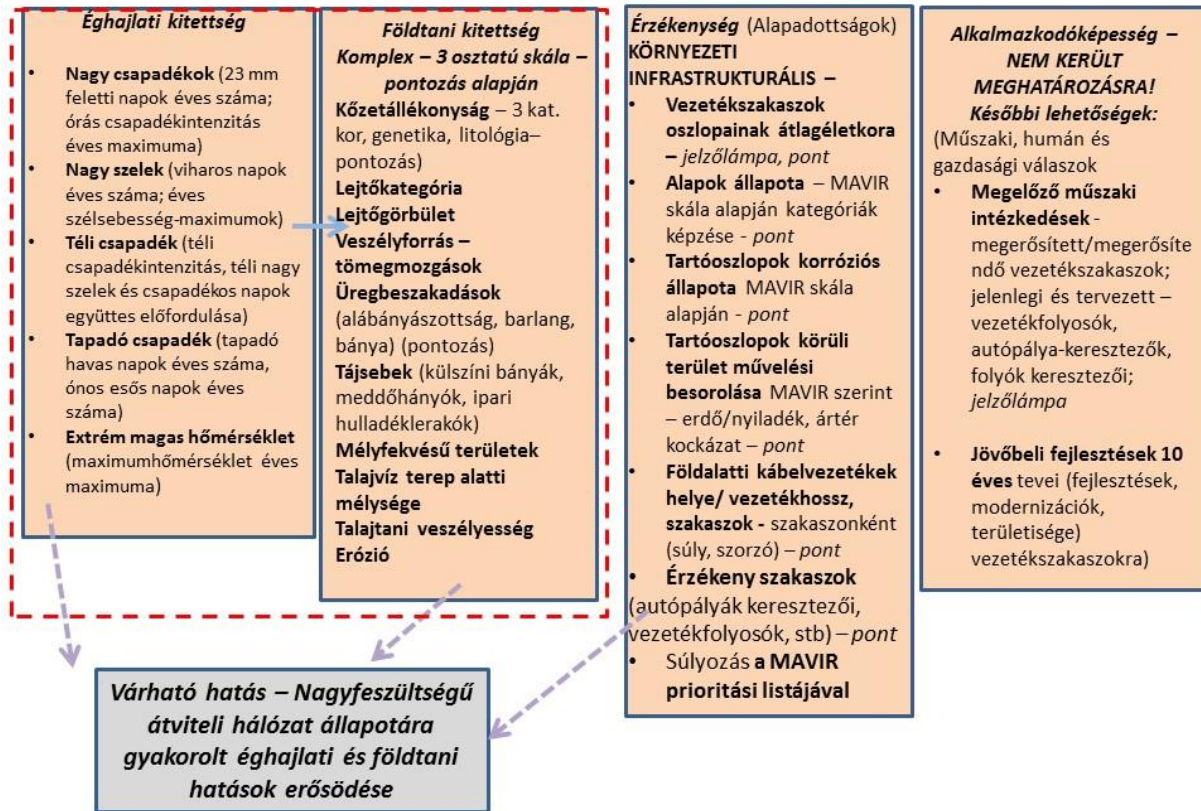
A szakmai partnerekkel két irányban indult el a CIVAS logikai modell (lásd 2.2 fejezet) alapján a hatásláncok kialakítása és több körös tesztelése, bővítése, illetve annak a vizsgálata, hogy milyen adatmennyiség és milyen minőségben, időtávban áll ehhez rendelkezésre.

Egyrészt a hazai koncentráltan elhelyezkedő nagyerművek (50 MW teljesítőképesség feletti főleg hőerőművek és gázturbinák) sérülékenység-vizsgálati lehetőségeit tekintettük át. A szabadon hozzáférhető adatbázisokban is szerepel ezekre vonatkozóan például a tüzelőanyag(ok)ra, vagy beépített teljesítőképességre vonatkozó adat és információ, ám a tervekhez képest (például az érzékenységi vagy alkalmazkodóképességi mutatók képzéséhez) nem állt rendelkezésre elegendő, megfelelő minőségű adat valamennyi erőműre (például modernizációk hatásai, az érzékeny rendszer elemek meglétéhez és súlyozott értékeléséhez szükséges adatok, vagy az erőművi vízellátás/hűtés rendszerjellemzőinek indikátoraihoz).

A másik vizsgálati irány és hatáslánc azonban, köszönhetően a szakmai partnereknek, több körben kialakításra, súlyozásra került, és hozzá megfelelő mennyiségű érzékenységi adat is rendelkezésre állt egy hatásoldali hatáslánc (kitettség és érzékenységi indikátorok képzésével együtt). A hatáslánc az éghajlati és földtani hatásoknak sokrétűen kitett, felszínen elhelyezkedő nagyfeszültségű átviteli hálózat vezetékszakaszaira került kialakításra végül figyelembe véve az éghajlati és földtani kitettségi jellemzőket valamint a sokrétű érzékenységi adatot. A felhasznált érzékenységi alapadatok (például oszlopok alapjainak állapota) a MAVIR Zrt. rendszeres, saját adatgyűjtéséből származnak, ott folyamatosan frissítve rendelkezésre állnak, tőlük, megfelelő engedélyek birtokában, ezek megigényelhetők. Sajnos alkalmazkodóképességi jellemzőket és mutatókat végül nem tudunk képezni, ennek rövid összefoglalása az érzékenységi indikátorok részletes bemutatása után következik.

A kialakított hatáslánc alább látható. Véleményünk szerint jó alap lehet az elosztói hálózatok hasonló hatásoldali jellemzéséhez és értékeléséhez is. Amennyiben hasonló adatgyűjtés és rendszerezés az elosztói hálózatok esetében is történik, és a kapott adatokból kitettségi-, érzékenységi és egyéb indikátorok képezhetők.

AZ ÁTVITELI HÁLÓZAT (vezetékszakaszok) KOMPLEX SÉRÜLÉKENYSÉGE - hatáslánc



12. ábra Az átviteli hálózat (vezetékszakaszok) komplex sérülékenységének hatáslánca

4.3.2. A vizsgálatba bevonandó éghajlati indikátorok köre és a számítási metodika

Az éghajlati veszélyforrások által okozott hatás mára sok gazdasági, ökológiai és társadalmi területen felül jelentőssé vált a villamosenergia-szektorban is. Ezen belül az infrastruktúra legnagyobb és legfontosabb részét kitevő nagyfeszültségű átviteli hálózatra vonatkozóan választottunk ki olyan éghajlati indikátorokat, amelyekre mind valamilyen rácsponthoz megfigyelés, és mind a kétféle jövőbeli (optimista és pesszimista) kibocsátási forgatókönyvre előáll, legalább hat különböző éghajlati modellszimuláció eredményei rendelkezésünkre állnak hazánkra a megfelelő tér- és időbeli felbontáson. Ezen kétszer hattedes együttes már megfelelően tudja reprezentálni a modellek különbözőségéből eredő bizonytalanságot, illetve a kétféle forgatókönyv által az emberi tevékenység jövőbeli alakulásából származó bizonytalanságot is. A következő indikátorokat a nemzetközi szakirodalom korábbi cikkeit is figyelembe véve, majd a hazai villamosenergia-szektor szakembereivel konzultálva, azok együttműködésével közösen választottuk ki. Mindezeket súlyozással is elláttuk, hiszen nem azonos mértékben van hatásuk a nagyfeszültségű átviteli hálózat állapotára.

- 1) **Nagy csapadékok:** Itt két indikátort választottunk ki – a 23 mm feletti csapadékú napok éves számát és az órás csapadékintenzitás éves maximumát, melyből kissé nagyobb súllyal szerepel az utóbbi (1,3) az előbbivel szemben (1), hiszen az átviteli hálózat biztonságát elsősorban a hirtelen árvizek intenzitásának változása, másodsorban pedig azok gyakoriságának növekedése veszélyezteti.

- 2) **Nagy szelek:** A nagyobb szelek szinte minden infrastruktúra-elemet veszélyeztetnek, ezért itt a szelek gyakoriságának növekedésére a viharos napokat választottuk ki (amely a napi szélökés-maximumok 99,6. percentiliséét jelenti), míg az intenzitást az éves szélökés-maximumokkal reprezentáljuk. Utóbbit nagyobb súllyal tekintjük (2), mint az előbbit (1,5).
- 3) **Extrém magas hőmérséklet:** A túl magas hőmérséklet épp a csúcsterhelés időszakában a vezetékek szakadását eredményezheti, illetve a transzformátorok élettartamának csökkenéséhez vezet egy-egy tartós hőhullám során, mely jelentős kapacitáskieséshez is vezethet. Ehhez a maximumhőmérséklet éves maximumát tekintjük egy 1,8-as súllyal.
- 4) **Tapadó csapadék:** A nagyfeszültségű átviteli hálózat jelentős terhelésnek van kitéve a vezetékekhez tapadó csapadék által, mely elsősorban hó vagy ónos eső formájában jelenthet problémát (ez nemcsak télen fordulhat elő, ezért éves számokat veszünk). Tapadó hónapnak tekintjük, amikor 0 °C feletti és alatti maximum- és minimumhőmérséklet mellett havazik, illetve ónos esős napnak azt vesszük, amikor a maximumhőmérséklet 0 °C alatti és eső hullik. Valószínűleg az ónos eső okozza a legnagyobb hatású veszélyt minden közül az átviteli hálózatra, ezért azt 3-as súllyal, míg a tapadó havat 1,4-essel vesszük a számítások során.
- 5) **Téli csapadék:** Az előbbin felül fontosnak tartjuk még a téli csapadékinintenzitást külön tekinteni, illetve a téli csapadékos napok és nagy szelek együttes előfordulását is. Mindkét indexet azokon a napokon nézzük, amikor legalább 1 mm csapadékmennyiség fordul elő, a nagy szelek kritériumát pedig a napi maximális szélökés eloszlásának 95. percentilisééhez kötjük. A csapadékinintenzitást 1-es súllyal, a szeles indikátort 1,2-nek vesszük.

4.3.3. A vizsgálatba bevonandó érzékenységi indikátorok köre és a számítási metodika

Az érzékenység a hatásviselő rendszerek éghajlatfüggő tulajdonsága vagy tulajdonságainak összessége. Az érzékenység mutatók mindig adott éghajlati és földtani kitétségekhez kapcsolódnak, jelen esetben az az átviteli hálózat érzékenysége az előző fejezetben meghatározott kitétség mutatók alapján került megállapításra.

A villamos energia előállítását a különféle nagy- és kiserőművek végzik hazánkban, ahonnan a villamos energia szállítását az átviteli és elosztói villamoshálózatok végzik. A jelen módszertan kiemelt példaként a hazai átviteli hálózat egyes rendszerelemeire vonatkozó érzékenységi indikátorok kialakítását részletezi. A MAVIR Zrt. által üzemeltetett, karbantartott és fejlesztett átviteli hálózati infrastruktúra alapvetően szabadvezetékes kiépítésű, azaz tartóoszlopokon vezetett légvezetékeken történik a villamos energia szállítása. Megjelent viszont a kábelvezeték, amely a földfelszín alatt található, ezáltal kevésbé érzékeny az éghajlati kitétségi tényezőkre a villamosenergia-infrastruktúrái közül. A rendszerelemek sérülékenységi besorolásai, pontozásos és súlyozásos eljárás mentén kerültek beépítésre az érzékenységi vizsgálatba. Az értékelés során összesen 103 db szabadvezetékes és 6 db kábelvezetékes szakaszhoz tartozó adatmennyiség került feldolgozásra a MAVIR Zrt. adatátadásának és szakmai tanácsainak köszönhetően. Azonban a szabadvezetékes szakaszból néhány eset nem került bele a végső értékelésbe a bizonyos tematikák vonatkozásában a nem teljes körűen rendelkezésre álló

adatállomány következtében. A végső besorolás során legkevesebb 1 pontot (nem érzékeny) és maximum 15 pontot (érzékeny) lehetett elérni adott vezetékszakra vonatkoztatva.

A hatásláncokhoz szükséges komplex indikátorok kialakítása előtt a – MAVIR Zrt. által biztosított – nyers adatokból egy egységes adatbázis előállítás volt a cél. Az adatbázis kiépítésének folyamatos ellenőrzése, valamint a szektorban lévő kritikus infrastruktúrákhoz kapcsolódó tematikák megfelelő kiválasztása és súlyozása kiemelt feladat volt mind a kettő fél számára. A képzett indikátorok képzése és számítása is többszörös korrekción ment keresztül az MBFSZ és a MAVIR Zrt. által megtartott közös egyeztetések során.

	Adatállomány	Képzett mutató és módszertan	Érzékenységi pontozás
<i>Kor</i>	a szakaszok egyes oszlopainak a kora	oszlopok korainak az átlaga az adott vezetékszakra	1-3 pont 0-20 év: nem érzékeny (1p) 20-40 év: mérsékelten érzékeny (2p) 40<év: érzékeny (3p)
<i>Oszlopok alapjainak állapota</i>	előzetes állapotbesorolás 6 kategóriába; kategória típusok: (1) Megfelelő (2) Karbonátosodott (3) Sérült betonfesték (4) Porózus (5) Repedezett (6) Sérült	a 6 kategóriába tartozó állapotok százalékos arányszámának súlyozott összege	0-3 pont 100 %: az összes oszlop megfelelő állapotú (0p) 100,1-115 %: nem érzékeny (1p) 115-125 %: mérsékelten érzékeny (2p) 135 %-: érzékeny (3p)
<i>Oszlopok felületeinek az állapota</i>	előzetes állapotbesorolás 5 kategóriába; kategória típusok: (1) Megfelelő (2) Korrózió nyomokban (3) Kezdődő korrózió (4) Kopott, korróziós foltok (5) Erősen korrodált	az 5 kategóriába tartozó állapotok százalékos arányszámának súlyozott összege	0-2 pont 100 %: az összes oszlop megfelelő állapotú (0p) 100,1-135 %: nem érzékeny (1p) 135 %-: mérsékelten érzékeny (2p)
<i>Nyiladék</i>	nyiladékban található oszlopok száma; a vezetékszszakasz feszültség szintje	nyiladéki oszlopok száma a teljes oszlopszámnak legalább az 5%-át elérte; a feszültség szint két részre történő bontása: (120, 220 kV – magas érzékenység); (400, 750 kV – alacsony érzékenység)	1-2 pont 400, 750 kV feszültség szintű szakaszok (1p) (nagyobb védett távolság) 120, 220 kV feszültség szintű szakaszok (2p)

<i>Ártér és hajózható folyók keresztezése</i>	az ártéri oszlopok száma; a hajózható folyót keresztező oszlopközök száma	igen/nem mutató; ha mindkettő egyszerre teljesül a környezetre, akkor ugyanakkora súllyal számoltunk, mint egy esetében	1 pont - ártér (1p) - hajózható folyó keresztezése (1p)
<i>Autópálya keresztezők</i>	az autópályát keresztező oszlopközök száma	az oszlopközök megerősítettségére vonatkozó kategorizálás: megerősített, megerősítendő (1 db), megerősítendő (több),	0-3 pont - nincs autópálya keresztezés (0p) - megerősített (1p) - megerősítendő (1 db) (2p) - megerősítendő (több) (3p)
<i>Vezetékfolyosók (Paks, Mátra, Dél-Budapest, Sajószöged)</i>	vezetékfolyosót alkotó szakaszok	igen/nem mutató; a szakaszt vezetékfolyosó része-e	0-1 pont - igen (1p) - nem (0p)
<i>Kábelhálózat</i>	a földalatti kábelszakasz megléte	igen/nem mutató; jellemez-e egy teljes szakaszt vagy különálló kábelhálózatnak a része	- különálló kábelszakasz (az érzékenységi vizsgálat legalacsonyabb pontja) - szabadvezetékes szakasz egy része („-1” érzékenységi pont az adott szakaszból)
<i>Vezetékszakaszok prioritása</i>	MAVIR Zrt. besorolás	végző számított érték további súlyozása (1-es változatlan, 2-es és 3-as 1,5-szeres szorzó, 4-es kétszeres szorzó, 5-ös érték háromszoros szorzó)	5 osztatú besorolás a MAVIR Zrt. kategorizálása szerint vezetékszakaszonként súlyozási faktorként

6. táblázat Az érzékenységi vizsgálatot alkotó elemek adatállománya, felhasználási módszertana és érzékenységi mértéke.

Magyarországon a hat rövid szakaszból álló földalatti kábelhálózatból két szakasz (Csepel Erőmű – Soroksár I. II. párhuzamos szakaszai) egy szabadvezetékes hálózatnak a része. Az elkülönülő négy szakasz (Kispest Erőmű – Kőbánya, Sajószöged Gázturbina – Sajószöged, Újpest Erőmű – Angyalföld I. II. szakaszai) esetében a legkisebb érzékenységi pontértékkel számoltunk, míg a másik két szabadvezetékes szakaszhoz kapcsolódó kábelvezetékek esetében „-1” értékű érzékenységi pontértéket definiáltunk az egész szakaszra vonatkozóan.

A szabadvezetékes hálózat főbb elemei a tartóoszlopok és a vezetékek. A két elem közül elsősorban a tartóoszlopok minőségének az ellenőrzésére összpontosítottunk¹⁸ az érzékenységi vizsgálat során. Három fő szempont alapján történt meg az oszlopok minőség elemzése:

- Átlagéletkor

¹⁸ A szabadvezetékes hálózat elemeiből a legkevésbé kitett elem a kábelvezeték, valamint nem állt rendelkezésünkre erre vonatkozó állapotfelmérés.

- 1-3 pontig tartó beosztás
 - 0-20 év: nem érzékeny
 - 20-40 év: mérsékelten érzékeny
 - 40<év: érzékeny
- Alapok állapota
 - 0-3 pontig tartó beosztás
 - Hat kategóriába történő besorolás a MAVIR Zrt. felmérései és értékelései alapján
 - 1) Mechanikailag, esztétikailag rendben lévő betonalap.
 - 2) Kémiai folyamatok hatására bekövetkező betonkorrózió.
 - 3) A betonfesték felületvédelem leválik, repedezik.
 - 4) A beton szerkezete mállik, morzsolódik, kipergő kavicsdarabok.
 - 5) Az alapokon repedések jelennek meg időjárási tényezők, vagy esetleges oszloprezgés miatt.
 - 6) Jellemzően mezőgazdasági, illetve emberi beavatkozás következtében történő mechanikai sérülés.

A végső pontérték a hat kategóriába tartozó alapok százalékos arányszámának súlyozott összege alapján került meghatározásra. A súlyozások értékei a kategóriáktól függően eltérő mértékben lettek kialakítva: 1) egyszeres; 2,3,4) kétszeres; 5,6) háromszoros figyelembevétel. Abban az esetben, ha egy szakasz csak az első kategóriába tartozó alapokkal rendelkezik „0” pontértéket kapott. Kiemelendő, hogy a beton napjaink egyik legnépszerűbb és legmegbízhatóbb építési anyagának tekinthető. Ugyanakkor a különböző környezeti hatások (pl. eső, árvíz, fagy, levegőben lévő vegyi anyagok) az idők során sok károsodást okozhatnak a beton szerkezetében, amely a tartósság fokozatos elvesztéséhez vezet.

- Felületvédelem állapota
 - 0-2 pontig tartó beosztás
 - Öt kategóriába történő besorolás a MAVIR Zrt. felmérései és értékelései alapján
 - 1) Mechanikailag és esztétikailag is megfelelő állapot.
 - 2) Viszonylag épp felület, korrózió nyomokban.
 - 3) Kezdődő, pontszerű vagy kisebb kiterjedésű korróziós foltok.
 - 4) Kopott és a korrózió nyomokban.
 - 5) Erősen korrodált felület, nagy kiterjedésű rozsdafoltokkal.

A végső pontérték az öt kategóriába tartozó állapotok százalékos arányszámának súlyozott összege alapján került meghatározásra. A súlyozások értékei a kategóriáktól függően eltérő mértékben lettek kialakítva: 1) egyszeres; 2,3) kétszeres; 4) háromszoros; 5) ötszörös figyelembevétel. Abban az esetben, ha egy szakasz csak az első kategóriába tartozó állapottal rendelkezik „0” pontértéket kapott. Az átviteli hálózat tartóoszlopai kivétel nélkül acéloszlopok, melyek rendkívül ellenállóak a különböző környezeti hatásokkal szemben. A folyamatos – szemmel is észlelhető – műszaki felmérések során egy állandó minőségi állapotjelentéssel rendelkeznek a MAVIR Zrt. munkatársai a felületvédelemmel kapcsolatban. Ennek függvényében és a MAVIR Zrt. ajánlására alacsonyabb súllyal vettük figyelembe a felületi károkat, mint a tartóoszlopok alapjainak az állapotát.

Az aktuális minőség állapoton túl figyelembe vettük az átviteli szabadvezetékes hálózat közvetlen környezetét is. Kiemelt érzékenységűnek számítanak az erdők nyiladékaiban (egyik legkritikusabb) és az árterekben elhelyezkedő tartóoszlopok, valamint az autópálya és a hajózható folyók feletti keresztezők is.

A nyiladékokban futó távvezetékek esetén elkülönített szerepe van az eltérő feszültségű (400, 750 kV illetve 120, 220 kV) távvezetékeknek. Az előbbi feszültség esetében a nagyobb veszélyeztettség miatt nagyobb távolságot és kezelt szelvényt biztosítanak a növényzet és a hálózat között, míg az utóbbi esetében ez a távolság sokkal kisebb. A kisebb távolság, azonban magasabb érzékenységi állapotot jelent megközelítésünk szerint. Emiatt a 400 és 750 kV szakaszok kisebb („1” pont), míg a 120 és 220 kV szakaszok magasabb érzékenységi értékkel („2” pont) lettek figyelembe véve. A távolság, mint fő prioritás elsősorban az extrém viharok esetében a fák a vezetékekre és oszlopokra történő dőléséből eredő komoly sérülékenység miatt lett figyelembe véve. Azonban csak azokat a távvezeték szakaszokat vettük figyelembe, ahol a nyiladékban lévő oszlopok száma a teljes oszlopszámnak legalább az 5%-át elérte.

Az árterek és a hajózható vizek keresztezésének környezeti adottságát egy érzékenységi mutató alá soroltuk be a többi tematikánál kisebb súllyal, hisz ebben a környezeti állapotjellemzőben kivétel nélkül csak megerősített oszlopok biztosítják az energiaszállítást a MAVIR Zrt. tájékoztatása szerint. A jelenlétük „1-1” érzékenységi pontértéket kapott, azonban, ha egy távvezeték szakasznál mindkettő környezeti jellemző egyszerre volt megtalálható, akkor is összesen csak „1” érzékenységi pontértéket vettünk figyelembe.

Az autópálya keresztezések oszlopközeit a megerősítési állapoton alapulva különítettük el:




- 1) Amennyiben a távvezeték szakaszhoz kapcsolódó összes keresztező oszlopköz megerősítése már megtörtént 2020-ig.
 - „1” érzékenységi pontértékkel számoltunk
- 2) A távvezeték szakaszhoz kapcsolódó összes keresztező oszlopköz közül egy oszlopköz még megerősítendő.
 - „2” érzékenységi pontértékkel számoltunk
- 3) A távvezeték szakaszhoz kapcsolódó összes keresztező oszlopköz közül egynél több oszlopköz még megerősítésre vár.
 - „3” érzékenységi pontértékkel számoltunk

Következő tényezőként pedig a legnagyobb energia csomópontok (például nagy erőművek térsége) közvetlen környezetét vizsgáltuk meg. Ebben az esetben a vezetékfolyosók jelenléte adta az érzékenységi indikátort, amelyeknek a megfelelő megerősítése biztosítva van, azonban egy havária következtében elindított károkozás „dominóeffektus-szerű” katasztrófát eredményezhet az egymáshoz közeli elhelyezés miatt. Ezekben a térségekben „1” érzékenységi pontértékkel kalkuláltunk. A vezeték szakaszok komplex besorolása a fenti tematikák összesített pontértékei alapján hármas besorolásba, jelzőlámpa módszerrel történt (2. táblázat).

Mindezeket végül még súlyoztuk a MAVIR Zrt. javaslatára és az általa átadott öt kategóriás vezeték szakaszonkénti prioritási besorolással, amelynek segítségével végül egy háromszatú, érzékenységi (jelzőlámpa) besorolás kialakítására került sor (lásd 7. táblázat). Az alacsony

érzékenységtől vezetékszakaszok 1-es (zöld), a közepesek 2-es (sárga), a magas érzékenységtől piros (3-as) besorolást kaptak.

Kiemelendő, hogy a pontértékek és a besorolások egymáshoz viszonyítva értelmezendők és nem jelenti azt, hogy kritikus vagy súlyosan baleset- vagy haváriaveszélyes lenne egy-egy érzékenyebb szakasz. Ennek garanciája az, hogy a MAVIR Zrt. folyamatosan és szabványok szerint monitorozza a nagyfeszültségű vezetékhálózat tartóoszlopait, sodronyait és a többi rendszerelemét. Ennek köszönhetően folyamatosan a rendszerelemek vagy egyes vezetékszakaszok javítása, cseréje, modernizációja, fejlesztése.

A ponthatárok intervallumai	Érzékenységi besorolás	Jelzőlámpa
3 – 14	1	
15 – 29	2	
30 – 45	3	

7. táblázat Az érzékenységi vizsgálatot kategorizáló ponthatárok tervezett intervallumai.

Alkalmazkodóképességi indikátorok létrehozására többszöri próbálkozás és egyeztetés alapján sem került végül sor. Ennek fő oka az volt, hogy nem állt rendelkezésre az átviteli vezetékszakaszokra vonatkozó, területileg eltérő jellemzőket mutató nagyobb számú alapadat az alkalmazkodóképesség jellemzésére. A későbbiekben javasolható több tematika vizsgálata ilyen célból, például az országhatárok, az autópályák és a személyszállításban kiemelkedő szerepű vasútvonalak keresztező vezetékszakaszainak valamint a vezetékfolyosók vezetékszakaszainak jövőben várható megerősítései. Másik oldalról érdekes lehet a MAVIR Zrt. hálózatfejlesztési terveiben szereplő fejlesztések (például magas hőmérsékletű, kis belógású sodronyok telepítése, bizonyos vezetékszakaszok terhelhetőségének vagy hurkoltságának növelése) vizsgálata, mint alkalmazkodóképességi mutatók alkalmazása.

4.3.4. A várható hatások értékelése (az „egyedi” hatásmutatók számítása), további vizsgálati irány

A várható hatás mutatók az összetartozó kitétségi és érzékenység mutatók külön-külön történő, majd együttes értékelésével állnak elő. Az előbbi elemzés a hatásláncokban rögzített indikátorok számításával majd általános és területi elemzésével, térképezésével különösen fontos. Így az éghajlati kitétségi kétféle forgatókönyv, hatféle modellszimuláció eredménye, ezért ebben az esetben összesen 12 mutató állt elő minden egyes vizsgált éghajlati indikátor esetén. A földtani kitétségi mutatók 10 tematikája 10 különféle indikátor képzését teszi lehetővé, továbbá még egyet az aggregált, dimenzió nélküli földtani kitétségi jelzőlámpa mutatót. Az érzékenység esetén a 9 tematika és létrehozott 10. az aggregált, dimenzió nélküli érzékenységi mutatót alkalmazzuk. A várható hatásmutatók számításánál az összetartozó éghajlati kitétségi, földtani kitétségi és érzékenység mutatók összeszorozására kerül sor, az alábbiak szerint.

$$H_i = \dot{E}_i * \dot{E}K_i * FK_i$$

ahol:

H_i =várható hatás az i-edik vezetékszakasz esetében

\dot{E}_i =érzékenység az i-edik vezetékszakasz esetében

$\dot{E}K_i$ =éghajlati kitétségi az i-edik vezetékszakasz esetében

FK_i =földtani kitétségi az i-edik vezetékszakasz esetében

A későbbiekre a földtani térkép részletességének, méretarányának növelésével, mérnök- illetve településgeológiai szintig javasolható a távvezetési érzékenységek pontozásánál az adatokat oszlop

helyenként figyelembe venni. Ennek feltétele ilyen irányú vizsgálati eredmények, adatok rendelkezésre állása, illetve elvégzése. Emellett felvethető e vizsgálatnál rendelkezésre nem álló témák, mutatók vizsgálata például a földrengés-veszélyeztetettség területi jellemzőinek vizsgálata.

5. A földgáz szektor infrastrukturális sérülékenysége

5.1 Hazai körkép a földgáz szektor fő infrastrukturális rendszereiről és szereplőiről

5.1.1. Általános helyzetkép

A földgázellátásról szóló 2008. évi XL. törvény, a bányászatról szóló 1993. évi XLVIII. törvény és a hozzájuk kapcsolódó végrehajtási rendeletek rendelkezései alapján a szállítási rendszerüzemeltető, a földgáztárolói engedélyesek és a földgázelosztók együttműködő földgázrendszert üzemeltetnek. A meghatározó import beszállítás mellett a forgalmazásra kerülő földgázmennyiség közel negyede hazai termelésből származik (lásd 8. táblázat).

Az 1990-es években 6,4 milliárd m³-ről induló import 2003-as 12,1 milliárd m³ csúcst követően 2015-ig folyamatosan csökkent 6,7 milliárd m³-ig, majd az utóbbi években ismét elérte a 12-13 milliárd m³-t (4. táblázat). A Nemzeti Energiastratégia 2030 szerint a fűtési célú gázfogyasztás 2030-ra évi 2 Mrd m³-rel csökken. Teljes gázfogyasztásunk így várhatóan a jelenlegi évi 10 milliárd m³-ről 2030-ra közel 8,7 milliárd m³-re csökken, 2040-re pedig 6,3 milliárd m³ alá süllyedhet. Megcélózva a klímasemlegességet a földgázfogyasztás 2050-re minimálisra csökkenhet.

ADATOK M m ³ -BEN FIGURES IN Mm ³											
ÉV YEAR	IMPORT (BEREGDARÓC)	TRANZITCELU ÁTVÉTEL RECEIPT FOR TRANSIT (BEREGDARÓC)	IMPORT (MOSDNMAGYARÓVÁR)	IMPORT (CSNÁDPALOTA)	IMPORT (BALASSÁGVÁRMAT)	EXPORT (DRÁVASZERDAHELY)	EXPORT (CSNÁDPALOTA)	EXPORT (KISKUNDOROZSMA)	TRANZITCELU ÁTADÁS DELIVERY FOR TRANSIT (KISKUNDOROZSMA)	EXPORT (BEREGDARÓC)	EXPORT (BALASSÁGVÁRMAT)
1995	6 452,88	987,97	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	988,05	0,00	0,00
1996	8 808,09	2 099,16	120,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2 099,20	0,00	0,00
1997	6 544,54	2 137,96	1 582,63	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2 138,01	0,00	0,00
1998	6 092,93	1 959,03	2 530,23	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1 959,08	0,00	0,00
1999	6 276,28	1 241,67	2 611,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1 241,70	0,00	0,00
2000	6 683,31	1 281,58	2 742,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1 281,69	0,00	0,00
2001	6 694,65	1 690,34	2 547,72	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1 690,48	0,00	0,00
2002	8 059,71	1 820,46	2 655,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1 820,62	0,00	0,00
2003	9 269,40	2 044,10	2 903,26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2 043,93	0,00	0,00
2004	8 848,36	2 525,89	2 821,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2 526,78	0,00	0,00
2005	9 112,69	2 569,68	2 841,90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	2 570,06	0,00	0,00
2006	8 753,29	2 386,15	2 670,49	0,00	0,00	0,00	0,00	5,41	2 386,93	0,00	0,00
2007	7 889,89	2 403,78	2 606,40	0,00	0,00	0,00	0,00	20,94	2 403,72	0,00	0,00
2008	9 417,87	2 427,17	1 985,23	0,00	0,00	0,00	0,00	23,18	2 426,82	0,00	0,00
2009	6 064,23	1 682,82	3 570,93	0,00	0,00	0,00	0,00	85,69	1 684,84	0,00	0,00
2010	5 004,67	1 974,71	4 630,65	0,00	0,00	0,00	49,53	177,91	1 973,24	0,00	0,00
2011	3 605,96	2 194,10	4 413,69	0,00	0,00	63,82	452,75	50,03	2 194,54	0,00	0,00
2012	3 576,44	2 002,22	4 596,57	0,00	0,00	296,14	490,23	49,05	2 001,78	0,00	0,00
2013	4 381,36	1 943,05	3 794,20	0,00	0,00	213,38	122,24	0,00	1 942,52	1 126,80	0,00
2014	4 828,27	1 561,89	4 107,06	0,08	5,91	79,66	60,81	18,90	1 562,19	575,66	4,50
2015	3 991,75	1 847,54	2 773,24	0,00	24,29	29,27	20,09	20,07	1 850,67	455,96	21,93
2016	4 636,48	1 928,19	3 965,40	0,00	15,65	43,95	15,39	0,00	1 928,50	1 008,42	0,09
2017	9 194,91	2 257,72	4 143,49	26,70	2,30	658,57	0,00	77,34	2 257,02	2 784,11	0,00
2018	9 458,10	2 171,23	3 246,94	29,50	9,53	1 271,08	178,90	171,00	2 170,94	3 381,99	0,00

8.táblázat A hazai földgázimport és export hosszú idősoros adatai 1995-2018.

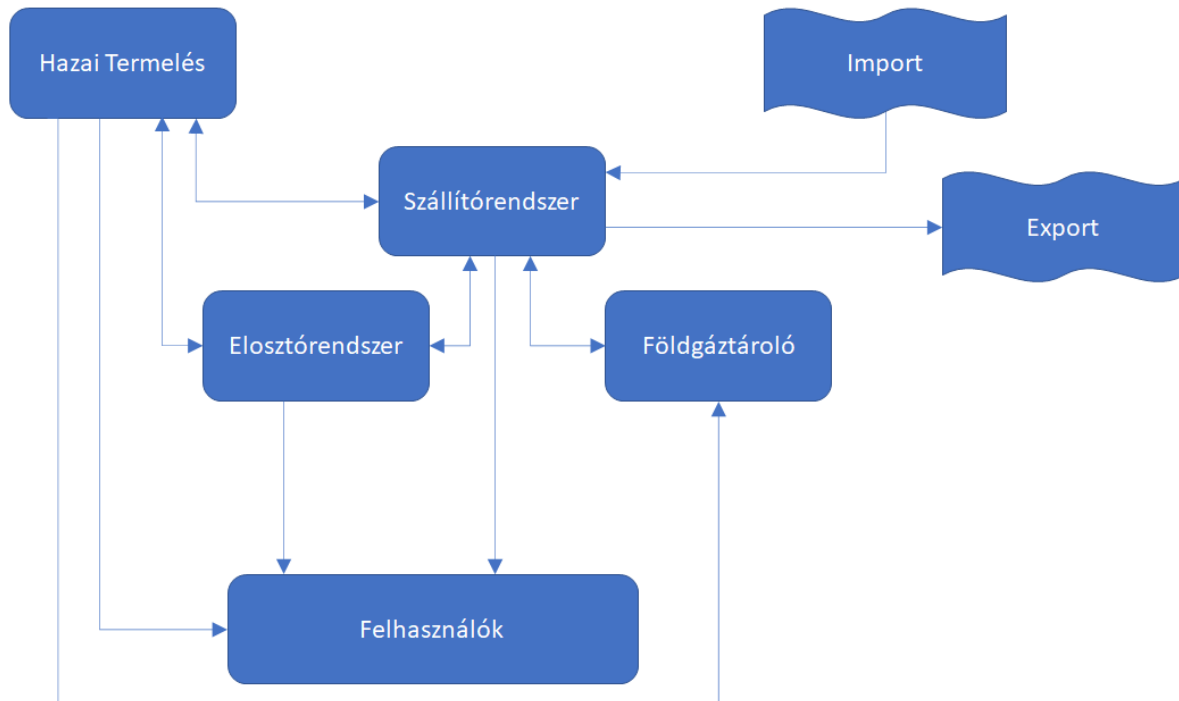
Forrás: FGSZ-MEKH 2019

Az 1990-es évektől a 3,5 – 4 milliárd m³ kitermelés folyamatos csökkenését sikerült megállítani és 1,5 – 2 milliárd m³-re stabilizálni az elmúlt 5 évben.

A lakossági fogyasztás csökkenése is stabilizálódni látszik az elmúlt 5 évben – a 2010-ben még 6,8 milliárd m³ fogyasztás az utóbbi években 4,5 – 5 milliárd m³-re csökkent.

Az ipar gázfogyasztása elsősorban a gazdasági növekedés ütemétől függ - az Innovációs és Technológiai Minisztérium várakozása alapján - 2016-hoz képest 2030-ra 0,5 milliárd m³-rel (2 milliárd m³ fölé)

emelkedhet. Az erőművi szektor földgáz-felhasználása ugyan 2030-ban meghaladhatja a jelenlegi szintet, 2040-re viszont évi 1 milliárd m³ alá süllyedhet. Teljes gázfogyasztásunk így a jelenlegi évi 10 milliárd m³-ről 2030-ra közel 8,7 milliárd m³-re csökken, 2040-re pedig 6,3 milliárd m³ alá süllyedhet (Nemzeti Energiastratégia 2030).



13. ábra A hazai földgázrendszer működési modellje

Forrás: FGSZ-MEKH 2019.

5.1.2. A szállítórendszer

A szállításrendszer-üzemeltetői engedélyes (az FGSZ Földgázszállító Zrt.) egy integrált földgázszállító rendszert működtet Magyarországon, amelynek főbb részei (FGSZ-MEKH 2019 alapján):

- **Betáplálási pontok:**
 - 6 db határkeresztező betáplálási pont (Beregdaróc 1400¹⁹ (UA>HU); Kiskundorozsma 2 (SRB>HU), Mosonmagyaróvár (AT>HU); Drávaszerdahely (CR>HU); Csanádpalota (RO>HU); Balassagyarmat (SK>HU));
 - 16 db hazai termelési betáplálási pont (Algyő III "0" pont; Endrőd "0" pont; Hajdúszoboszló "0" pont; Karcag II (Bucsa) "0" pont; Szank "0" pont; Babócsa "0" pont; Babócsa „Regionális”; Kardoskút „Regionális 6 bar”; Kardoskút „Regionális 15 bar”; Pusztaederics "0" pont; Tiszavasvári II "0" pont; Kenderes II "0" pont, Zsámbok "0" pont; Edde "0" pont; Sáránd "0" pont)
 - 5 db tárolói betáplálási pont (Hajdúszoboszló; Kardoskút; Zsana; Pusztaederics; Algyő)

¹⁹ 2020.05.01-jétől ún. virtuális pont van VIP Bereg (UA>HU) és VIP Bereg (HU>UA) pontokkal.

- **Kiadási pontok:**

- 6 db határkeresztesző kiadási pont [Beregdaróc 800 (HU>UA)²⁰; Drávaszerdahely (HU>CR); Csanádpalota (HU>RO); Kiskundorozsma (HU>RS); Mosonmagyaróvár (HU>AT); Balassagyarmat (HU>SK)];
- 400 gázátadó állomás, amelyből 357 kiadási ponton földgázelosztói engedélyes 24 kiadási ponton ipari felhasználó, 13 kiadási ponton erőművi felhasználó és 4 kiadási ponton termelő kapcsolódik a földgázszállító rendszerhez; 5 db tárolói kiadási pont (Hajdúszoboszló; Kardoskút; Zsana; Pusztaderics; Algyő).
- A **Gázátadó állomások** legfontosabb feladata, hogy ellenőrzött módon, folyamatosan adják át a földgázt a csatlakozó rendszerüzemeltetőknek és a közvetlen szállítóvezetési felhasználóknak. Minden betáplálási és kiadási ponton folyamatosan történik a földgáz mennyiségének mérése és minőségének ellenőrzése.
- A **nagynyomású vezetékrendszer** 5 874 km hosszúságú acélcsővezetékéből áll, amely jellemzően 63 barig (egyes esetekben 75 barig) terjedő nyomás alatt működik.
- A **Kompresszorállomások** feladata, hogy a gáznyomás megemelésével növeljék a rendszer kapacitását, így biztosítva azt, hogy a földgáz megfelelő nyomáson jusson el a csővezetéseken keresztül a felhasználókhoz. A vezetékrendszerbe 8 kompresszorállomás (Beregdaróc, Nemesbikk, Hajdúszoboszló, Városföld, Bába, Mosonmagyaróvár, Szada, Csanádpalota – gázturbina-meghajtású centrifugálkompresszorok) került beépítésre.
- A **Vezetéki csomópontok** a főbb vezetékek kapcsolódási pontjain kerültek kialakításra, amelyek a különböző irányokból érkező eltérő nyomású mennyiségek szétosztását – amennyiben a csomóponton kompresszorállomás is található, akkor a földgáznyomás emelését –, továbbítását szolgálják a kiadási pontok felé.
- A **Rendszerirányító központ** felügyeli és irányítja a rendszer folyamatos és biztonságos üzemeltetését. Az országos rendszerben (3 régió 6 területi központ és egy Siófokon üzemelő országos irányító központ) komplett telemechanikai, távfelügyeleti rendszer működik. A kompresszorállomások, csomópontok és gázátadó állomások helyi intelligens ipari informatikai irányító rendszerek felügyelete alatt üzemelnek. Ezekben a helyi rendszerekben keletkező adatokat el kell juttatni a területi diszpécserközpontokba. Ezt a feladatot az Országos Telemechanikai Rendszer (OTR) végzi el.

A nagynyomású földgázszállító rendszert és kapcsolódási pontjait, valamint az egyes földgázelosztók területi megoszlását a következő ábra tartalmazza (FGSZ-MEKH 2019). (Az MGT Zrt. által üzemeltetett vezeték az FGSZ Zrt. 2019. október 4-től átvette).

²⁰ 2020.05.01-jétől ún. virtuális pont van VIP Bereg (UA>HU) és VIP Bereg (HU>UA) pontokkal



14. ábra A nagynyomású földgázszállító rendszer, kapcsolódási pontjait, valamint az egyes földgázelosztók területi megoszlása Forrás: FGSZ Zrt.

5.1.3. Az elosztórendszer

A földgázelosztási rendszerüzemeltetők²¹ kötelezettsége és kizárólagos joga a földgázelosztási működési engedélyében meghatározott településeken, településrészekben és területeken az üzemeltetésében álló kis-, közép-, nagyközép- és nagynyomású elosztóvezetékek kapacitásának – a jogszabályokban, működési engedélyében, egyéb szabályzatokban rögzítettek alapján – rendelkezésre bocsátása a rendszerhasználók részére és a földgáz elosztása a felhasználók számára.

A földgázelosztói engedélyes az elosztóvezetékeken túl rendelkezik mérő- és adatátviteli rendszerrel, a rendszerüzemeltetők informatikai rendszerével történő adatkommunikációra és a rendszerhasználók felé a jogszabályokban meghatározott adatcserére alkalmas informatikai rendszerrel.

5.1.4. A földgáztárolók

A földgáztárolók fő funkciója, hogy a nyári, alacsonyabb fogyasztási időszakban távvezetéken érkező vásárolt gáznak földalatti gáztárolókba történő besajtolását követően a téli időszakban a földalatti

²¹ Jelenleg Magyarországon 10 társaság rendelkezik engedéllyel: Csepeli Erőmű Kft.; E.ON Dél-dunántúli Gázhálózati Zrt.; E.ON Közép-dunántúli Gázhálózati Zrt.; ISD POWER Kft.; MAGÁZ Kft.; NATURAL GAS SERVICE Kft.; NKM Észak-Dél Földgázhálózati Zrt.; NKM Földgázhálózati Kft.; OERG Kft.; TIGÁZ Zrt. (FGSZ-MEKH, 2019). Továbbá 2020.03.01-jétől működik egy új elosztó, az E.GAS Gázelosztó Kft..

gáztárolókból visszanyert földgázzal a fogyasztási csúcsigények kielégítéséhez hozzájáruljon. Azaz olyan kiegyenlítő funkciója van, amelynek révén optimalizálhatóak a forráskapacitások (alacsonyabbra méretezhetőek a szezonális téli csúcsigényeknél).

Magyarországon a gáztároló létesítmények porózus geológiai szerkezetűek. A legtöbb esetben a tárolókőzet homokkő (Hajdúszoboszló, Pusztaederics, Kardoskút, Szőreg-1), egy kivétellel (Zsana), ahol mészkő. Ezeket a geológiai képződményeket – amelyekből a földgáz kitermelése részben vagy teljesen befejeződött, és megalapozottan igazolódott, hogy földgáz tárolására alkalmasak – átalakították föld alatti gáztárolókká.

Jelenleg két tárolói engedélyes társaság van Magyarországon: a Magyar Földgáztároló Zrt. (Puszaederics, Kardoskút, Hajdúszoboszló és Zsana) kereskedelmi földgáz tároló és a HEXUM Zrt. Földgáztároló²² (Szőreg-1), amely a földgáz biztonsági készletezés mellett kereskedelmi tárolóként is üzemel (9. táblázat).

	Kitárolási kapacitás [millió m ³]	Betárolási kapacitás [millió m ³]	Mobilgáz kapacitás [millió m ³]
Szőreg-1 *	25	12,7	1 900
Zsana	28	17	2 170
Hajdúszoboszló	19,8	10,3	1 640
Puszaederics	2,9	2,5	340
Kardoskút	2,9	2,15	280

*A földgáz biztonsági készlet mértéke 2019. augusztus 1-jétől 1 450 millió m³.

9. táblázat A hazai földalatti földgáztárolók kapacitás adatai ²³:

5.2 A sérülékenység-vizsgálat értelmezési keretei a földgáz infrastruktúra vonatkozásában

Projektünk egyik fő célja, hogy a hazai földgázrendszer infrastruktúrájára vonatkozó sérülékenységet is meghatározzuk. A földgáz létfontosságú hazai infrastruktúrájának jelentős része (például a szállító és az elosztó vezetékhálózat döntő része) a felszín alatt fut. Ennek megfelelő jelentős mértékben védett a klimatikus és időjárási hatásoktól. Nem véletlen, hogy a gázellátásról szóló NATÉR továbbfejlesztése tanulmány (Geogold Kárpátia Kft. 2019 b) módszertani oldalról nem foglalkozott a földgáz infrastruktúra éghajlati sérülékenységével²⁴. Azonban vannak, illetve lehetnek olyan felszíni rendszerelemek (például nyomásfokozók, gázátadó állomások és felvethetőek a rendszerirányító központok), amelyek meglátásunk szerint kitétek többféle közvetlen vagy közvetett éghajlati hatásnak. Ezentúl a projektünkben bizonyos felszín közeli földtani veszélyforrásokkal (például felszínmozgások) is foglalkozni kívántunk, éppen ezért célszerűnek tűnt, hogy a földgázszállítás nagynyomású vezetékszerét is vizsgáljuk részben a közvetlen földtani kitétség és érzékenység oldaláról, valamint annak alkalmazkodóképességéről is gyűjtsünk információkat, adatokat. Erre azért is szükség volt, mert számos esetben az éghajlati hatások (például az extrém csapadékos események

²² 2020.12.01-jétől HEXUM Földgáz Zrt.

²³ forrás: <http://www.magyarfoldgaztarolo.hu/hu-HU/Tevekenysegunk/Gaztarolok>
<https://mmbf.hu/ugyfeleknek/aktualis/kapacitasok>
<https://www.husa.hu/2019/07/31/tajekoztatas-a-foldgaz-biztonsagi-keszlet-mertekenek-megemeleserol/>

²⁴ Fontos az is, hogy földgáz szállító és elosztó rendszerek kiépítettsége számos térségben lehetővé teszi, hogy egy rendszerelem kiesése esetén alternatív útvonalon is eljusson a földgáz a megfelelő pontra, ezzel is növelve annak védettségét vagy más oldalról nézve annak alkalmazkodóképességét.

valószínűségének várható fokozódása) felerősíthetik a felszínen és a felszín alatt elhelyezkedő földgáz rendszerlemek földtani sérülékenységét. Példának említjük a lejtős tömegmozgások közül a csuszamlások vagy a suvadások számának várható növekedését az arra hajlamos térségeinkben (Tildy et al. 2019). Mindezeket figyelembe véve a létfontosságú földgáz alrendszer közül elsősorban a szállítás és a rendszerirányítás rendszerlemeivel kívánunk foglalkozni ebben a fejezetben.

A korábban vázolt sérülékenységi keretrendszerünk (Lásd 2.2 fejezet) részeként a várható hatás megadásához először a rendszer kitettségét és annak érzékenységét kell külön meghatározni. A kitettségi (K) és az érzékenységi (É) indikátorokat a kiemelt ágazati szereplőkkel (FGSZ Zrt., MEKH) közösen határoztuk meg. Míg a kitettségi információkat és adatokat jelentős részben az MBFSZ NATÉR rendszeréből (illetve más MBFSZ adatbázisokból, kutatásokból) az MBFSZ szolgáltatta, addig az érzékenységi jellemzőket főleg a projektpartnerek (például az FGSZ Zrt., mint rendszerüzemeltető és rendszerirányító) tudták megadni, hiszen az a rendszer érzékeny elemeit és azok fizikai paramétereit írja le. A várható hatásokat a két indikátorcsoport kombinációja alapján határoztuk meg. A logikai modell (CIVAS-modell) alapján, a rendszer alkalmazkodóképességét (A) olyan nem-klimatikus például: műszaki, tervezési tényezők, folyamatok jelentik, amelyek adaptációs stratégiák bevezetésével a rendszerre ható kedvezőtlen hatások enyhítésére szolgálnak (például a megelőzés vagy a rendszer karbantartásának eszközei, jellemzői). Ezt szintén az ágazati szereplők tudták a gazdasági-társadalmi fejlettség függvényében megadni, de az indikátorokat itt is közösen hoztuk létre. Végül a rendszer sérülékenysége (S) ezek kombinációjának eredménye, mely mindhárom mutatótól függ.

A kitettségi indikátorok feladata tanulmányunkban a klímaváltozás hatásait leírni a jelenlegi és a jövőbeli éghajlati változók számszerűsítésével, azaz éghajlati megfigyelések és klímamodell szimulációk felhasználásával. Ide olyan komplex mérőszámok tartoznak, mint például a zivatarok (villámveszély) vagy a viharos napok valószínűségének változása vagy a nagy hőmérsékletingadozású napok számának változása. A rendszer szereplőivel ezután pontosítottuk, hogy mely infrastrukturális elemet (például milyen kompresszor- vagy gázátadó állomást) érint érzékenyen az adott veszély. Ezek mellett például földtani jellemzőkből, avagy a felszínmozgásokból adódó és felszín alatti vizekkel összefüggő földtani veszélyforrások is tanulmányunk kitettségi részét képezik (például felszíni kőzetek eltérő állékonysága, a lejtők meredeksége, lejtőszöge vagy a talajvizek eltérő korrozivitása). Az éghajlati indikátorokkal ellentétben ezek a jelenlegi talaj- és kőzetféleségtől függenek elsősorban, de az időjárásfüggő (pl. nagycsapadék esetén bekövetkező) földtani veszélyforrások valószínűségére, a talajvízszint változására tudunk jövőbeli kitettséget meghatározni. A földtani közeg fizikai-kémiai jellegéből adódó és a vízminőségre vonatkozó kitettséget csak a jelenlegi értékek alapján adhattuk meg. A kitettségi indikátorok pontosítása és az érzékeny rendszerrelemekre vonatkozó hatásuk alapján való súlyozása ún. hatásláncokon keresztül a földgázrendszer szereplőivel közösen kerültek véglegesítésre a következő fejezetekben.

Az energetikai létfontosságú rendszerek és létesítmények azonosításáról, kijelöléséről és védelméről szóló 374/2020 (VII. 30.) Korm. rendelet a földgáz infrastruktúra esetén összetett kritériumokat, feltételeket és megközelítéseket alkalmaz. A földgázszállítási rendszerrelem vonatkozásában ilyen feltétel például a téli fogyasztási viszony is - „az utolsó három év átlagos téli fogyasztási viszonyoknak megfelelő mértékű, mérési rendszerrel ellátott gázátadó állomások kiadási ponti lekötött kapacitásnak legfeljebb 85%-a áll rendelkezésre és az adott tevékenység ellátás szempontjából más módon nem pótolható” (Korm.rend 7. § (1) a. pont). A szállítási rendszerirányítás tekintetében a kiesési idő (8 órán túli), a földgáztermelés és a földgáz tárolás esetében a kiesési idő (72 órát elérő) mellett a lekötött kisajtolási kapacitás csökkenésének mértéke (legfeljebb 40%) is a mutató része. A földgázelosztás kritérium követelményeit a rendszerrelem kiesési ideje és a földgázvételezésből kimaradt felhasználók száma határozza meg (24-48 óra kiesés és legalább 10 000 felhasználó; 48-72 óra kiesés és legalább 5 000 felhasználó; 72 órát elérő kiesés és legalább 2 000 felhasználó).

Figyelembe véve, hogy a nemzetközi és hazai szakirodalomban a földgáz infrastruktúra alapvetően nem vizsgált éghajlati és földtani sérülékenység szempontjából annak viszonylagos védettsége miatt,

ezért egy felszín alatti, sekély mélységben elhelyezett infrastruktúra rendszerrel, a nagynyomású szállítói földgázvezetékekkel valamint a főbb, feltételezhetően kevésbé védett felszíni rendszerelemeivel, a kompresszorállomásokkal, a nemzetközi betáplálási és kiadási pontokkal, a gázátadó állomásokkal és a vezetéki csomópontokkal foglalkoztunk részletesebben sérülékenységvizsgálat céljából. Ezekre készítettünk partnereink segítségével és javaslataival többek közt vizsgálati módszereket, hatásláncokat, indikátorokat. A kis-, a közép- és a nagyközépnomású vezetékhalózat sérülékenységét a fenti okokból, valamint a részletesebb adatok nehéz hozzáférhetősége vagy hiánya miatt jelen vizsgálatban külön nem elemeztük. Megjegyezzük ugyanakkor, hogy a meghatározott kitétségi és érzékenységi paraméterek és indikátorok az elosztók számára is értékes információt adhatnak például az elosztórendszert érintő éghajlati és földtani hatások becsléséhez. Nem képezték vizsgálatunk tárgyát a stratégiai és kereskedelmi gáztárolók sem, mivel azok – a nagyobb mélységben való elhelyezkedésük miatt – a felszíni és felszínközeli (például lejtőmozgások) folyamatoktól alapvetően védettnek tekinthetők.

Az érzékenységi információknál kiemelt jelentőségű a rendszerelemek térbeli elhelyezkedése, hiszen tudnunk kell, hogy például egy kompresszorállomás vagy a nagynyomású földgázvezeték esetleg nagycsapadékkal jobban érintett területen található-e, és így esetleg jobban kitett lejtős tömegmozgásoknak (például omlások vagy csuszamlások). Ide sorolandók még az előbb felsorolt földgáz rendszerelemek egyes építési (például alapozás, fektetés mélysége), minőségi (kor, anyag, előállítási- és fektetési technológia) paraméterei vagy a felszíni rendszerelemek tájolása, talajvizekkel összefüggő mutatói. Alkalmazkodóképesség alatt olyan tervezési, beavatkozási információkat értünk, amelyekkel a rendszer éghajlati vagy földtani veszélyforrással szemben sérülékenységét tudjuk csökkenteni.

Célunk a következőkben az volt, hogy először hatásláncok felépítésével egy módszertant dolgozzunk ki a sérülékenység számszerűsítésének megalapozására. Majd az elérhető adatok felhasználásával számszerűsíthető indikátorok formájában a földgázrendszer kiemelt szereplőivel közösen határoztuk meg azokat a főbb éghajlati és földtani veszélyeket, amelyek hatással vannak vagy lehetnek a kiemelt, kritikus infrastruktúrális elemekre. A következő fejezetrészekben ezt a módszertant dolgoztuk ki a meghatározott kritikus elemekre.

5.3. A sérülékenység-vizsgálat javasolt módszere

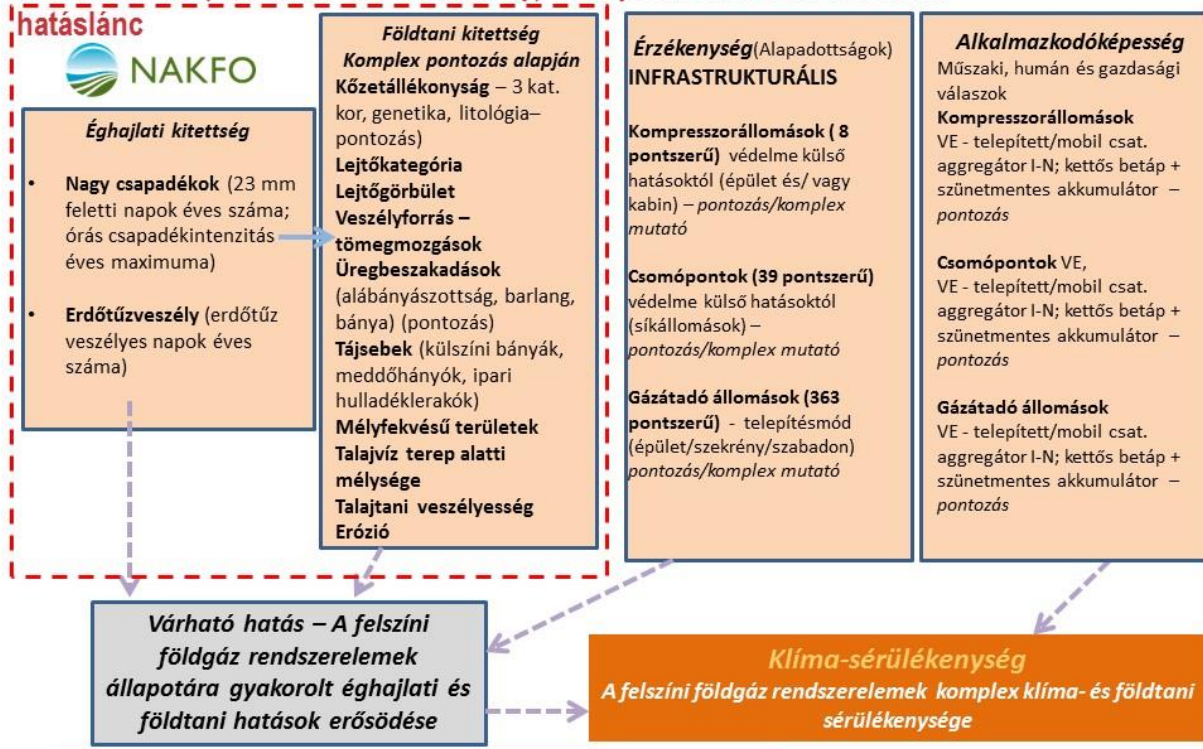
Az elvégzett vizsgálat módszertanilag alapvetően három fő lépésre tagolható: 1.) a CIVAS-modell alapján kialakított logikai keretre, az úgynevezett hatásláncre a vizsgálandó energetikai rendszerre (a nagynyomású földgázhalózat felszíni rendszerelemei) vonatkozóan, 2.) majd az átadott és számított adatok alapján az egyes kategóriákban kidolgozott dimenzió (mértékegység) nélküli egyedi és aggregált indikátorokra, 3.) és végül a komplex sérülékenységi vagy hatásmutatók képzésére, valamint a továbbfejlesztés lehetőségeinek összegyűjtésére.

5.3.1. A fő hatáslánc bemutatása és értelmezése a földgáz infrastruktúra vonatkozásában és a vonatkozó adatok elérhetősége és alkalmazhatósága

A fő vizsgálati irány és hatáslánca, a szakmai partnernek köszönhetően, több körben kialakításra, súlyozásra került, és hozzá megfelelő mennyiségű érzékenységi és alkalmazkodóképességre vonatkozó adat is rendelkezésre állt. A hatáslánc az éghajlati és földtani hatásoknak sokrétűen kitett, a nagynyomású földgázvezeték-rendszer felszíni létesítményeire (kompresszorállomások, gázátadók, hálózati csomópontok) került kialakításra végül figyelembe véve az éghajlati és földtani kitétségi jellemzőket. Ennek alapja egy-egy újonnan képzett érzékenységi és alkalmazkodóképességi adatbázis volt a többféle átadott adatból. A felhasznált érzékenységi alapadatok (például felszíni létesítmények eltérő védettségi jellemzői) az FGSZ Zrt. rendszeres, saját adatgyűjtéséből származnak, ott folyamatosan frissítve rendelkezésre állnak, tőlük, megfelelő engedélyek birtokában, ezek

megigényelhetők. A kialakított hatáslánc alább látható. Véleményünk szerint jó alap lehet az elosztói hálózatok hasonló hatásoldali értékeléséhez is, amennyiben hasonló adatgyűjtés és rendszerezés azok esetében is történik, és az adatok átadhatóak.

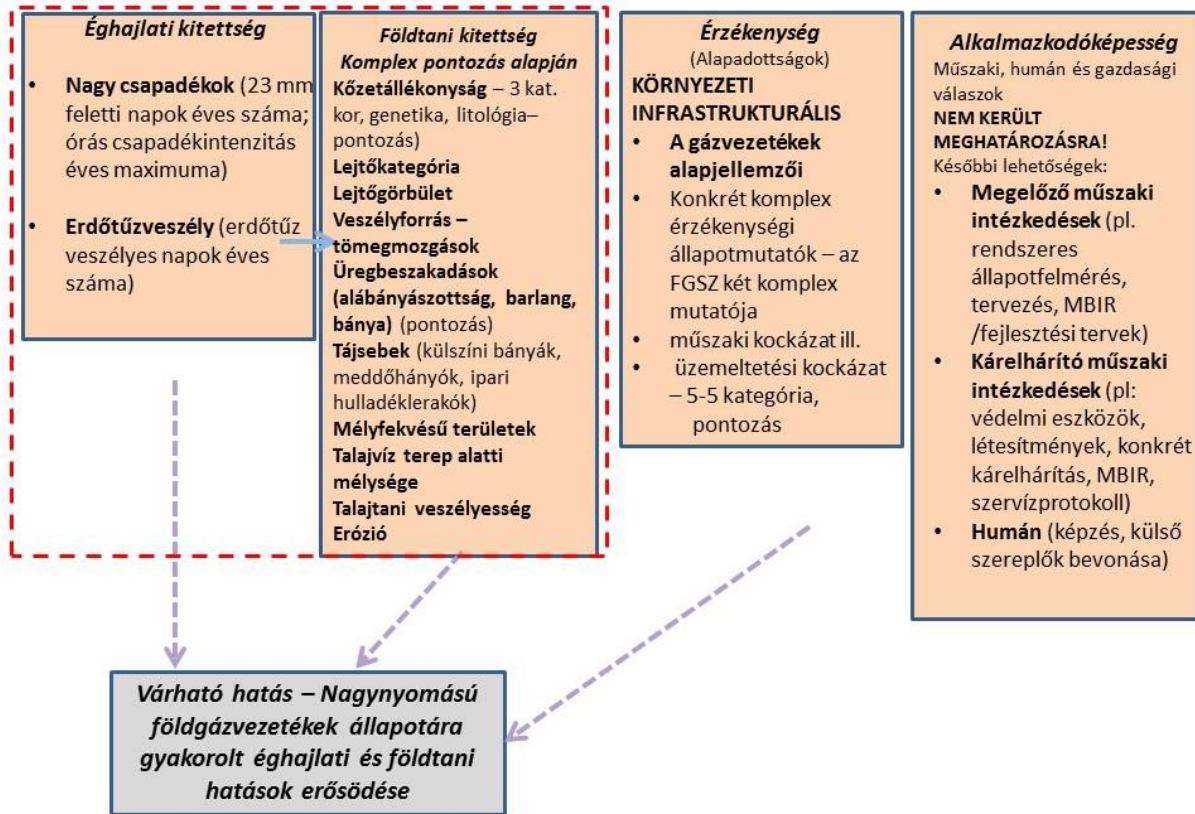
A FELSZÍNI FÖLDGÁZ RENDSZERELEMEK (pl. gáznyomásfokozók, gázátadók, vezetéki csomópontok kb. 400 létesítmény) komplex SÉRÜLÉKENYSÉGE -



15. ábra A felszíni földgáz rendszer elemek komplex sérülékenysége - hatáslánc

A szakmai partnerrel együttműködésben elkészült a nagynyomású földgázvezeték-rendszer hatáslánca is várható hatás szintjéig. A felszín alatt fektetett, nyomásálló acélcövek éghajlati kitettsége jóval alacsonyabb, de nem elhanyagolható, különösen a nagy csapadékok és velük együtt nagyobb valószínűséggel jelentkező felszínmozgások esetén. A rendszeresen vizsgált rendszer elemekre, vezetékszakaszokra érzékenységi oldalról az FGSZ Zrt. két komplex mutatót is előállít és alkalmaz.

A NAGNYOMÁSÚ FÖLDGÁZVEZETÉKEK ÖSSZETETT SÉRÜLÉKENYSÉGÉNEK VIZSGÁLATI MÓDSZERE - hatáslánc



16. ábra A nagynyomású földgázvezeték-rendszerre gyakorolt hatások - hatáslánc

5.3.2. A vizsgálatba bevonandó éghajlati indikátorok köre és a számítási metodika

Az éghajlati veszélyforrások által okozott hatás mára sok gazdasági, ökológiai és társadalmi területen felül jelentőssé vált a földgáz-szektorban is. Ezen belül a felszíni földgáz rendszerelemek (úgy mint gáznyomásfokozók, gázátadók és vezetéki csomópontok) és a nagynyomású földgázvezetékek állapotára várhatóan legnagyobb hatással bíró olyan éghajlati indikátorokat választottunk ki, amelyekre mind valamilyen éghajlati rácspontra megfigyelés, és mind a kétféle jövőbeli (optimista és pesszimista) kibocsátási forgatókönyvre előáll, legalább 6-10 különböző éghajlati modellszimuláció eredményei is rendelkezésünkre állnak hazánkra a megfelelő tér- és időbeli felbontáson. Ezen kétszeres hat- vagy akár tíztagú együttes már megfelelően tudja reprezentálni a modellek különbözőségéből eredő bizonytalanságot, illetve a kétféle forgatókönyv által az emberi tevékenység jövőbeli alakulásából származó bizonytalanságot is. A következő néhány indikátort a nemzetközi szakirodalom korábbi cikkeit is figyelembe véve, majd a hazai földgáz-szektor szakembereivel konzultálva, azok együttműködésével közösen választottuk ki. A villamosenergia-szektornál jóval kevesebb számú indexet tekintettünk mindkét csoportra, hiszen a földgáz-szektorban kisebb méretű kitértsegről és az időjárási szélsőségek által kevésbé érintett infrastruktúrális elemekről van szó. Mindezeket súlyozással is elláttuk, hiszen az indikátoroknak nem azonos mértékben van hatásuk a felszíni földgáz vagy a nagynyomású földgáz rendszer elemek állapotára.

1) **Nagy csapadékok:** Itt két indikátort választottunk ki – a 23 mm feletti csapadékú napok éves számát, melyet több év földcsuszamlásos eseteinek statisztikai alapján határoztunk meg, és az órás csapadékintenzitás éves maximumát, melyből kissé nagyobb súllyal szerepel az utóbbi (1,5 a nagynyomású földgázvezeték esetében és 1,2 a felszíni földgáz elemeknél), mint az előbbi. A 23 mm-es indikátor esetében 1-es súlyt alkalmaztunk a két csoportra nézve, hiszen mindkét csoportot inkább a

hirtelen árvizek intenzitásának változása, mint a nagycsapadékok gyakoriságának növekedése veszélyezteti.

2) **Erdőtűzveszély:** Az erdőtűz veszélyes napok éves számát a hosszan tartó, csapadék nélküli és száraz, meleg időszakok együttes előfordulásával határoztuk meg (amikor a napi maximumhőmérséklet 30 °C feletti, a relatív nedvesség 30% alatti, továbbá az elmúlt 30 nap csapadékösszege nem éri el a 30 mm-t). Ezen indikátor küszöbértékei elég szigorúnak tűnnek, de a jövőben egyértelműen lesznek majd ilyen időszakok. Mivel a felszíni földgázelemekre ez a veszély nagyobb hatással bír, ezért ott a súlyozást 1,5-nek állapítottuk meg, míg a nagynyomású földgázvezetéseknél 1-nek.

5.3.3. A vizsgálatba bevonandó érzékenységi indikátorok köre és a számítási metodika

Az érzékenység a hatásviselő rendszerek éghajlatfüggő tulajdonsága vagy tulajdonságainak összessége. Az érzékenység mutatók mindig adott éghajlati és földtani kitettségekhez kapcsolódnak, jelen esetben az a nagynyomású földgázvezeték-rendszer felszíni rendszerelemeinek érzékenysége az előző fejezetekben meghatározott kitettség mutatók alapján került megállapításra.

A jelen módszertan a hazai földgáz hálózat felszíni létesítményeire vonatkozó érzékenységi és alkalmazkodóképességi indikátorok kialakítását részletezi (10. táblázat). Az FGSZ Zrt. által üzemeltetett, karbantartott és fejlesztett felszíni rendszerelemek – a hálózatban betöltött szerepük függvényében – három külön csoportba sorolhatók be:

- 1) Gázátadó állomás – 357 db
- 2) Csomópont állomás – 41 db
- 3) Kompresszor állomás – 11 db

Az adott létesítmények jellemzőihez és a hozzájuk tartozó adatok függvényében alakítottuk ki a komplex érzékenységi és alkalmazkodóképességi vizsgálatot. Az előbbi esetben a telepítési mód (elhelyezkedés és védelem) kapott kiemelt szerepet az indikátor képzéséhez. Az alkalmazkodóképességi vizsgálatot egyazon tulajdonságok mentén dolgoztuk ki – a létesítmények villamos energiával való alternatív elláthatóságának szempontjából. A rendszerelemek érzékenységi és alkalmazkodóképességi értékelései, pontozásos és súlyozásos eljárás mentén kerültek beépítésre a vizsgálatba. Az érzékenységi vizsgálat során egy létesítmény annál érzékenyebb, minél nagyobb az érzékenységi pontértéke, szemben az alkalmazkodóképességi vizsgálatnál, ahol egy létesítmény annál alkalmazkodó képesebb, minél nagyobb az alkalmazkodási pontértéke. A folyamat során összesen 409 darab létesítményhez tartozó adatmennyiség került feldolgozásra az FGSZ Zrt. átadásának és szakmai tanácsainak köszönhetően.

A hatásláncokhoz szükséges komplex indikátorok kialakítása előtt – az FGSZ Zrt. által biztosított nyers adatokból – egy egységes adatbázis előállítása volt a cél. Az adatbázis kiépítésének folyamatos ellenőrzése, valamint a szektorban lévő kritikus infrastruktúrákhoz kapcsolódó tematikák megfelelő kiválasztása és súlyozása kiemelt feladat volt a felek számára. Az indikátorok képzése és számítása is többszörös korrekción ment keresztül az MBFSZ és az FGSZ Zrt. által megtartott közös egyeztetések során.

Adatállomány	Képzett mutató és módszertan	Érzékenységi pontozás

<i>Telepítési mód (elhelyezkedés, védelem)</i>	négy lehetséges telepítési mód: (1) Épület és kabin vagy épület (2) Kabin vagy konténer (3) Szekrény (4) Szabadon	súlyozott csoportosítás a védelem függvényében az előzetes kategóriák alapján	100-500 pont épület és kabin vagy épület: nem érzékeny (100 pont) kabin vagy konténer: alacsonyán érzékeny (150p) Szekrény: mérsékelten érzékeny (300p) Szabadon: érzékeny (500p) 0-150 – nem érzékeny 300 – mérsékelten érzékeny 500 - érzékeny
<i>Villamos energiával való elláthatóság</i>	a létesítmény villamos energia ellátottsága: (1) mobilaggregátor (2) szünetmentes akkumulátor (3) telepített aggregátor (4) Kettős betáplálás	az előzetes felmérések alapján egy súlyozott csoportosítás az ellátottság függvényében	Alkalmazkodóképességi pontozás 100-400 pont - mobilaggregátor (100p) - szünetmentes akkumulátor (100p) - Telepített aggregátor (200p) - Kettős betáplálás (400p) 0-200 legkevésbé alkalmazkodóképes 300 mérsékelten alkalmazkodóképes 400- kiemelten alkalmazkodóképes

10. táblázat Az érzékenységi és az alkalmazkodóképességi vizsgálatot alkotó elemek adatállománya, felhasználási módszertana és besorolási pontthárjai.




A vizsgált felszíni létesítményekből valamennyi állomásra volt lehetőségünk egyazon jellemzők mentén elvégezni az érzékenységi vizsgálatot. A következő fő szempont alapján történt meg létesítmények értékelése:

- Telepítési mód (elhelyezkedés, védelem)
 - 100-500 pontig tartó beosztás
 - A létesítmény egy épületben vagy egy épületben és azon belül egy kabinban van elhelyezve.
 - A létesítmény egy kabinban vagy egy konténerben van elhelyezve.
 - A létesítmény védelmét egy szekrény biztosítja.
 - A létesítmény védelme nincs biztosítva, szabadban van.

A fenti szempontok alapján képzett mutató az előzetes csoportosítások súlyozott figyelembevételével történt. Fontos kiemelni, hogy az általunk vizsgált nagynyomású földgázhálózat legfontosabb felszíni eleme a kompresszorállomás. Emiatt a kompresszorállomások védelme megfelelő mértékben van biztosítva (épületben vagy konténerben). Ennek ellenére a záporok, zivatarok által keltett lokális villámárvizek az egyes épületekre és konténerekre is veszélyt jelenthetnek (süllyedés, talajvíz, áradás), valamint a megközelítésüket nehezíthetik. A csomóponti állomások mindegyike és a gázátadók zöme

is síkállomás, így az extrém időjárási események esetén érzékenyséjük általában magasabb, mint a kompresszorállomásoké. Megemlítjük, hogy mind a három vizsgált állomástípus villámvédelme egységesen megoldott.

A létesítmények komplex érzékenységi besorolása a fenti tematikák összesített pontértékei alapján hármas beosztásba, jelzőlámpa módszerrel történt (11. táblázat).

Ponthatárok (gázátadó és kompresszorállomás)	Pontértékek (csomóponti állomás)	Érzékenységi besorolás	Jelzőlámpa
0 – 350	0	1	
400 – 500	100	2	
600 -	200	3	

11. táblázat Az érzékenységi vizsgálatot kategorizáló pontértékek és ponthatárok intervallumai.




A pontértékek és a besorolások egymáshoz viszonyítva értelmezendők, tehát a pontértékek érzékenységének relatív viszonyát mutatják be. Fontos kiemelni, a rendszeres felméréseknek és tervezett karbantartó munkálatoknak, valamint az elemek és alkatrészek szükséges cseréinek és a rendszer elemeinek és állandó modernizációknak köszönhetően területileg különbségek nem jelennek meg, és nem értelmezhetőek a rendszerelemek szempontjából. Ebből kifolyólag az érzékenyebb pontok biztonsági szempontból nem tekinthetők kritikusnak vagy nem feltételezik, hogy az érzékeny pontok súlyosan balesetveszélyesek lennének. Ennek következtében a korábban képzett érzékenységi mutatók esetén az egyes létesítmények korához kapcsolódó jellemzők sérülékenységi-modellbe való beépítésétől eltekintettünk

5.3.4. A vizsgálatba bevonandó alkalmazkodóképességi mutatók és képzésük módszertana

Az alkalmazkodóképesség azon műszaki intézkedések együttese, melyekkel a klímaváltozás miatt a rendszerre ható kedvezőtlen hatásokat csökkenteni lehet. Ennek függvényében a földgáz hálózat felszín feletti létesítményeinek villamos energiával való alternatív elláthatósága kritikus alkalmazkodási területnek számít. A hazai állomások négy különböző, de akár egymás mellett több meglévő ellátási lehetőséggel lehetnek felszerelve:

- 1) mobilaggregátor
- 2) telepített aggregátor
- 3) kettős betáplálás
- 4) szünetmentes akkumulátor

A négy áramellátási eljárás egy válaszreakció egy esetleges havária következtében kimaradó áramellátás kezelésére (mennyire hatékonyan képes reagálni az adott állomás). A létesítmények komplex alkalmazkodóképességi besorolása a fenti tematikák összesített pontértékei alapján hármas beosztásba, jelzőlámpa módszerrel történt (12. táblázat).

A ponthatárok intervallumai	Alkalmazkodóképességi besorolás	Jelzőlámpa
0 – 200	1	
200 – 400	2	
400 -	3	

12. táblázat Az alkalmazkodóképességi vizsgálatot kategorizáló pontértékek és ponthatárok intervallumai.



16. ábra A magyarországi földgáz hálózat felszíni létesítményeinek komplex alkalmazkodóképességi besorolása. Alapadatok forrása: FGSZ Zrt.

A 16. ábrán a magyarországi nagynyomású földgázhálózat felszíni létesítményei láthatóak az alkalmazkodóképességüknek megfelelő színezéssel. A kompresszorállomások kivétel nélkül a legjobb alkalmazkodóképességű kategóriába kerültek, többoldalú elláthatóságuk miatt. A gázátadó és a csomóponti állomások jelentős része a mérsékelt alkalmazkodóképességű (sárga), másik részük a kevésbé alkalmazkodóképes (piros) kategóriába került.

5.3.5. A várható hatások és sérülékenységi értékelése (az „egyedi” hatás- és sérülékenységi mutatók számítása), további vizsgálati irány

A várható hatás mutatók az összetartozó kitérttség és érzékenység mutatók külön-külön történő, majd együttes kiszámításával majd értékelésével állnak elő. Az előbbi elemzés a hatásláncokban rögzített indikátorok számításával majd általános és területi elemzésével, térképezésével különösen fontos. Így az éghajlati kitérttség kétféle forgatókönyv, hatféle modellszimuláció eredménye, ezért ebben az esetben összesen 12 mutató állt elő minden egyes vizsgált éghajlati indikátor esetén. A földtani kitértsegi mutatók 10 tematikája 10 különféle indikátor képzését teszi lehetővé, továbbá még egyet az aggregált, dimenzió nélküli földtani kitértsegi jelzőlámpa mutatót. Az érzékenység esetén az aggregált, dimenzió nélküli érzékenységi mutatót alkalmazzuk. A várható hatásmutatók számításánál az összetartozó éghajlati kitértsegi, földtani kitértsegi és érzékenység mutatók összeszorzására kerül sor az alábbiak szerint.

$$H_i = \acute{E}i * \acute{E}ki * FK_i$$

ahol:

H_i=várható hatás az i-edik felszíni létesítmény esetében

É_i=érzékenység az i-edik felszíni létesítmény esetében

É_{ki}=éghajlati kitértsegi az i-edik felszíni létesítmény esetében

FK_i=földtani kitértsegi az i-edik felszíni létesítmény esetében

Az éghajlati és földtani sérülékenység számítás során egy adott felszíni rendszerelem sérülékenysége az aggregált várható hatás és aggregált alkalmazkodó képesség (inverz) mutató szorzatának eredménye.

$$S_i = AH_{norm_i} * AAK_{norm_i}$$

S_i = sérülékenység az adott felszíni rendszerelem esetében

AH_{norm_i} = normalizált aggregált hatás az i-edik felszíni rendszerelem esetében

AAK_{norm_i} = normalizált (inverz) aggregált alkalmazkodó-képesség az i-edik felszíni rendszerelem esetében

A későbbiekre még további vizsgálati irány lehet: a földtani térkép részletességének, méretarányának javításával, mérnök- illetve településgeológiai szintig javasolható a földgáz felszíni rendszerelemek érzékenységek pontozásánál az adatokat telephelyenként részletesebben figyelembe venni. Ennek feltétele ilyen irányú vizsgálati eredmények, adatok rendelkezésre állása, illetve elvégzése. Emellett felvethető e vizsgálatnál rendelkezésre nem álló témák, mutatók vizsgálata például földrengés-veszélyeztetettség, vagy biológiai korrózió területi jellemzői.

6. A távhő szektor infrastrukturális sérülékenysége

6.1. Hazai körkép a távhő szektor fő infrastrukturális rendszereiről és szereplőiről

6.1.1. A távhő infrastruktúra rendszerei sérülékenysége szempontjából fontos alapfogalmak

(a Távhőszolgáltatásról szóló 2005. évi XVIII. törvény 3§-a ill. az ezen törvény végrehajtásáról szóló 157/2005 (VIII. 15.) Korm. rendelet 17/a §-a alapján):

Távhő: Az a hőenergia, amelyet a távhőtermelő létesítményből hőhordozó közeg (gőz, melegített víz) alkalmazásával, távhővezeték-hálózaton keresztül, üzletszerű tevékenység keretében a felhasználási helyre eljuttatnak.

Távhőszolgáltatás alatt (17. ábra) azt a közszolgáltatást értjük, amely a felhasználónak a távhőtermelő létesítményből távhővezeték hálózaton keresztül, az engedélyes által végzett, üzletszerű tevékenység keretében történő hőellátásával fűtési, illetve egyéb hőhasznosítási célú energiaellátásával valósul meg.

Távhőtermelő létesítmény: Az erőmű távhőszolgáltatási célra hőtermelő létesítménye, távhőt előállító fűtőmű, kazántelep, kazán, hulladékégető mű, geotermikus energiát távhőszolgáltatás céljára kitermelő vagy más megújuló energiát (pl. biokazán, hőszivattyú, napkollektor) és hulladék hőhasznosító távhőtermelő berendezés.

Távhővezeték-hálózat: Az a csővezetékrendszer - a hozzá tartozó műtárgyakkal, hálózati szerelvényekkel, kapcsolódó automatikákkal, műszerekkel, elektromos berendezésekkel együtt -, amely a távhőnek (hőhordozó közegnek) a távhőtermelő létesítménytől a csatlakozási pontig történő szállítására szolgál. A távhővezeték-hálózat részei: a gerincvezeték, az elosztóvezeték, a bekötővezeték, valamint a szolgáltatói hőközpontból kiinduló és az átalakított hővel ellátott épület vagy építmény hőfogadó állomása főelzáró szerelvényéig, ennek hiányában a felhasználási helyet magában foglaló ingatlan telekhatáráig terjedő vezeték.

Felhasználási hely: A felhasználó tulajdonában lévő, a közszolgáltatási szerződés tárgyát képező olyan épület, építmény, épületrész, amelynek távhőfogyasztása önállóan mérhető.

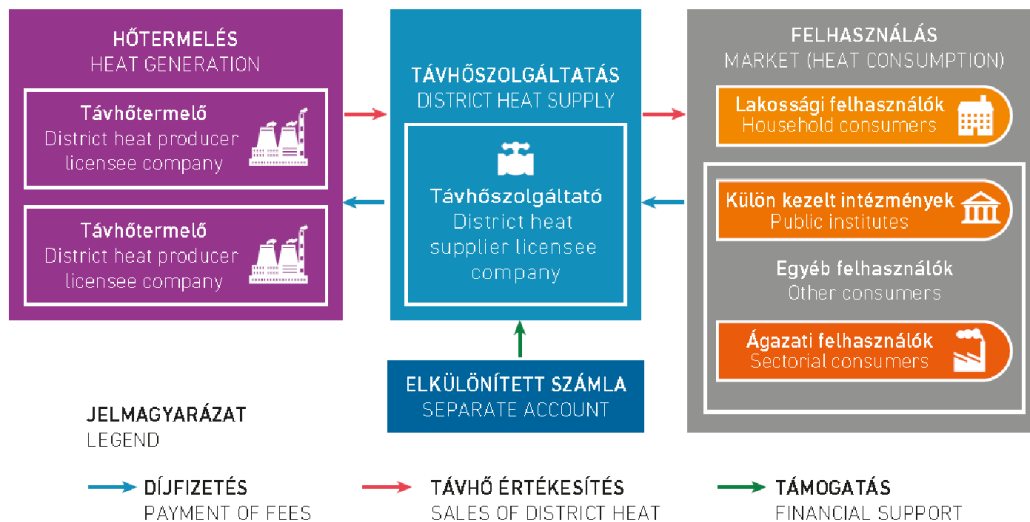
Hőfogadó állomás: Egy épület vagy építmény távhőellátása céljából, a hőhordozó közeg fogadására, továbbítására szolgáló technológiai berendezés, ahol a felhasználók részére átadott távhőmennyiség mérése, mennyiségi szabályozása is történhet.

Termelői hőközpont: A távhő termelőjénél távhőellátás céljából a hőhordozó közeg kiadására, továbbítására, elosztására, átalakítására, mennyiségének szabályozására, esetenkénti mérésére szolgáló technológiai berendezés.

Szolgáltatói hőközpont: Több épület vagy építmény távhővezeték-hálózat útján történő hőellátása céljából, az ellátandó épületeken vagy építményeken kívül, vagy azok egyikében elhelyezett, a hőhordozó közeg fogadására, átalakítására, mennyiségének szabályozására, elosztására, mérésére szolgáló technológiai berendezés.

Felhasználói hőközpont: Egy épület vagy építmény hőellátása céljából a hőhordozó közeg fogadására, átalakítására, mennyiségének szabályozására, mérésére szolgáló technológiai berendezés.

Érdemes tehát hangsúlyozni, hogy a távhőtermelés, és a távhőszolgáltatás egymástól eltérő fogalmak, noha nagyszámú távhő termelő egyben távhőellátási szolgáltatást is nyújt a különböző lakossági és egyéb felhasználók számára.



17. ábra: A távhőszolgáltatás egyszerűsített modellje

Forrás: MATÁSzSz-MEKH 2019

6.1.2. A távhőellátás alapinformációi hazánkban

A távhőellátás Magyarországon elsősorban fűtési és használati melegvíz szolgáltatásokra terjed ki, az ipari hőenergia-ellátás kevésbé jellemző. A szolgáltatást igénybe vevők körébe főként lakossági és intézményi (közületi) fogyasztók tartoznak, jellemzően kisebb-nagyobb lakónegyedekre, lakótelepekre koncentráltan. Az összes díjfizető száma 2018-ban 679 187 volt, ebből lakossági 659 420 (a teljes lakásállomány kb. 15%-a) (MATÁSzSz-MEKH 2019).

Az országban összesen 94 településen található távhőellátás nagyjából egyenletes országos lefedettséggel, a távhővel ellátott lakások arányának régiókénti megoszlása is nagyjából egyenletes (10-20% közötti).

Érdekes megemlíteni, hogy hazánk valamennyi 100 000 főnél nagyobb városában van távfűtés (Budapest, Debrecen, Szeged, Miskolc, Pécs, Győr, Nyíregyháza, Kecskemét, Székesfehérvár), az 50 000 – 100 000 fő közötti lakosságúaknál Zalaegerszeg és Nagykanizsa kivételével szintén valamennyi városban (Szombathely, Szolnok, Érd, Tatabánya, Sopron, Kaposvár, Veszprém, Eger) elérhető vagy a közeljövőben elérhető lesz a távfűtés. Ugyanakkor mind Zalaegerszeg, mind Nagykanizsa környékének geotermikus adottságai kimagaslóak, így a jövőben reális lehetőség nyílhat új, megújuló alapú távfűtési rendszerek kiépítése.

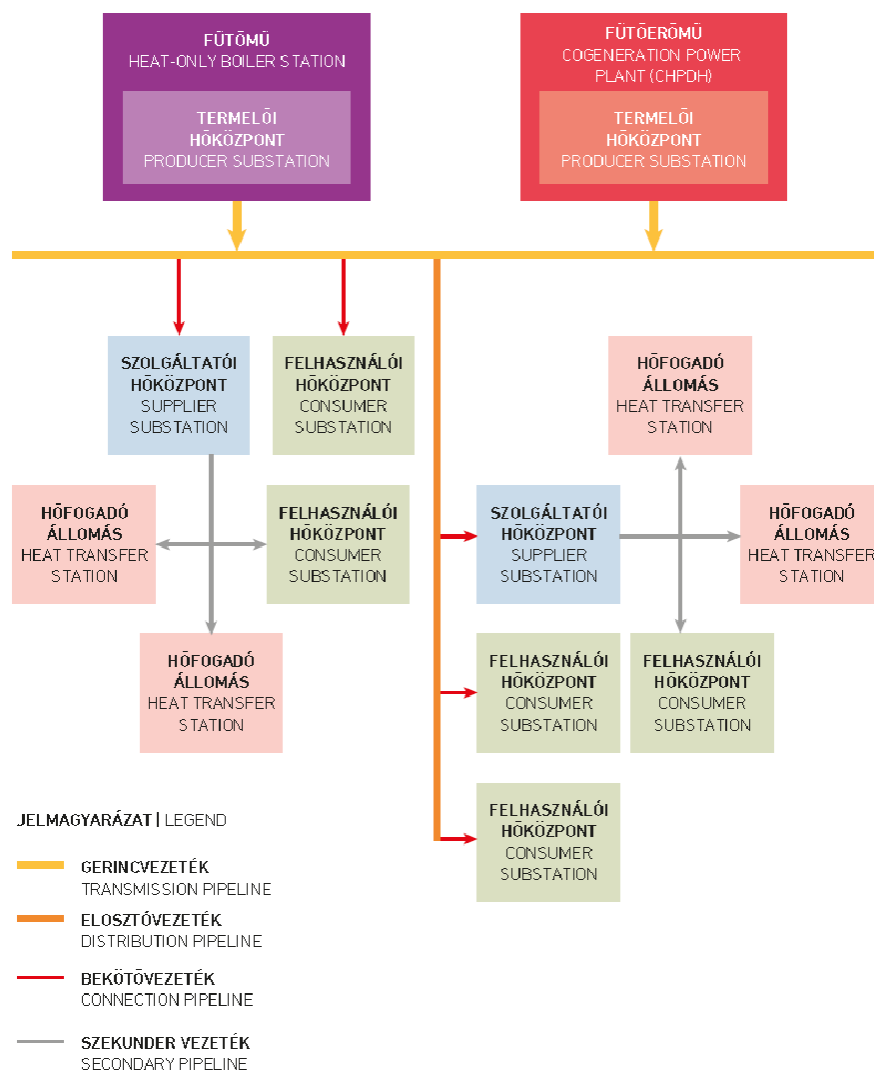
A 25 000 és 50 000 fő közötti lakosságszámmal rendelkező településeknek szintén a döntő hányada rendelkezik távfűtéssel (Dunaújváros, Dunakeszi, Hódmezővásárhely, Szigetszentmiklós, Cegléd, Baja, Mosonmagyaróvár, Salgótarján, Vác, Ózd, Gödöllő, Szekszárd, Hajdúböszörmény, Kiskunfélegyháza, Gyöngyös, Budaörs, Esztergom, Ajka, Kiskunhalas, Szentes, Szentendre, Kazincbarcika, Siófok), ebben a település kategóriában csak Pápa, Gyula, Jászberény és Orosháza van híján a távfűtő infrastruktúrának.

További hazai adottság, hogy a távhővel ellátott fogyasztóknál gyakorlatilag nincs más, teljes értékű alternatív fűtési mód: a már kiépült épületgépészeti infrastruktúra csak jelentős költségek árán lenne átalakítható.

Magyarországon 2018-ban 1881 szolgáltatói hőközpont, és 13 347 felhasználói hőközpont volt. A magyarországi távhőszolgáltatásról a legátfogóbb képet és adatokat az 1993-ban alakult Magyar

Távhőszolgáltatók Szakmai Szövetsége (MATÁSzSz) adja. A mintegy 130 tagból álló szövetség fő célja, hogy összefogja a távhőszolgáltatással, távhőtermeléssel foglalkozó gazdasági társaságokat, és azokat a vállalkozásokat, amelyek tevékenységükkel, illetve az általuk gyártott vagy forgalmazott termékekkel kapcsolódnak a távhőszektorhoz.

A távhőrendszer egyszerűsített sémáját a 18. ábra mutatja. A távhőtermelés a termelők fűtőműveiben, illetve fűtőerőműveiben történik hazánkban. Innen felszíni, illetve felszín alatti távhővezetékeken (gerinc-, elosztó- és bekötővezetékeken) jut el a hő a szolgáltatói, illetve a felhasználói hőközpontokba. A hőközpontokból a másodlagos vezetékeken keresztül végül a hőfogadó állomásokig, majd a fogyasztókig tart a szolgáltatott hő és melegvíz útja. A felsorolt rendszerelemek közül különösen a koncentrált nagyteljesítményű, illetve nagykapacitású elemek lényegesek az éghajlati és földtani sérülékenységi szempontjából.



18. ábra: A távhőrendszer egyszerűsített sémája

Forrás: MATÁSzSz-MEKH 2019

6.2. A sérülékenységvizsgálat értelmezési keretei a távhő infrastruktúra vonatkozásában

Projektünk céljai közé tartozik, hogy a hazai városi távhőrendszerek infrastruktúrájának sérülékenységet jellemezzük és értékeljük. A távhőrendszerek a **2012. évi CLXVI törvény, illetve az ennek végrehajtásáról szóló 65/2013 (III.8.) Korm. rendelet** szerint a hazai kritikus energetikai infrastruktúrának részét képezik, és rendszer elemei (fűtőművek, egyes távhővezetékek) általában a felszínen találhatóak. Ennek megfelelően kevésbé védettek a klimatikus és időjárási hatásoktól. A távhőellátás éghajlati sérülékenysége című tanulmány (Geogold Kárpátia Kft. 2019.) éppen ezért foglalkozott a távhő infrastruktúra bizonyos elemeinek éghajlati sérülékenységgel, noha fő megállapítása az volt, hogy a közvetlen klimatikus hatásokkal szemben a távhő műszaki infrastruktúrája kevésbé érzékeny. Ezen eredményeken túlmutatva jelen projektünkben bizonyos sekélyföldtani veszélyforrásokkal (például felszínmozgások) is foglalkozni kívántunk, ezért célszerűnek tűnt, hogy a távhőrendszerek termelő, szállító és részben fogyasztókat ellátó létesítményeit is vizsgáljuk a közvetlen földtani kitettség és érzékenység oldaláról, valamint annak alkalmazkodóképességéről is gyűjtsünk információkat, adatokat. Erre azért is szükség volt, mert számos esetben az éghajlati hatások (például az extrém zivatarok, szélviharok valószínűségének várható fokozódása) felerősíthetik a felszínen és a kis részben felszín alatt elhelyezkedő távhő rendszerelemek földtani sérülékenységét. Példának említjük a hirtelen nagy mennyiségben lehulló csapadékok valószínűségének emelkedésével a lejtős tömegmozgások (például omlások, csuszamlások) számának várható növekedését az arra hajlamos térségekben. (Tildy. et al. 2019).

A korábban vázolt sérülékenységi keretrendszerünk (lásd 2.2 fejezet) részeként a várható hatás megadásához először a rendszer kitettségét és annak érzékenységét kell külön meghatározni. A kitettségi (K) és az érzékenységi (É) indikátorokat szakirodalom alapján, illetve a kiemelt ágazati szereplőkkel (MATÁSZSZ, MEKH) folytatott konzultációk nyomán határoztuk meg. A kitettségi információkat és adatokat legtöbb esetben mi szolgáltattuk, az érzékenységi jellemzőket főleg a partnerek (például a MATÁSZSZ) tudták megadni, hiszen az érzékenység a rendszer érzékeny elemeit és azok fizikai paramétereit írja le. Az alkalmazott sérülékenység-vizsgálati logikai keretrendszer alapján, az alkalmazkodóképességet (A) olyan tényezők jelentik, amelyek adaptációs stratégiák bevezetésével a rendszerre ható kedvezőtlen hatások enyhítésére szolgálnak (például a megelőzés vagy a rendszer karbantartásának, javításának eszközei, folyamatai, jellemzői). Ezt szintén az ágazati szereplők tudták az információk és adatok rendelkezésre állása esetén megadni. Az indikátorokat itt is közösen hoztuk létre. Végül a rendszer sérülékenysége (S) ezek kombinációjának eredménye, mely mindhárom mutatótól függ.

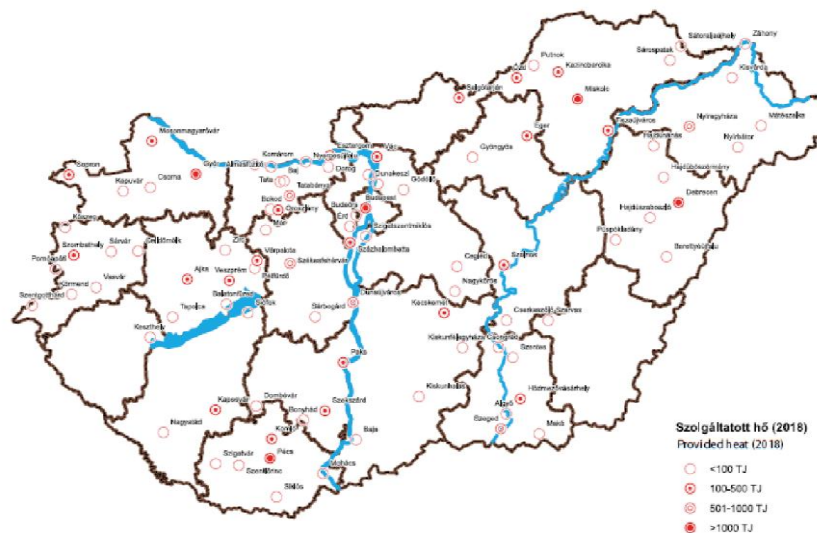
Kitettségként értelmezzük a vizsgálatunkban a környezeti paraméterek – éghajlat, földtani közeg, felszínmozgások – várható változását, illetve annak jellemzőit leíró mutatókat. Az éghajlat változását leíró kitettségi indikátorok olyan komplex mérőszámok, mint például a zivatarok (villámveszély, vagy extrém csapadékkal terhelt napok számának változása), vagy a gyors hőmérsékletingadozású napok számának és a hőségnapok számának várható változása. Ezek mellett a földtani jellemzőkből, illetve a felszínmozgásokból adódó, és a felszíni vizekkel összefüggő földtani veszélyforrások is tanulmányunk kitettségi részét képezik (például a hirtelen, nagy intenzitású csapadékok hatására megjelenő jelentős belvíz vagy a hozzá kapcsolódó felszínmozgások gyakoriságának várható változása). Az éghajlati indikátorokkal ellentétben a földtani veszélyek a jelenlegi talaj- és kőzetféleségtől is függenek, de az időjárásfüggő (pl. nagycsapadék esetén bekövetkező) földtani veszélyforrások valószínűségére, vagy a talajvízszint változására tudunk jövőbeli kitettséget meghatározni. A kitettségi indikátorok pontosítása és az érzékeny rendszerelemekre vonatkozó hatásuk alapján való súlyozása ún. hatásláncokon keresztül a szakmai partnereinkkel közösen kerültek véglegesítésre. E folyamat eredményeit a következő fejezetekben mutatjuk be.

Az érzékenységi információknál kiemelt jelentőségű a rendszerelemek térbeli elhelyezkedése, hiszen tudnunk kell, hogy például egy távfűtőmű vagy távhővezeték esetleg nagycsapadékkal jobban érintett

területen található-e, és így esetleg jobban kitett lejtős tömegmozgásoknak (például omlások vagy csuszamlások). Ide sorolandók még bizonyos távhő rendszerlemek egyes építési (például távhővezetékek alapozása, fektetés mélysége), minőségi (kor, anyag, előállítási technológia) paraméterei, vagy a felszíni rendszerlemek tájolása, talajvizekkel összefüggő mutatói. Alkalmazkodóképesség alatt olyan tervezési, beavatkozási, műszaki és akár gazdasági információkat értünk, amelyekkel a távhőrendszer éghajlati vagy földtani veszélyforrással szemben sérülékenységi tudjuk csökkenteni. Például olyan beruházások, felújítások, javítások, karbantartások megtervezését és végrehajtását műszaki és pénzügyi oldalról, amelyek azt mutatják, hogy a szolgáltatók számolnak vagy kénytelenek számolni az éghajlati és földtani változásokkal nagyobb gyakorisággal vagy bizonyos tipikus helyszíneken.

A 374/2020 (VII. 30.) Korm. rendelet világos lehatárolásokat alkalmaz a létfontosságú távhőrendszerek és elemeik vonatkozásában. Ilyen például, hogy: „távhőrendszer tekintetében nemzeti létfontosságú rendszerlemként kell azonosítani azt a rendszerlemet, amely kijelölt létfontosságú rendszerlem üzemfolytonos működését biztosítja, vagy kiesése legalább 20 000 felhasználó vagy díjfizető fűtési és melegvíz-célú felhasználását egyaránt érinti.” (Korm.rend 8. §). Mindezeket túl jelentős zavarának számít „a távhőszolgáltatási rendszerlem olyan, 24 órát meghaladó kiesése, amely legalább 10 000 felhasználót vagy díjfizetőt zár ki a vételezésből” (Korm.rend 12. §).

A projektben – egyeztetve a partnerszervezetekkel – nem kizárólag a létfontosságú rendszerlemeket vizsgáljuk, hanem a MATÁSZSZ ajánlását figyelembe véve a 100.000 GJ feletti éves hőkiadású szolgáltatókat és rendszereiket, és bizonyos rendszerlemeiket vizsgáltuk. Hazánkban közel 30 városban találunk ilyen távhőrendszereket (19. ábra). A rendszerlemek közül megkülönböztetett figyelemmel kívántuk vizsgálni a nagy rendszerek távhő-vezetékeinek éghajlati és földtani sérülékenységi befolyásoló kitettségi és érzékenységi jellemzőket és paramétereiket. Speciális esetekben kívántunk kitérni a hőközpontok vizsgálatára szakirodalmi ajánlás alapján. A vizsgálat kiterjedt továbbá a fűtőerőművek, fűtőművek, illetve speciális rendszerlemeik (például távközlési berendezések) sérülékenységre is.



19. ábra: Távhőszolgáltatással ellátott települések a szolgáltatott hőmennyiség szerint

Forrás: MATÁSZSZ-MEKH 2019

Célunk tehát az volt, hogy első lépésben azonosítsuk az éghajlatváltozásból fakadó és a földtani veszélyforrásokhoz köthető távhőrendszereket érintő hatásokat, meghatározzuk az ezek mértékét befolyásoló kitettségi és érzékenységi paramétereket és alkalmazkodóképességet befolyásoló tényezőket. Mindezeket figyelembe véve kidolgoztuk a távhőszektor infrastrukturális sérülékenységét leíró hatásláncokat, amelyekben meghatároztuk a vizsgálandó indikátorokat és a számítás menetét. A sérülékenységvizsgálat során a 100 000 GJ-nál nagyobb éves hőkiadású rendszerekkel, azokon belül pedig a hőszállító és a hőtermeléshez kapcsolódó rendszerekkel kiemelten foglalkoztunk. A következő fejezetekben ezt a módszertant dolgoztuk ki a meghatározott elemekre.

6.3. A sérülékenység-vizsgálat javasolt módszere

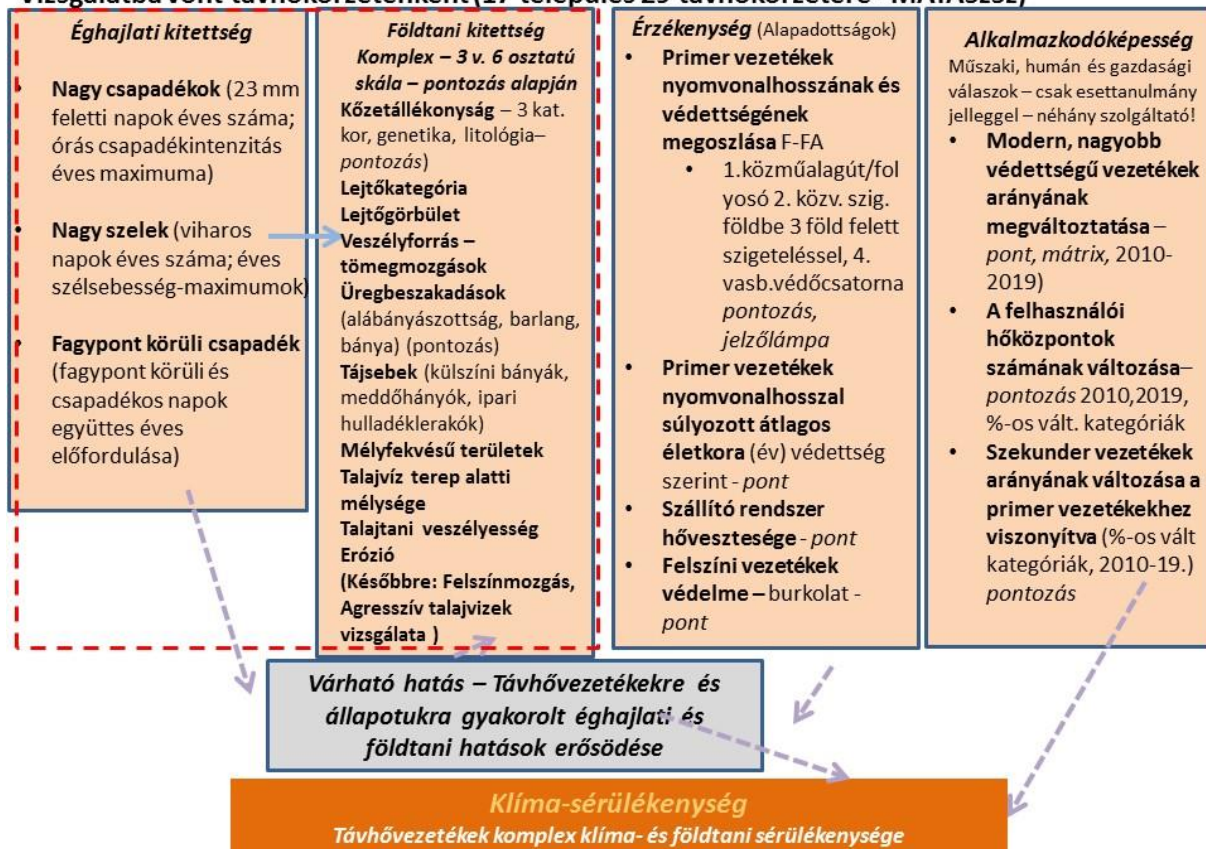
Az elvégzett vizsgálat módszertanilag alapvetően három fő lépésre tagolható: 1.) a CIVAS-modell alapján kialakított logikai keret, az úgynevezett hatáslánc felépítésére a vizsgálandó energetikai rendszerre (a távhővezetékek komplex sérülékenysége 100 000 GJ feletti kiadott hőteljesítményű hőközvetenként), 2.) majd az átadott és számított adatok alapján az egyes kategóriákban kidolgozott dimenzió (mértékegység) nélküli egyedi és aggregált indikátorok képzésére és tesztelésére, 3.) és végül a komplex sérülékenységi vagy hatásoldali mutatók képzésére, valamint a továbbfejlesztés lehetőségeinek összegyűjtésére.

6.3.1. A fő hatáslánc bemutatása és értelmezése a távhő infrastruktúra vonatkozásában és a vonatkozó adatok elérhetősége és alkalmazhatósága

A fő vizsgálati irány és hatáslánca, a szakmai partnernek köszönhetően, több körben kialakításra, súlyozásra került, és hozzá megfelelő mennyiségű érzékenységi és alkalmazkodóképességre vonatkozó alapadat is rendelkezésre állt. A hatáslánc az éghajlati és földtani hatásoknak sokrétűen kitett, a hazai, nagy hőkiadású távhőközvetek távhővezetékeire került kialakításra végül figyelembe véve az éghajlati és földtani kitettségi jellemzőket. Ennek alapja egy-egy kiemelt érzékenységi és alkalmazkodóképességi adatbázis volt a MATÁSzSz tagszervezetei által átadott többféle adatból. A felhasznált érzékenységi és alkalmazkodóképességi alapadatok (például távhővezetékek eltérő védettségi jellemzői) az MATÁSzSz erre az alkalomra készített eseti saját adatgyűjtéséből származnak. Tőlük, megfelelő engedélyek birtokában, ez megigényelhető. A kialakított hatáslánc alább látható (20. ábra).

TÁVHŐVEZETÉKEK KOMPLEX SÉRÜLÉKENYSÉGÉNEK VIZSGÁLATI MÓDSZERE

Vizsgálatba vont távhőkörzetenként (17 település 29 távhőkörzetére - MATÁSzSz)



20. ábra A hazai nagy hőkiadású távhőkörzetek távhővezetékeinek komplex sérülékenységi hatáslánca

6.3.2. A vizsgálatba bevonandó éghajlati indikátorok köre és a számítási metodika

Az éghajlati veszélyforrások által okozott hatás mára szinten minden gazdasági, természeti és társadalmi területet érint, mely alól a távhő-szektor sem kivétel. Emiatt a távhő-szektorban a legnagyobb éghajlati kitértséggel bíró távhővezetékek állapotára várható hatást igyekszünk számszerűsíteni, melyhez olyan éghajlati indikátorokat választottunk, amelyekre mind valamilyen rácsponti éghajlati megfigyelés, és mind a kétféle jövőbeli (optimista és pesszimista) kibocsátási forgatókönyvre előálló, legalább 6-10 különböző éghajlati modellszimuláció eredményei is rendelkezésünkre állnak hazánkra a megfelelő tér- és időbeli felbontáson. Ezen kétszer hat- vagy akár tíztagú együttes már megfelelően tudja reprezentálni a modellek különbözőségéből eredő bizonytalanságot, illetve a kétféle forgatókönyv által az emberi tevékenység jövőbeli alakulásából származó bizonytalanságot is. A következő néhány indikátort a nemzetközi szakirodalom korábbi cikkeit is figyelembe véve, majd a hazai távhő-szektor szakembereinek együttműködésével közösen választottuk ki. Mivel a távhő-szektor kisebb területi kiterjedéssel bír, így az időjárás szélsőségei által is kevésbé érintett infrastrukturális elemekről van szó, ezért a villamosenergia-szektornál kisebb számú indexet tekintettünk a távhővezetékek esetében. Súlyozással is elláttuk az indikátorokat, hiszen azoknak nem azonos mértékben van hatásuk a távhő rendszer elemeinek állapotára.

- 1) **Nagy csapadékok:** Itt két indikátort választottunk ki – a 23 mm feletti csapadékú napok éves számát, mely küszöböt több év földcsuszamlásos eseteinek statisztikái alapján határoztunk meg, és az órás csapadékin tenzítés éves maximumát. Ezekből a

csapadékintenzitást tekintettük nagyobb súllyal (1,2) a 23 mm feletti napokkal szemben (1), mert a legintenzívebb csapadékok változása talán kissé jobban érinti a távhő-infrastruktúra elemeit, mint a nagycsapadékok napjainak számának, azaz a gyakoriságának növekedése.

- 2) **Nagy szelek:** A nagy szelek a távhő infrastruktúra-elemeket jelentősen megrongálhatják, ezért mind azok gyakoriságának és intenzitásának növekedését vizsgálnunk kell. A gyakoriság növekedésére a viharos napokat választottuk ki (amely a napi széllokés-maximumok 99,6. percentiliséjét jelenti), míg az intenzitást az éves széllokés-maximumokkal írjuk le. Úgy látjuk, hogy a villamosenergia-szektornál kisebb hatásuk van ezen két indikátornak a távhőnél, ezért itt a gyakoriságnövekedésre 1-es, az intenzitásra 1,2-es súlyt adtunk.
- 3) **Fagypont körüli csapadék:** A hőmérsékletváltozás és a téli csapadék szintén rongálhatja a vezetékrendszereket. Ehhez azokat a napokat vettük figyelembe, amikor a maximumhőmérséklet 0 °C feletti és a minimumhőmérséklet 0 °C alatti értéke mellett a legalább 0,1 mm-nyi csapadék együttesen fordul elő. Ehhez egy 1,5-ös súlyt rendeltünk.

6.3.3. A vizsgálatba bevonandó érzékenységi mutatók és képzésük módszertana

Az érzékenység a hatásviselő rendszerek éghajlatfüggő tulajdonsága vagy tulajdonságainak összessége. Az érzékenység mutatók mindig adott éghajlati és földtani kitettséghez kapcsolódnak, jelen esetben az a távhővezetékek érzékenysége az előző fejezetekben meghatározott kitettség mutatók alapján került megállapításra.

A távhővezetékek esetén az érzékenység olyan időjárásfüggő változókkal írható le, amely megmutatja, hogy egyes klímáparaméterek változása mekkora hatást gyakorol az adott távhőellátó rendszer vezeték-infrastruktúrájára. A távhővezetékek klíma- és földtani érzékenysége vizsgálataink alapján (és a rendelkezésre álló adatok függvényében) az alábbi jellemzőkkel írható le: a vezetékek kora; a föld felett vezetett vezetékek hossza és megoszlása (a felszín alattiakhoz viszonyítva); a vezetékek külső védelme (burkoltság, föld felett vagy alatt vezetett); valamint a vezetékrendszer hővesztesége.

A CIVAS-modell sérülékenység-vizsgálatának elvégzéséhez egy komplex érzékenységi indikátorra van szükség, amely integrálja a vezetékeknek összes olyan tulajdonságát, amelyek az éghajlatváltozással szemben sebezhetőbbé teszik az adott rendszert. A Magyar Távhőszolgáltatók Szakmai Szövetsége (MaTáSzSZ) által átadott alapadatok nyomán **kidolgozásra került négy érzékenységi input indikátor:** a távhőrendszer hővesztesége (%); az érzékenység a primer vezetékek típusának megoszlása szerint; az érzékenység a primer vezetékek kora szerint, a védettség típusával súlyozva; az érzékenység a földfeletti vezetékek burkoltsága alapján. Az indikátorok alapjául szolgáló nyers adatokat adatbázisokba helyeztük, ezeket szükség esetén korrigáltuk, bővítettük és súlyoztuk, majd belső egyeztetések során meghatároztuk a végleges alapindikátorokat. Az eredményeket tematikus térképeken ábrázolva is szemléltettük, amelyek további elemzések alapjaként szolgáltak, segítve ezzel a komplex érzékenység és alkalmazkodóképesség leírását. A kapott eredményeket és az ennek megfelelően létrehozott kategóriákat az **13. táblázat** tartalmazza.

Távhőrendszer hővesztesége (%)		
Osztályközök	Pontszám	Érzékenységi kategória
0-9,99	1	kevésbé érzékeny
10-14,99	2	közepesen érzékeny

15-	3	jelentősen érzékeny
Hossz és vezeték típusa		
Osztályközök	Pontszám	Érzékenységi kategória
100-109,99	1	kevésbé érzékeny
110-119,9	2	közepesen érzékeny
120-	3	jelentősen érzékeny
Életkor és védelem		
Osztályközök	Pontszám	Érzékenységi kategória
100-166,6	1	kevésbé érzékeny
166,6-233,3	2	közepesen érzékeny
233,4-	3	jelentősen érzékeny
Felszínfeletti vezeték burkoltsága		
Osztályközök	Pontszám	Érzékenységi kategória
100	1	kevésbé érzékeny
101-210	2	közepesen érzékeny
210-	3	jelentősen érzékeny

13. táblázat: Az érzékenységi komponensek pontszámai és kategorizálása

A távhőrendszer hővesztesége

A távhővezetékek környezeti hő-leadásával kapcsolatban beszélhetünk elosztási hőveszteségről, ami a hőforrási és a hőközponti mérések különbözete, tehát a fogyasztók által vételezett hő mennyisége és a hőtermelőnél miert kiadott hő százalékos különbségét mutatja meg. Mivel a mutató értéke szoros kapcsolatban áll a külső hőmérséklet alakulásával, így az éghajlatváltozásra is érzékeny indikátornak tekinthető; minél nagyobb egy rendszer hővesztesége, annál sebezhetőbb, érzékenyebb további változásokkal szemben. Az indikátor esetében nem volt szükség további súlyozásra vagy egyéb számításokra, a százalékos érték önmagában információértékkel bír, így a jelzőlámpa módszernek megfelelően a kategorizálás elegendőnek bizonyult. A 13. táblázat mutatja, hogy az indikátor esetében nem az egyenlő osztályközök szerint hoztunk létre kategóriákat, mivel az elemszámok megoszlása túlságosan egyenlőtlen lett volna ebben az esetben. Azt láttuk, hogy egy jelentős csoportja a távhőkörzeteknek kisebb aránnyal bír, mint 10%; van egy viszonylag nagyobb elemszám, ami 10-15% közötti értéket vesz fel, ezeket mi egy kategóriával jelentősebb veszteségként értékeltük; valamint a harmadik csoportba a 20% körüli hőveszteségű rendszerek találhatóak relatíve nagy ugrással a közepesen érzékeny kategória legmagasabb értéke felett, így ez a kategória értékkelendő a legérzékenyebbeknek.

Érzékenység a primer vezeték típusának megoszlása szerint

Az éghajlati hatásokkal szemben a primer vezeték típusa is meghatározza adott távhőrendszer érzékenységét, értelemszerűen a viharok és a szélsőséges időjárási események és az ezekkel összefüggésbe hozható földtani veszélyek, folyamatok nagyobb hatást fejtenek ki a fizikailag védtelenebb vezeték tekintetében. A megadott adatok és a partner által megadott kiegészítő információk alapján a primer vezeték négy nagyobb típusba sorolható, eltérő éghajlati érzékenységgel (legjobbtól a leggyengébbig):

- **a közműalagútban/közműfolyosóban vezetett vezeték** – az egyik legjobban, felszín alatti védett kategória, külső, például éghajlati, vízföldtani hatásokkal szemben kevésbé érzékeny;
- **az előreszigetelt, védőcsőben közvetlenül földbe fektetett vezeték hibajelző rendszerrel** – az éghajlati és földtani hatások többségével szemben közel teljes védeltséget élveznek, így kevésbé érzékenyek;

- **a föld felett vezetett, burkolt vezetékek** – ezek általában inkább érzékenyek az éghajlati és kapcsolódó földtani hatásokkal szemben;
- **és a vasbeton védőcsatornába fektetett vezetékek** - az éghajlati és földtani hatások többségével szemben kevésbé védettek, a legérzékenyebb kategória már csak magas átlagéletkoruk miatt is (vezetékorrózió, betonkorrózió lehetősége, ellenőrizhetetlen, jelentős fizikai avulás stb.).

Első lépésként a primer vezetékek típusainak megoszlását kell kiszámolni, így összehasonlíthatóvá válnak az egyes távhőközvetek eszerint. Fontos azonban, hogy - bár az egyszerű kategorizálás is bír információ értékkel – nem elegendő egy lépésben meghatározni az érzékenységet, az adott kategóriába sorolandó vezetéktípus hosszának a vezetékek teljes hosszához való megoszlását is figyelembe kell venni. A súlyozással kiküszöbölhető az ellentmondás, miszerint egy adott kategóriába eső érték túlságosan növelje vagy csökkentse az érzékenységet úgy, hogy az adott típus megoszlása nem indokolja azt. Ezt követően három kategóriát meghatározva, megadjuk minden típus súlyát²⁵ (vezetékek hossza szerint). A súlypontoszámmal megszorozva az arányszámokat megkapjuk a végső értékeket, amelyeket tovább kategorizálva egyenlő osztályközönként a végleges érzékenységi besorolás is elvégezhető. Fontos megjegyezni, hogy a módszer szerint a lehető legkisebb érték 100 lehet, így az osztályközök meghatározásának is ez a szám a kiindulópontja (lásd. 13. táblázat).

Érzékenység a primer vezetékek kora szerint, a védettség típusával súlyozva

Feltételezhető, hogy minél idősebb egy rendszer vezetékhalózatának átlagéletkora, annál érzékenyebb minden külső hatással, így az éghajlati és földtani kitétséggel szemben is. Azonban az egyes primer vezetékek kora önmagában nem elegendő érzékenységi indikátor, hiszen hiába idős egy vezeték szakasz, ha a vezetékek összhosszából megoszlása alacsony.²⁶ Az ellentmondás kiküszöbölésére az adott védettségű vezeték megoszlásával súlyoztunk, így relevánsabb érzékenységi mutató jött létre. Az értékek itt is 100-al kezdődnek, azonban a skála terjedelme nagyobb, mint a vezetéktípus megoszlása esetén, valamint a kapott értékek eloszlása egyenletesebb, így az egyenlő osztályközök megfelelő módszernek bizonyultak a kategorizáláshoz (13. táblázat).

Érzékenység a földfeletti vezetékek burkoltsága alapján

Bár a föld feletti vezetékek típus szerinti kategorizálás során jelentősen érzékenyként kerültek jelölésre, érdemes ezek burkoltsága alapján újra megvizsgálni a kategóriát. A MaTÁSzSZ-től beérkezett információk alapján három nagyobb kategóriát lehet elkülöníteni eltérő érzékenységgel:

- Amennyiben **nincs föld feletti vezeték**, akkor e tekintetben **alacsony érzékenységről** beszélhetünk
- A **fémburkolással (pl. különösen alumínium, de horganyzott acél is)** rendelkező felszíni vezetékeket soroltuk **közepesen érzékeny** kategóriába
- A **műanyag- és egyéb borítással** rendelkező felszíni vezetékek a legkevésbé védettnek tekinthetők, így az **érzékenységet itt magasnak** értékeltük

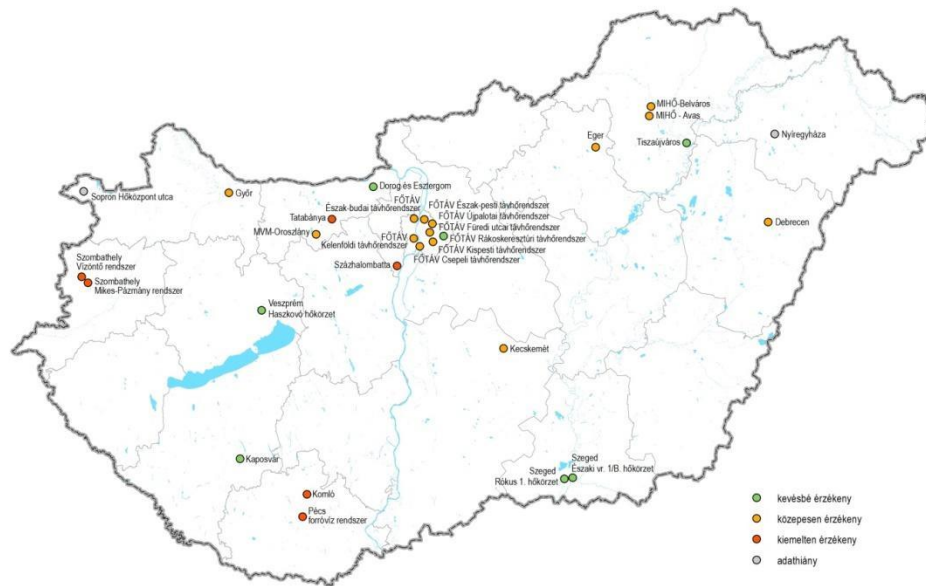
Fontos megjegyezni, hogy ennél az alapindikátornál az adatok nem voltak meg távhőközvetek szerint, csak települési szinten, így az itt kapott értékek egy több távhőközvetet is magába foglaló településen (például Budapest, Miskolc) belül nem mutatják ki a rendszerek közötti különbséget. Mivel nem minden település esetén volt 100%-ban egy típusú borítással fedve a primervezeték-hálózat,²⁷ így a megoszlással súlyozva álltak elő a végső eredmények 100-300-ig terjedő skálán. 100-as értéket csak a

²⁵ A legnagyobb súlyértékkel a felszín felett vezetett vezetékek, míg a legalacsonyabbal az előreszigetelt, közvetlenül a földbe fektetett, illetve a vasbeton védőcsatornába fektetett vezetéktípusok bírtak.

²⁶ Fordítva is ellentmondás, a fiatal vezetékek alapvetően kedvezőbbek, de figyelembe kell venni azt az eshetőséget, ha nagyon hosszú az adott típus az egészhez képest

²⁷ Ezekben az esetekben azért állt elő ez, mert az adott településen több távhőközvet is található, megállapítható, hogy egy távhőközvet esetén is van megoszlás e tekintetben.

”nincs föld feletti vezeték” kategória kaphatott, így kizárólag ez az egy érték jelentett alacsony érzékenységet, ezen értéket meghaladva egyenlő osztályközönként állt elő a másik két kategória (13. táblázat).



21. ábra: A komplex érzékenység alakulása a vizsgált távhőrendszerek tekintetében

A távhőrendszerek komplex érzékenység térképen is ábrázoltuk (21. ábra). Az egyes távhőközrzetek kiterjedéséről nem állt rendelkezésünkre információ, így az adott településhez rendelve, pontszerű ábrázolást alkalmaztunk. Az érzékenység tekintetében kevésbé determináló a földrajzi elhelyezkedés, azonban megfigyelhető, hogy a leginkább érzékeny távhőrendszerek mind a Dunántúlon található. Továbbá látható, hogy a települések tekintetében vannak eltérések: Szombathelyen a Vízöntő rendszer érzékenyebb, mint a Mikes-Pázmány rendszer; valamint Budapesten a Rákosszentimrei távhőrendszer érzékenysége elmarad a többitől. A településeken belüli különbségek igazolják a távhőrendszerek területi léptékként való alkalmazását.²⁸

6.3.4. A vizsgálatba bevonandó alkalmazkodóképességi mutatók és képzésük módszertana

A CIVAS sérülékenység-vizsgálati módszertan szerint az alkalmazkodóképesség azt mutatja meg - jelen vizsgálati tárgykörre alkalmazva - hogy az adott távhőrendszer hogyan tud felkészülni, vagy reagálni a jövőben az éghajlatváltozás várható hatásaival szemben (az éghajlati és földtani kitettség, valamint a rendszer érzékenységéből adódó változások összessége). A rezilienciát növelő alkalmazkodási megoldások jelenthetnek többek közt gazdasági és pénzügyi válaszokat; műszaki tervezést és konkrét intézkedéseket; valamint egyéb kármegelőzéssel vagy utólagos kárelhárítással kapcsolatos tevékenységeket is. Az érzékenységi komponenssel ellentétben, itt nem statikusan egy adott évet jellemző adatokra volt szükség, hanem a közelmúltbeli változást vettük alapul annak érdekében, hogy bizonyos tendenciák alapján lehessen következtetni a jövő kedvező irányú változásaira. A rendelkezésre álló adatok alapján a közelmúltbeli változást a 2019-es év 2010-es értékéhez viszonyított arányában fejeztük ki.²⁹ Az alkalmazkodóképesség tekintetében kevesebb információ áll rendelkezésre, mint az érzékenységnél, végül három alkalmazkodási indikátor létrehozásával hoztuk létre a komplex adaptációs indikátort (14. táblázat).

²⁸ Bár érdemes megjegyezni, hogy nagyobb, két kategórián átívelő különbségek nem jelentkeztek egy adott településen belül.

²⁹ Néhány kivételtől eltekintve, ahol a legkorábbi adat 2012-es volt, így azt alkalmaztuk bázisvéként.

Szekunder távhővezetékek arányának csökkenése a primer vezeték arányában (%)		
Osztályközök	Pontszám	Érzékenységi kategória
nincs változás vagy növekedés	1	gyengén alkalmazkodó
kismértékű csökkenés (0-5%)	2	közepesen alkalmazkodó
jelentős csökkenés (5% felett)	3	jól alkalmazkodó
Felhasználói hőközpontok számának változása (%)		
Osztályközök	Pontszám	Érzékenységi kategória
nincs változás	1	gyengén alkalmazkodó
maximum 20%-os növekedés	2	közepesen alkalmazkodó
20%-os növekedés felett	3	jól alkalmazkodó

14. táblázat: Az egyszerű változással kifejezett alkalmazkodóképességi indikátorok

Szekunder távhővezetékek arányának csökkenése a primer vezeték hosszához viszonyítva

A partnerek elmondása szerint, a szekunder vezeték jobban kitettek az éghajlatváltozással szemben abban a tekintetben, hogy a szolgáltatói hőközpontokból hőcserélőn átadott hő miatt növelheti a hővesztésüket azok magas aránya. Ebből kiindulva minél inkább csökkent a szekunder vezeték aránya a primer vezetékhez képest a közelmúltban - tehát az átállás alapvetően szekunder vezeték hosszának csökkenésével, a primer vezeték hosszának növekedése felé ment végbe – annál inkább alkalmazkodni tud a jövőben a rendszer az éghajlatváltozás káros hatásaival szemben. Az osztályközöket alapvetően a nagyobb töréspontok határozták meg (lásd. 14. táblázat), figyelembe véve, hogy egyes rendszereknél nem indult el még ilyen irányú változás (egyes esetekben még nőtt is a szekunder vezeték aránya), így e rendszereknek egy külön kategóriát kellett képeznie, értelemszerűen a gyengén alkalmazkodó rendszerek közé sorolva azokat.

Felhasználói hőközpontok számának változása

A hőközpont a távhőrendszerek hőhordozó közeg kiadására, elosztására, fogadására, átalakítására, mennyiségi szabályozására, illetőleg a távhő átadására szolgáló technológiai berendezés (MaTáSzSz). Ezen belül megkülönböztetünk termelői, szolgáltatói és felhasználói hőközpontokat, melyek közül utóbbi kettő szolgál a hőhordozó közeg fogadására, így ezt a két típust érdemes összehasonlítani. A kettő közül egyértelműen a felhasználói hőközpontok tekinthetők kevésbé érzékenyek, mivel azok jellemzően csak egy épület (vagy építmény) hőellátását végzik, így meghibásodásuk esetén kisebb lehet a távhőrendszer szempontjából a kiesés és sérülés esetén a veszteség. Emellett kisebb a hővesztésük rendszerszinten, ha a szekunder vezeték mellett a szolgáltatói hőközpontok is kiváltásra kerülnek egyes épületekbe telepített felhasználói hőközpontokkal. Ennek logikája mentén releváns alkalmazkodóképességi indikátor a *felhasználói hőközpontok arányának növekedése* egy rendszeren belül. Ezen indikátor esetében is külön kezelendők a gyengén alkalmazkodónak értékelt, változás nélküli rendszerek. A másik két kategóriába sorolást a kiugró értékek mentén kezeltük, amit 20%-os növekedésnél határoztunk meg (14. táblázat).

Védett primer vezeték arányának közelmúltbeli változása

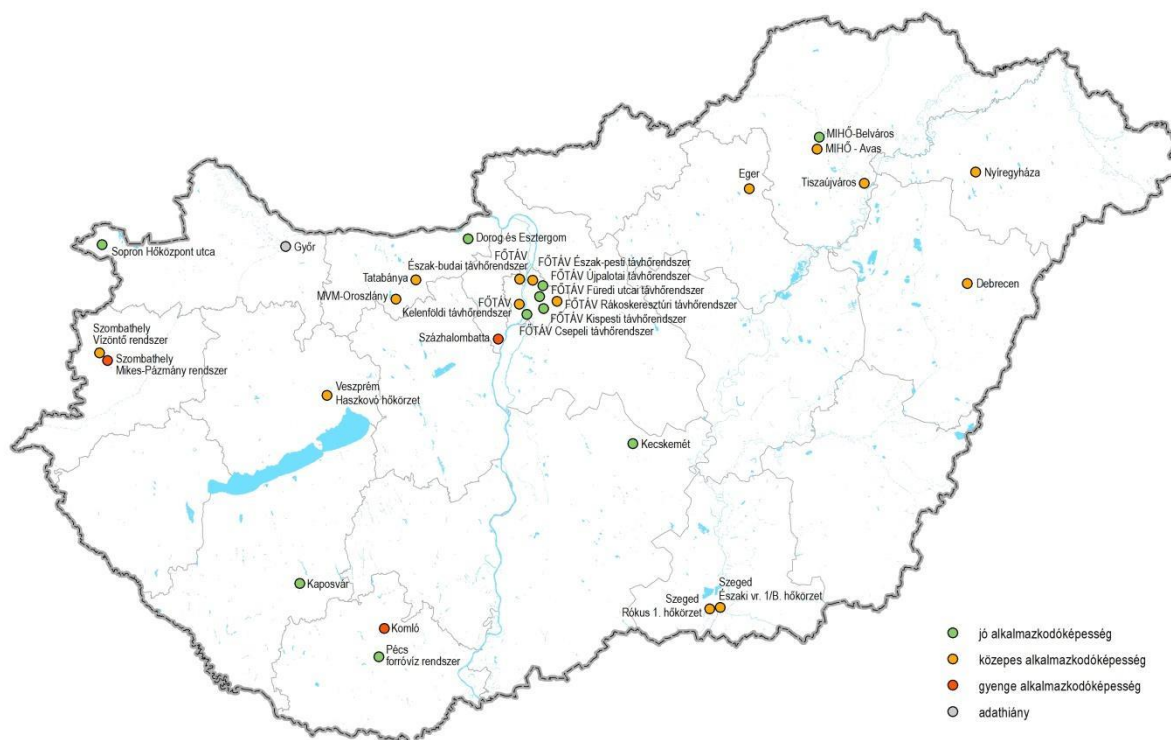
A védett primer vezeték közé azok a típusok sorolandók be, amelyek az érzékenység komponensnél a kevésbé érzékeny kategóriába tartoztak: *előreszigetelt, közvetlenül földre fektetett vezeték; és a védett közműalagútban fektetett vezeték*. Amennyiben egy távhőrendszer esetén nőtt az előbbi két típus vezetékének aránya az összes vezeték hosszához viszonyítva, feltételezhető, hogy az üzemeltetők tudatosan a külső hatásokkal szembeni védelmet figyelembe véve cselekedtek, és a jövőben tovább nőhet a vezeték védettsége. Azonban itt sem lehet figyelmen kívül hagyni a jelenlegi állapotot (legfrissebb rendelkezésre álló adatok alapján 2019): ha a csökkenő tendencia ellenére még mindig magas a föld feletti vezetett- vagy a vasbeton védőcsatornában vezetett vezeték aránya,

akkor az alkalmazkodóképesség nem egyezik meg azzal az esettel, amikor a közelmúlt változásai miatt már a kevésbé védett vezetéktípusok csekély arányáról, illetve teljes megszűnéséről beszélhetünk. Ez esetben az adott távhőrendszernek további tennivalói vannak az adaptáció tekintetében. Ennek megfelelően ezen alkalmazkodóképességi indikátorhoz is súlyozást alkalmaztunk, egy mátrix táblázathoz rendeltük hozzá az értékeket és így kerültek egy előre meghatározott kategóriába az adott pontszámhoz tartozó távhőkörzetek (15. táblázat).

Védett primer vezetékek arányának közelmúltbeli változása (%)				
pontérték				
Kevésbé védett vezetékek aránya (felszín felett- és vasbeton védőcsatornában vezetett)	10% felett	2	2	1
	5-10%	3	2	2
	0-5%	3	3	3
		160-350	100-160	100
Modern/felszín alatti vezetékek változásának aránya (%)				

15. táblázat: Az alkalmazott mátrix, a védettség alakulásának alkalmazkodóképességi indikátorához

A mátrix logikája alapján a nagymértékű javulás mindenképp értékelendő az alkalmazkodóképesség szempontjából. Ahol a változás hiánya abból következik, hogy már eleve a bázisévben is teljes- vagy nagymértékben magas védettségű vezetékek futottak, az alkalmazkodóképesség gyakorlatilag már most megvalósult e tekintetben. Egyetlen esetben értékeltük az alkalmazkodóképességet gyengének, amikor egy relatíve magas, kevésbé védett arányhoz képest még egyáltalán nem látszik elmozdulás a védettség javítására, minden más esetben – kivéve az eddig felsorolt jól alkalmazkodó változatoknál – közepes alkalmazkodóképességet állapítottunk meg.



22. ábra: Az alkalmazkodóképesség komplex indikátora a vizsgált távhőrendszerek tekintetében

A távhőrendszerek alkalmazkodóképessége - hasonlóan az érzékenységhöz- kizárólag a Dunántúlon mutat kiemelkedően alacsony értékeket. Azonban a települések között vannak eltérések, illetve az egyes településeken belüli különbségek is kirajzolódnak. Fontos megállapítás, hogy Budapest távhőrendszereinek alkalmazkodóképessége jellemzően növekedett a közelmúltban, így a jövőre nézve is kedvező lehet az adaptáció alakulása. A Szombathelyi-, a Komlói- és a Százhalombattai rendszerek egyszerre mondhatók érzékenynek és kevésbé alkalmazkodónak, így ezek sérülékenysége várhatóan magas lesz.

6.3.5. A várható hatások és sérülékenység értékelése (az „egyedi” és aggregált hatás- és sérülékenységi mutatók számítása), további vizsgálati irányok

A várható hatás mutatók az összetartozó kitétség és érzékenység mutatók külön-külön történő, majd együttes kiszámításával majd értékelésével állnak elő. Az előbbi elemzés a hatásláncokban rögzített indikátorok számításával majd általános és területi elemzésével, térképezésével különösen fontos. Így az éghajlati kitétségé kétféle forgatókönyv, hatféle modellszimuláció eredménye, ezért ebben az esetben összesen 12 mutató állt elő minden egyes vizsgált éghajlati indikátor esetén. A földtani kitétségi mutatók 10 tematikája 10 különféle indikátor képzését teszi lehetővé, továbbá még egyet az aggregált, dimenzió nélküli földtani kitétségi jelzőlámpa mutatót. Az érzékenység esetén a négy résztematika képzett mutatóit és az aggregált, dimenzió nélküli érzékenységi mutatót alkalmazzuk. A várható hatásmutatók számításánál az összetartozó éghajlati kitétség, földtani kitétség és érzékenység mutatók összesorzására kerül sor az alábbiak szerint.

$$H_i = E_i * \text{ÉK}_i * FK_i$$

ahol:

H_i=várható hatás az i-edik távhőközvet távhővezetékei esetében

E_i=érzékenység az i-edik távhőközvet távhővezetékei esetében

ÉK_i=éghajlati kitétség az i-edik távhőközvet távhővezetékei esetében

FK_i=földtani kitétség az i-edik távhőközvet távhővezetékei esetében

Az éghajlati és földtani sérülékenység számítás során egy adott felszíni rendszerelem sérülékenysége az aggregált várható hatás és aggregált alkalmazkodó képesség (inverz) mutató szorzatának eredménye.

$$S_i = AH_{norm_i} * AAK_{norm_i}$$

S_i = sérülékenység az adott felszíni rendszerelem esetében

AH_{norm_i} = normalizált aggregált hatás az i-edik felszíni rendszerelem esetében

AAK_{norm_i} = normalizált (inverz) aggregált alkalmazkodó-képesség az i-edik felszíni rendszerelem esetében

A későbbiekre még további vizsgálati irány lehet: a földtani térkép részletességének, méretarányának növelésével, településgeológiai szintig javasolható a távhővezetékek érzékenységek pontozásánál az adatokat vezeték szakaszonként részletesebben figyelembe venni. Ennek feltétele ilyen irányú vizsgálati eredmények, adatok rendelkezésre állása, illetve az adott vizsgálatok elvégzése. Emellett felvethető e vizsgálatnál rendelkezésre nem álló témák, mutatók vizsgálata például földrengés-veszélyeztetettség, vagy biológiai korrózió területi jellemzői.

Az időjárás és földtani kitétség vizsgálat módszertanához megjegyezhető, hogy a nagyobb léptékű kitétségi vizsgálatok mellett indokolt lehet a településeken belüli lokális eltérések, anomáliák

hatásainak részletesebb feltérképezése, vizsgálata is (például egy későbbi vizsgálat keretében). Továbbá fontos lehet a földtani hatásokhoz nem sorolt, víz elöntések kérdése. Adott esetben magas talajvízre és mély fekvésre vissza nem vezethető, inkább extrém időjárási hatások és lokális csapadékvezetési problémák okozta elöntések tartozhatnak ide. Ennek feltétele a nagy részletességű, nagy felbontású éghajlati, földtani/település- és mérnökgeológiai, érzékenységi alapadatok elérhetősége, amely jelen vizsgálatban sajnos nem volt adott.

A későbbiekben javasolt lehet még, a villamos átviteli hálózatokhoz hasonlóan, az alapadottsági érzékenységek között a tartószerkezetek, főleg tartóoszlopok érzékenységeinek taglalása. Ezek a műtárgyak (mögleghetősen nagy számban vannak jelen még manapság is), főleg vasbetonból készültek, és ki vannak téve az időjárás hatásainak egyéként is, a betonkorrózióknak, kockázati tényezőknak számítanak és a jelentős hatásaik miatt feltétlenül kezelendők. A probléma nagyon hasonló az átviteli hálózatok tartóoszlop problémáihoz, az ott alkalmazott módszertan szinte változtatás nélkül használható a távhővezetékeknél is. Természetesen ehhez a távhőközeteken belüli vezetékszszakaszok tartószerkezeti- és tartóoszlopokra vonatkozó adataira van szükség, amely lokális felméréseket igényel.

7. Felhasznált irodalom:

a. Jogszabályok és stratégiai dokumentumok:

- **2008/114 EK irányelve** az európai kritikus infrastruktúrák azonosításáról és kijelöléséről, valamint védelmük javítása szükségességének értékeléséről
- **2012. évi CLXVI. számú törvényt (Lrtv.)** a létfontosságú rendszerek és létesítmények azonosításáról, kijelöléséről és védelméről
- **374/2020. (VII.30.) Korm. rendelet** Az energetikai létfontosságú rendszerek és létesítmények azonosításáról, kijelöléséről és védelméről
- **65/2013. (III. 8.) Korm. rendelet.** a létfontosságú rendszerek és létesítmények azonosításáról, kijelöléséről és védelméről szóló 2012. évi CLXVI. törvény végrehajtásáról
- **2005. évi XVIII. törvény** a távhőszolgáltatásról
- **157/2005 (VIII. 15.) Korm. rendelet** a távhőszolgáltatásról szóló 2005. évi XVIII. törvény végrehajtásáról
- **2008. évi XL. törvény** a földgázellátásról
- **1993. évi XLVIII. törvény** a bányászatról
- Nemzeti Energia és Klímaterv (NEKT)
- Nemzeti Energiastratégia 2030, kitekintéssel 2040-ig (NES 2030)
- NÉS 2 megújított Nemzeti Éghajlatváltozási Stratégia (NÉS-2)

b. Szakirodalom:

- Audinet, P., Amado, J.C., Rabb, B. (2014). Climate risk management approaches in the electricity sector. *Weather Mat. Energy* 17 (1), 17-64.
- Balázs Gy., Kausay T., Kopecskó K., Nemes R., Salem, N.G., Lublós É, Józsa Zs., Arany P. (2017): Betonok oldódásos korróziója – szakirodalmi áttekintés – Vasbetonépítés, 2017/3., pp. 46-59.
- Balla, L. (2014): Energiagazdálkodás. Miskolci Egyetem Földtudományi Kar, MFKGT5066.
- Bartos, M., Chester, M. (2015). Impacts of climate change on electric power supply in the western United States. *Nature Climate Change* 5(8), 748-752.
- Bartos, M., Chester, M., Johnson, N., Gorman, B., Eisenberg, D., Linkov, I., Bates, M. (2016). Impacts of rising air temperatures on electric transmission ampacity and peak electricity load in the United States. *Environ. Res. Lett.* 11, 114008.
- Burillo, D. (2018). Effects of Climate Change in Electric Power Infrastructures, Power System Stability. Kenneth Eloghene Okedu, IntechOpen. DOI: 10.5772/intechopen.82146
- Cruz, A.M., Krausmann, E. (2013). Vulnerability of the oil and gas sector to climate change and extreme weather events. *Climatic Change* 121, 41-53.
- Dai, F.C., Lee C.F., Ngai, Y.Y. (2002): Landslide risk assessment and management: an overview - *Engineering Geology* 64, pp. 65–87.
- FGSZ-MEKH (2019.): A magyar földgázrendszer 2018. évi adatai. http://www.mekh.hu/download/9/ff/b0000/a_magyar_foldgazrendszer_2018_evi_adatai.pdf (A letöltés ideje: 2020. december 3.)
- FICÉP (2019): A magyarországi villamosenergia-ellátás éghajlati szempontú értékelése. https://nater.mbfsz.gov.hu/sites/nater.mfgi.hu/files/files/FICEP_NATeR_villamosenergia_serulek_enyseg_tanulmany.pdf (Letöltés ideje: 2020. július 1.)
- Flentje, P., Chowdhury, R. (2001) Landsliding in an urban area – Photographic Feature
- Fodor T-né, Kleb B. (1986): Magyarország mérnökgeológiai áttekintése – MÁFI, Budapest, p. 201
- Geogold Kárpátia Kft. (2019 a): A távhőellátás éghajlati szempontú értékelése. https://nater.mbfsz.gov.hu/sites/nater.mfgi.hu/files/files/NATeR_Tavhoellatas_tanulmany.pdf (Letöltés ideje: 2020. szeptember 15.)
- Geogold Kárpátia Kft. (2019 b): A gázellátás éghajlati szempontú értékelése. https://nater.mbfsz.gov.hu/sites/nater.mfgi.hu/files/files/NATeR_gaz_tanulmany.pdf (Letöltés ideje: 2020. szeptember 15.)

- Gibson, A.D. et al. (2005): Rapid Geohazard Assessment System for the UK Natural Gas Pipeline Network - http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/7355/1/Lyon_Pipeline_Assessment_Paper.pdf
- Guan, H., Beecham, S., Xu, H., Ingleton, G. (2017). Incorporating residual temperature and specific humidity in predicting weather-dependent warm-season electricity consumption. *Environ. Res. Lett.* 12, 024021.
- Hervás, J. (ed)(2003): Lessons Learnt from Landslide Disasters in Europe – European Communities, p. 102
- Highland, L.M., Bobrowsky, P. (2008): The Landslide Guidebook – A Guide to Understanding Landslides – USGS-GSC; p. 42.
- IPCC (2007): Climate Change 2007 – The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. (ISBN 978 0521 88009-1 Hardback; 978 0521 70596-7 Paperback).
- IPCC AR4 WG1 (2007). Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds.: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p.
- IPCC AR5 WG1 (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (eds.: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O.B., Bouwer, L.M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., van Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change* 14, 563–578.
- Klein, D.R., Olonscheck, M., Walther, C., Kropp, J.P. (2013). Susceptibility to the European electricity sector to climate change. *Energy* 59, 183-193.
- Klein, D.R., Olonscheck, M., Walther, C., Kropp, J.P. (2013). Susceptibility to the European electricity sector to climate change. *Energy* 59, 183-193.
- MATÁSZSZ-MEKH (2019): A magyar távhőszektor 2018. évi adatai. MATÁSZSZ-MEKH. Budapest.
- MEKH-MAVIR (2019): A magyar villamosenergia-rendszer (VER) 2018. évi adatai. (HU ISSN 2560-1172)
- Michaelowa, A., Connor, H., Williamson, L.E. (2010). Use of indicators to improve communication on energy systems vulnerability, resilience and adaptation to climate change, in: A. Troccoli (Ed.), *Management of Weather and Climate Risk in the Energy Industry*, Springer, 69–87.
- Moftakhari, H., AghaKouchak, A. (2019). Increasing exposure of energy 214 infrastructure to compound hazards: cascading wildfires and extreme rainfall. *Environ. Res. Lett.* 14, 104018.
- Mosonyi E., Papp F. (1959): Műszaki földtan (Mérnökgeológia) – Műszaki Könyvkiadó, Budapest, p. 276-277.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren D.P., Carter T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P., Wilbanks, T.J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756.
- Pálvölgyi, T., Hunyady, A. (2008): Common methodological framework of CLAVIER Impact Case Studies (in: Database on the statistical-empirical interrelations between the high resolution climate indicators and the parameters of impact issues). (CLAVIER Report, www.clavier-eu.org)

- Pálvölgyi, T., Czira, T., Dobozi, E., Rideg, A., Schneller, K. (2010): A kistérségi szintű éghajlat-változási sérülékenységi-vizsgálat módszere és eredményei. Klíma-21” Füzetek: Klímaváltozás – Hatások – Válaszok, 2010. 62. szám 88–102. pp
- Percebois, J. (2007). Energy vulnerability and its management. International Journal of Energy Sector Management 1 (1), 51-62.
- Rotárné Szalkai, Á., Homolya, E., Selmeczi, P. (2016): Az ivóvízbázisok klíma sérülékenysége. Hidrológiai Közlöny
- Sütő, A. (szerk.) (2016a): Éghajlatváltozás és alkalmazkodás A Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszer (NATÉR) kialakítása. Magyar Földtani és Geofizikai intézet, Budapest https://nater.mbfisz.gov.hu/sites/nater.mfisz.hu/files/files/NAT%C3%A9R_PR_HU_honlapra.pdf (Letöltés ideje: 2020. szeptember 16.)
- Sütő, A. (szerk.) (2016b): Nemzeti Alkalmazkodási Térinformatikai Rendszer. Összegző tanulmány. Magyar Földtani és Geofizikai intézet, Budapest https://nater.mbfisz.gov.hu/sites/nater.mfisz.hu/files/files/Osszegzo_HU.pdf (Letöltés ideje: 2020. szeptember 16.)
- Stefanovits Pál (1999): Talajtan. Mezőgazda Kiadó, Budapest.
- Swiss Re – Johns Hopkins University (2017): Lights out : The risks of climate and natural disaster related disruption to the electric grid – A report by Johns Hopkins University, School of Advanced International Studies, Energy, Resources and Environment Student Practicum, p. 36
- Szabó Elemér (2009): A környezeti mutatók képzésének alapelvei és alkalmazásának lehetőségei. Doktori értekezés. <http://tgf.elte.hu/upload/doktori/szaboelemerdisszertacio.pdf> (Letöltés ideje: 2020. szeptember 20)
- Szabó, É. E. (2012): Környezet és klímavédelem alapjai. Edutus Főiskola. https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0017_16_klimastrategiak/ch03.html#id510832 (Megtekintés ideje: 2020. szeptember 15)
- Szabó J. (2008): A csuszamlásos folyamatok geomorfológiai kutatása Magyarországon különös tekintettel a sebesség kérdésére – in: Kiss T., Mezősi G. (ed.)(2008): Recens geomorfológiai folyamatok sebessége Magyarországon – Szegedi Egyetemi Kiadó, Juhász Gyula Felsőoktatási Kiadó, Szeged, pp. 131-141.
- Szabó, P., Szépszó, G. 2016. Quantifying Sources of Uncertainty in Temperature and Precipitation Projections over Different Parts of Europe. In: Mathematical Problems in Meteorological Modelling. Mathematics in Industry (eds.: Bátkai, A., Csomós, P., Faragó, I., Horányi, A., Szépszó, G.), Springer International Publishing, 207–237.
- Tereshchenko, T., Nord, N. (2016). Importance of Increased Knowledge on Reliability of District Heating Pipes. Procedia Engineering 146, 415-423.
- Tildy P. et al. (2019): A földtani veszélyforrások éghajlatvédelmi szempontú értékelése - Szakmai zárójelentés, NATÉR2, MBFSz, Budapest.
- Y. Yin; K. Zhang; X. Li (2006): Urbanization and land subsidence in China (valószínűleg konferenciakiadvány, részletek nem ismertek)
- van Vliet, M.T.H., Yearsley, J.R., Ludwig, F., Vogeles, S., Lettenmaier, D.P., Kabat, P. (2012). Vulnerability of US and European electricity supply to climate change. Nature Climate Change 2 (9), 676-681.
- World Bank (2017): Sierra Leone: rapid damage and loss of August 14th, 2017 landslides and floods in the western area – Report, p. 118
- Zamuda, C., Antes, M., Gillespie, C.W., Mosby, A., Zotter, B. (2015). Climate change and the U.S. energy sector: regional vulnerabilities and resilience solutions. Washington, DC, U.S. Department of Energy.