

# LÉGKÖRI JEGESEDESNEK KITETT VILLAMOS TÁVVEZETÉKEK NUMERIKUS VIZSGÁLATA

KÁLMÁN TAMÁS

PhD, projektmenedzser. GEA EGI Energiagazdálkodási Zrt. 1117 Budapest, Irinyi József u. 4–20.  
Tel.: (+36-30) 822-3460; fax: (+36-1) 225-6264. E-mail: [tamas.kalman@gea.com](mailto:tamas.kalman@gea.com)

Azokban az országokban, ahol a légköri jegesedés gyakorta okoz komoly károkat a mérnöki építményekben, komoly hangsúlyt fektetnek e tudományterület alapos megismerésére és olyan technológiák, eljárások kifejlesztésére, amelyekkel a katasztrófák elkerülhetőek vagy legalábbis hatásuk mérsékelhető. A mérnöki építmények egyik ilyen, légköri jegesedésnek kitett szegmense a villamos energiaátviteli hálózatokon alkalmazott berendezések, szerkezetek. Ezen építmények megrongálódásáért a téli időszakban gyakran felelős a szerkezetekre rakódó jég, tapadó hó vagy zúzmara. Jelen tanulmány általános összefoglalót kíván adni a villamos energiaátviteli hálózatot érintő légköri jegesedésről és egy olyan eljárásról, mellyel a távvezetésekre rakódott jég mechanikus erő, azaz ütés hatására eltávolítható. A szerző egy olyan eljárást dolgozott ki a jeges távvezetékek numerikus vizsgálatára, mely modellezi az ütés hatására bekövetkező jég hullás okozta dinamikus hatásokat, úgy, hogy figyelembe veszi a kábelre rakódott jég mechanikai tulajdonságait. A szerző Kanadában, a CIGELE kutatócsoport keretében végzett PhD tanulmányainak eredményét használta fel jelen tanulmány megírására, kiegészítve azt a témában az óta elért új tudományos eredményekkel.

**Kulcsszavak:** villamos távvezeték, légköri jegesedés, dinamikus vizsgálat, végeelem-modell

## 1. BEVEZETÉS

Egyre világosabb tudományos eredmények vannak arra vonatkozóan, hogy a föld légköre jelentős változáson megy keresztül, mely – komplex folyamatok révén – összességében klímaváltozáshoz vezet. A klímaváltozás következtében az extrém időjárási jelenségek kockázata – számos egyéb jelenséggel együtt – növekszik. Így hideg klímájú területeken egyre növekedhet a légköri jegesedés okozta problémák gyakorisága.

Hideg klímájú területeken a légköri jegesedés egy gyakori jelenség, melyet hagyományosan kétféle képződési folyamat alapján osztályozunk; megkülönböztetünk felhőn belüli és csapadékból származó jegesedést. Főleg a felszín tereptárgyain mikro- vagy makrocsepdek által okozott jeges lerakódás formájában figyelhető meg, általában 0 és  $-10$  °C közötti, vagy néha annál alacsonyabb hőmérsékleten. A felszíni jegesedés leggyakoribb megjelenési formája a (atmoszferikus) jég, zúzmara (durva vagy finom), tapadó hó, száraz hó és a dér. A felszíni jegesedés megjelenési formáját és annak mértékét nagymértékben befolyásolja a környezeti hőmérséklet, szélesebes-

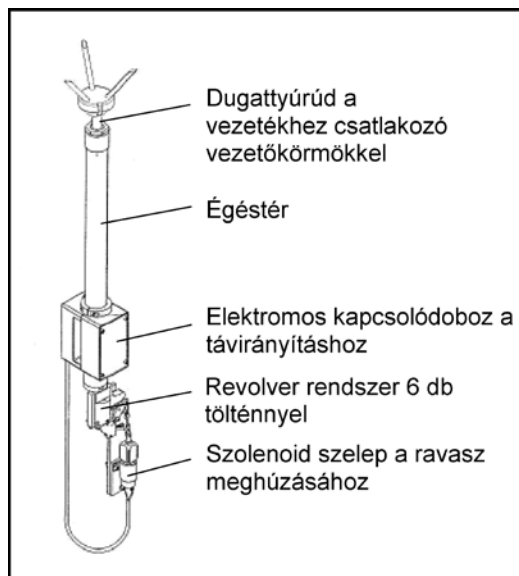
ség, a levegő nedvességtartalma és a csapadék cseppmérete. Ezek a különböző típusú jegesedési formák, képződmények más és más tulajdonságokkal bírnak (Kálmán 2007).

Jelen tanulmány a légköri jegesedés többféle formája közül kifejezetten a jégre koncentrálna, mely leggyakrabban ónos eső formájában hulló csapadékból pár óra leforgása alatt jelentős mennyiségben tapadhat a villamos energiaátviteli hálózat berendezéseire, szerkezeteire. A szerkezetekre, villamos távvezetésekre tapadó jég számos mechanikai és elektromos probléma forrása lehet. Csupán néhány mechanikai problémát megemlítve: a távvezetésekre és tartószerkezetekre rakódó jég nehéz tömege, párosulva az egyidejűleg jelentkező szélterheléssel, komoly szerkezeti meghibásodásokhoz, törésekhez, vezetészakadásokhoz vagy akár a tartóoszlopok kaszkád töréseire vezethet.

Abban az esetben, amikor a vezetésekre tapadt jég arról valamilyen módon leesik, kialakul az ún. jég hullás jelensége, melyet összességében a szerkezetre tapadt jég tömegének valamilyen módú csökkenése jellemez. Három ilyen mechanizmust különböztetünk meg: jégolvadás, jég szublimáció, valamint mechanikai jégtörés (Kálmán 2007). Mechanikai jégtörés – melyre jelen tanulmány fókuszál – létrejöhet egy külső erő hatására (akár valamely más tárggyal való véletlen ütközésből, akár abból a szándékból, hogy a jeget eltávolítsák).

Annak érdekében, hogy a villamos energiaátviteli hálózatot megvédjék a jég okozta – akár elektromos, akár mechanikai – terheléstől, számos olyan módszert alkalmaznak világszerte, mely megelőzi a távvezetékek jegesedését, vagy eltávolítja a már a vezetésekre tapadt jeget (Kálmán 2007). A leggyakrabban alkalmazott módszer a jég leolvasztása, mely azonban többnyire csak nagyfeszültségű hálózatokon alkalmazható. Középfeszültségű hálózatokon, valamint a földelő vezetéseken jégolvasztás gazdaságosan gyakorlatilag nem valósítható meg. Ezért a québeci áramszolgáltató, Hydro-Québec számos olyan mechanikai eljárást fejlesztett ki és használ, mely a földelő vezetésekre rakódott jeget hivatott eltávolítani. Az egyik ilyen kifejlesztett eszköz (*1. ábra*), mely jelen tanulmány megszületését inspirálta, mechanikai ütést használ a jég eltávolítására kihasználva a jég nagy alakváltozási sebességen tapasztalható rideg törékeny tulajdonságait. A fejlesztők szándéka szerint ezzel az eszközzel egyszerre egy feszítávnyi vezetésekről lehet a jeget eltávolítani (Leblond et al. 2005).

A tanulmány célja az volt, hogy megértsük az ütést okozta jég hullás távvezetékekre gyakorolt dinamikus hatásait egy véges elem-módszerrel kifejlesztett numerikus modell segítségével. Ezért ebben a tanulmányban a távvezetékét érő mechanikai ütést egy külső, impulzus típusú erőhatásból származik, mely a vezetésekre tapadt jeget szándékozik eltávolítani. Ilyen dinamikus terhelés azonban származhat spontán, hirtelen jég hullásból, vezetészakadásból vagy valamilyen tartó komponens (pl. állószigetelő) töréséből eredő aszimmetrikus terhelésből is. Míg korábbi numerikus modellfejlesztések (Jamaledine et al. 1993; Roshan Fekr 1995; McClure–Lapointe 2003) során a vezeték azonnali jég hullásra adott válaszát tanulmányozták, ez a tanulmány a jég hullás nyomvonal irányú fokozatos terjedésének hatását vizsgálta (Kálmán 2007; Kálmán et al. 2005; 2007a; 2007b).



**1. ábra.** Hydro-Quebec által fejlesztett jégeltávolító eszköz sematikus rajza  
(Forrás: Leblond et al. 2005)

Magyarországon is okozott már problémát a távvezetékek jegesedése, mely komoly üzemzavarok formájában nyilvánult meg (Szabó–Farkas 2009; Pekánovics et al. 2011; Index 2014). Hazai megfigyelések szerint, mechanikai túlterhelés esetén a tartószerkezet leggyengébb eleme az oszlop (Pekánovics et al. 2011). Ezért kísérletek folytak olyan konstrukciók kialakítására, melyek extrém időjárási körülmények között bekövetkező üzemzavar esetén csökkentik az oszlopra ható nyomvonal irányú többletterhelést meghibásodásra kitüntetett elemek, valamint rugalmasabb hálózati konfigurációk kialakításával (Pekánovics et al. 2011). A jelen tanulmányban javasolt numerikus modell alkalmazása, esetleges továbbfejlesztése a hazai villamos energiaátviteli hálózat fejlesztői, tervezői számára is hasznos eszköz lehet.

## 2. A NUMERIKUS MODELL

A korábbi idegen nyelvű publikációimban (Kálmán et al. 2005; 2007a; 2007b) részletesen bemutattam a kereskedelmi forgalomban kapható, ADINA rendszerben fejlesztett végeselem-modellt, mely a jeges kábelt szimulálja és új megközelítésként a jégtörés feltételét is a modellbe integrálja. Ez a modell alapul szolgált arra, hogy a jég törési feltételét tanulmányozzuk az alakváltozás okozta feszültség függvényében, mely magába foglalja mind az axiális, mind pedig a hajlító hatásokat. Ebben a fejezetben bemutatom a numerikus modellt. A fejezet végén pedig a PhD tanulmányaim

befejezése óta a modell továbbfejlesztésében mások által elért új eredményeket, numerikus megközelítéseket is ismertetem.

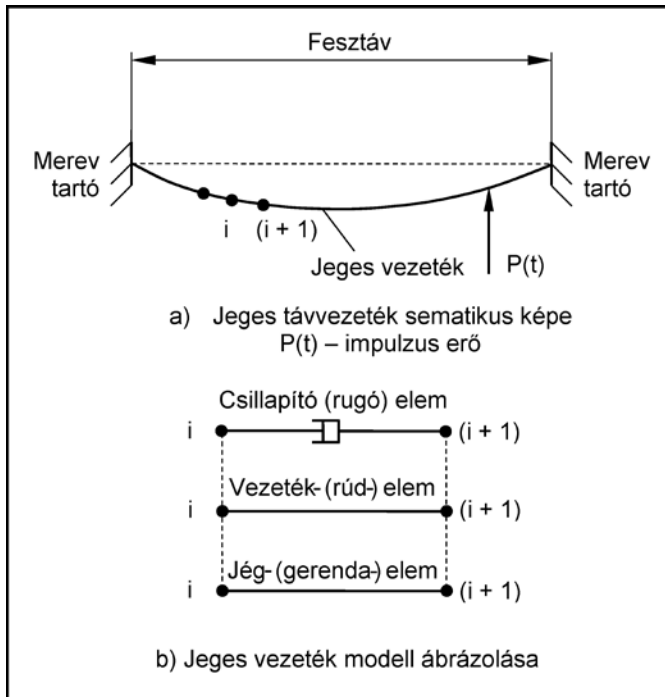
## 2.1 A TÁVVEZETÉK MODELLEZÉSE

Korábbi numerikus modellfejlesztések (Jamaledine et al. 1993; Roshan Fekr 1995; McClure–Lapointe 2003) jó tapasztalatai alapján a modellt feltételezi, hogy a vezeték hajlításra és csavarásra teljesen rugalmas. Ezért 3D-s, két csomópontú, izotrop rúd-elemmel modelleztem úgy, hogy a modell a teljes Lagrange-formulát használja nagy kinematikai elmozdulással, de kis alakváltozással. Minden vezeték-elemnek négy szabadságfoka van, ami megfelel az elem végeinek vízszintes és függőleges irányú eltolódásával. A vezeték anyagát tekintve lineárisan rugalmas, és csak húzásra van igénybe véve, így biztosítja azt, hogy a vezeték bármikor elernyedjen, ha az előfeszítő erő megszűnik. A végelemek sűrűségét és az időlépést úgy választottam meg, hogy biztosítsa az ütés, valamint az általa generált hullám terjedésének megfelelő mintavételezést a modell integrációs pontjain keresztül. A vezeték kezdeti előfeszítését előzetes statikai számításokból határozom meg (Kálmán 2007).

## 2.2 A VEZETÉKRE TAPADT JÉG MODELLEZÉSE

A vezetékre tapadt jeget egy, a vezetékkel párhuzamos, különálló gerenda-elemmel modelleztem (2. ábra). A 3D-s, izotrop gerendaelem, képlékeny anyagjellemzőkkel megfelelően bizonyult a feladatra. Minden gerendaelemnek hat szabadságfoka van, ami megfelel az elem végeinek vízszintes és függőleges irányú eltolódásával, ill. síkbeli elfordulásával. Mivel ADINA-ban az izotrop gerendaelemhez csak négyszögletes keresztmetszetet lehetett használni a nemlineáris anyagmodellekhez, így a jeget képviselő gerendaelem keresztmetszetét úgy határoztam meg, hogy azonos hajlítómerevséget és keresztmetszeti területet eredményezzen a vezetékre rakódott, idealizált keresztmetszetű jég hajlítómerevségével és keresztmetszeti területével (3. ábra). A tartócsomópontokban a modell semmilyen elmozdulást nem enged meg. Így annak érdekében, hogy a modell a jég gerendaelem ebből eredő zavaró merevítő hatását kiküszöbölje, a tartócsomópontok mellett jég gerendaelemeket nem definiáltam.

Ezen felül két alternatív jégelem használatának lehetőségét is megvizsgáltam, úgy, mint a 2D-s, sík feszültségű, izotrop gerendaelem, valamint a csőelem. Mindkét elem megfelelően bizonyult a feladatra. A 2D-s, sík feszültségű, izotrop gerendaelem használata nagymértékben csökkenti a modell futásidőjét. Azonban ennek az elemnek a használatával kapott eredményeket körültekintően kell értékelni akkor, amikor a modell részleges jégtörést prognosztizál. Ennek az elemnek a használata hajlamos a nyírófeszültséget túlbecsülni a húzófeszültséggel szemben, és így kiala-

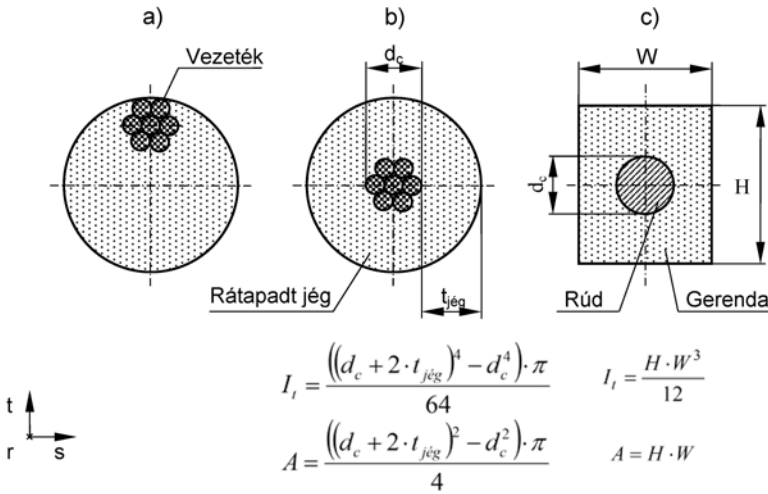


2. ábra. Jeges vezeték sematikus modellképe

kul az ún. „shear locking” hatás (Kálmán 2007; Kálmán et al. 2007a). A csőelem használatának egyik nagy előnye, hogy nincsenek a keresztmetszetre vonatkozó korlátozások, és a kapott eredmények is jó azonosságot mutatnak a 3D-s, izotrop gerendaelemmel kapott eredményekkel. Tanulmányaim során, valamint korábbi idegen nyelvű publikációim kapcsán (Kálmán 2007; Kálmán et al. 2005; 2007a; 2007b) mindhárom jégelem használatával számos modellfuttatást végeztem és az eredményeket kiértékeltem, összehasonlítottam.

### 2.3 A JÉGTÖRÉS MODELLEZÉSE

A jég törését és az azt követő jég hullást az ADINA-ban rendelkezésre álló „element death upon rupture” opcióval oldottam meg. Ennek a lényege az, hogy az opció automatikusan aktiválódik, amikor a törési kritérium bármely integrációs pontban teljesül. A törési kritérium teljesülését követő számításokban az adott elemet a szoftver „halottnak” tekinti és az adott elem tömegének, valamint merevségének hatását automatikusan törli a modellből. A 3D-s, izotrop gerendaelemet két lineáris szakaszból álló elasztoplasztikus anyagmodellel definiáltam az alábbi para-



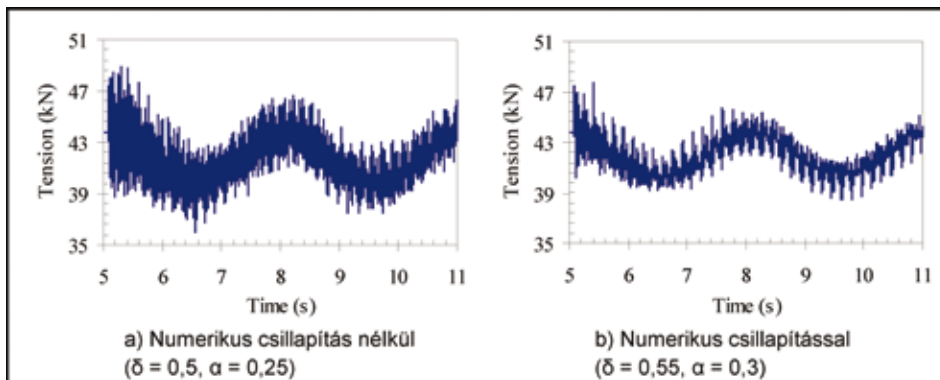
**3. ábra.** A vezetékre tapadt jég és annak modellábrázolása: a) Mesterséges jég réteg a vezetéken; b) Vezetékre tapadt jég idealizált alakja; c) A jég izotrop gerendaelemmel való ábrázolása (azonos hajlítómerevség és keresztmetszeti terület)

méterekkel: rugalmassági modulus ( $E$ ) 10 GPa; Poisson-tényező ( $\nu$ ) 0,3; sűrűség ( $\rho$ ) 900 kg/m<sup>3</sup>; folyáshatár ( $\sigma_f$ ) 2 MPa és a megengedett maximális plasztikus alakváltozás ( $\epsilon$ ) 10<sup>-10</sup>.

## 2.4 CSILLAPÍTÁS

Korábbi numerikus modellfejlesztések (Jamaledine et al. 1993; Roshan Fekr 1995; McClure–Lapointe 2003) jó tapasztalatai alapján az aerodinamikai csillapítást a modell elhanyagolja, és csupán a jeges vezeték axiális irányú szerkezeti csillapítását veszi számításba. Így a csillapítást egy nemlineáris, különálló axiális rugóelemmel modelleztem, mint egy, a vezetékkel párhuzamos csillapító elem (2. ábra). A csillapítási tényezőt úgy határoztam meg, hogy megfeleljen egy Hooke-test 2%-os kritikus axiális csillapításának (Kálmán 2007).

A vezeték szerkezeti csillapítása mellett a modell numerikus csillapítást is alkalmaz annak érdekében, hogy kiszűrje a rendszer végelemek számításból származó hamis, nagy frekvenciájú válaszait. A numerikus csillapítás a dinamikus egyensúlyi egyenletek megoldására választott Newmark-féle idő-integrációs algoritmus paramétereivel ( $\delta$  és  $\alpha$ ) történik (4. ábra). Számos integrációs és iterációs algoritmus alkalmazásának, valamint azok különböző meghatározó paramétereinek a modellre gyakorolt hatását tanulmányoztam (1. táblázat), és ezek alapján a Newmark-féle integrációs algoritmust ajánlom  $\delta = 0,55$  és  $\alpha = 0,3$  értékek és a teljes Newton-féle iterációs eljárás alkalmazásával (Kálmán 2007).



4. ábra. Vezeték irányú feszültség változása az idő függvényében a Newmark-féle integrációs algoritmus használatával (Forrás: Kálmán 2007)

1. táblázat. Modelleredmények különböző numerikus paraméterek alkalmazásával ugyanarra a jeges távvezeték konfigurációra

Integrációs paraméterek	Iterációs algoritmus	3D-s, izotrop gerendaelem			
		JHA	HKA	MF	ME
$\delta = 0,5$ $\alpha = 0,25$	Módosított Newton	100	0,071	77,8	1,23
	BFGS Mátrix Update	100	0,069	76,9	1,28
	Teljes Newton	100	0,071	77,8	1,13
$\delta = 0,5$ $\alpha = 0,3$	Módosított Newton	100	0,070	78,4	1,17
	BFGS Mátrix Update	100	0,069	78,2	1,24
	Teljes Newton	100	0,069	78,4	1,18
$\delta = 0,5$ $\alpha = 0,35$	Módosított Newton	100	0,071	78,7	1,15
	BFGS Mátrix Update	99	0,070	76,3	1,10
	Teljes Newton	100	0,070	78,7	1,27
$\delta = 0,55$ $\alpha = 0,3$	Módosított Newton	85	0,072	77,2	0,86
	BFGS Mátrix Update	84	0,075	76,9	0,85
	Teljes Newton	84	0,074	77,2	0,85
$\delta = 0,55$ $\alpha = 0,35$	Módosított Newton	83	0,078	77,4	0,87
	BFGS Mátrix Update	85	0,067	77,6	0,91
	Teljes Newton	84	0,075	77,4	0,90

JHA – jég hullás aránya (%); HKA – útés által generált hullám kezdeti amplitúdója (m); MF – maximális vezeték irányú feszültség (kN); ME – maximális vezeték (ugrás) eltolódás (m) (Forrás: Kálmán 2007)

## 2.5 EGYÉB MEGFONTOLÁSOK

Annak érdekében, hogy a modell a jéggel terhelt kezdeti statikus egyensúlyi vezetékkepet, profilt hűen számolja, a jég- (gerenda-) elem hajlítómerevségéből származó merevítő hatását úgy küszöböli ki, hogy a jeges vezeték statikus egyensúlyi profilját megnövelt sűrűségű vezeték- (rúd-) elemmel előzetesen meghatározzuk. Ennek a megváltozott statikus vezetékprofilnak a koordinátái képezik a jég-vezeték kompozit modell kiindulási alapját úgy, hogy a jég-vezeték kompozit modellben a vezeték elem kezdeti alakváltozását a megnövelt sűrűségű vezeték elem alkalmazásával kapott számítási eredményből definiáljuk. A dinamikus vizsgálat az így kapott kompozit modell statikus egyensúlyi profiljának meghatározása után kezdődik meg az ADINA által biztosított, ún. „restart” alkalmazással. A vezetékre tapadt jég eltávolítására szánt ütés egy koncentrált, függőleges irányú impulzus típusú erő, melyet a dinamikus vizsgálat kezdetén alkalmazok (Kálmán 2007).

## 2.6 A MODELL KORLÁTOZÁSAI

A villamos energiaátviteli hálózatok gyakorlatilag négy fő komponenszt tartalmaznak, melyek egymással összeköttetésben vannak: oszlopok, azok alapjai, szabadvezetékek, és egyéb összekötő elemek, mint pl. a szigetelők, hálózati szerelvények stb. A modell azonban a fejlesztés stádiumában csupán a jeges vezetékot veszi számításba, és elhanyagolja a többi komponens hatását, így a vezeték befogását tökéletesen merevnek tekinti. Végeztem modellfuttatásokat a vezeték, ill. a rögzítés rugalmasságának hatására vonatkozóan és ezeket az eredményeket összehasonlítottam laboratóriumi kísérletek eredményeivel (5. ábra) (Kálmán 2007). Ezek a vizsgálatok azt mutatták, hogy minél rugalmasabb a vezeték megfogása (ill. maga a rendszer), a vezetékről való jég hullás annál kisebb maximális vezetékugrást és a vezetékben ébredő maximális feszültséget eredményez. A jelen tanulmányban bemutatott alapmodell – az egyszerűség kedvéért – azonban úgy tekinti, hogy a vezeték befogása tökéletesen merev.

Az atmoszferikus jég mechanikai tulajdonságainak ismerete hiányában úgy gondoltam, hogy a jég törési kritériumának definiálására az édesvízi jégre jellemző tulajdonságok jó kiindulási alapot biztosíthatnak és azok bármikor helyettesíthetőek, amikor az atmoszferikus jég mechanikai tulajdonságai elérhetővé válnak (Kálmán 2007).

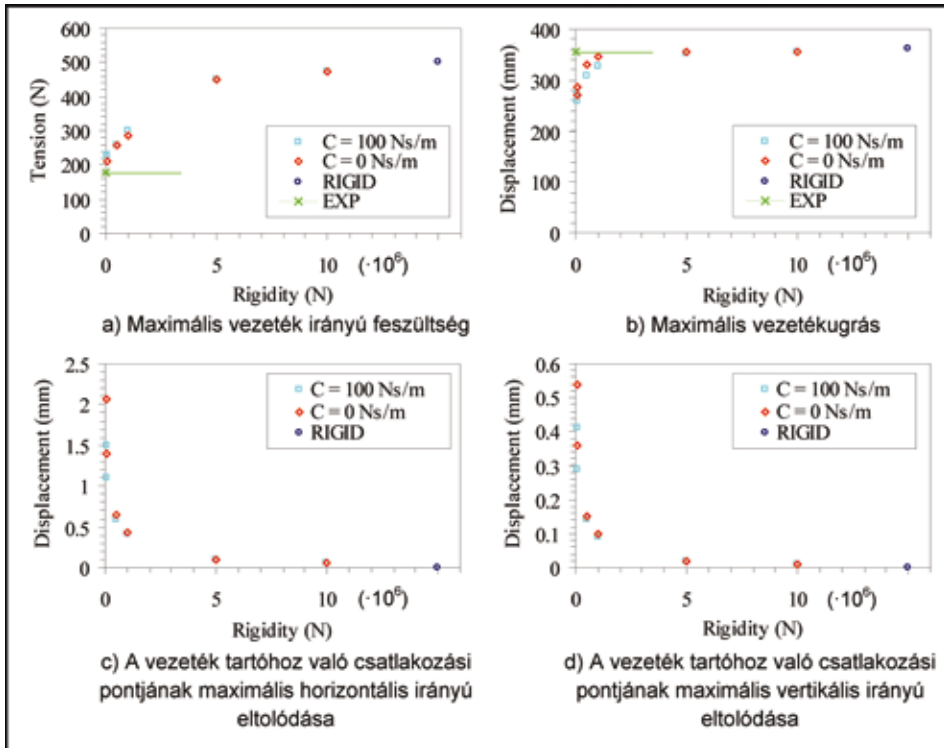
## 2.7 A MODELLEN ALKALMAZOTT, ILLETVE A MODELLERE ÉPÜLŐ ÚJDONSÁGOK

Mirshafiei tanulmányai során továbbfejlesztette a bemutatott modellt egy új jég-törési kritérium bemutatásával (Mirshafiei 2010; Mirshafiei et al. 2010). A modellezzett jégre törési kritériumként egy maximális megengedett plasztikus alakváltozást



definiált, és úgy tekintette, hogy amikor a plasztikus alakváltozás a számítás bármely integrációs pontján meghaladja a definiált értéket, akkor – a fentebb bemutatott jégtörés modellezésével azonos módon – az adott jég- (gerenda-) elem tömegét és merevségét a modell automatikusan törli a számításokból.

Az általam, ill. Mirshafiei által fejlesztett modellek azonban a ténylegesen bekövetkező jég hullást a valóságban bekövetkezőtől eltérő módon prognosztizálják (túlbecsülik), ugyanis nem veszik számításba a jég felülethez való tapadószilárdságát. Így ezek a modellek már akkor is úgy tekintik, hogy a jég a vezetékről lehullott, amikor azon a valóságban csak repedések keletkeztek, de az ugyanakkor még a vezetékhez tapad [labor kísérletek által tapasztalt összehasonlító eredmények (lásd Kálmán 2007; Mirshafiei 2010)]. A jég tapadószilárdságának meghatározására folytak kísérletek, de a tudástár még elég hiányos ezen a területen. Ennek ellenére e tulajdonság modellbe való integrálásával – melyre Mirshafiei kísérletet és ajánlást is tett – egy megbízhatóbb eszközhöz juthatunk.



5. ábra. A tartó rugalmasságának hatása a laboratóriumi kísérlet során alkalmazott jeges vezeték fő paramétereinek modellezésével: C – tartó viszkózus csillapítása; RIGID – tökéletesen merev tartóra kapott modelleredmények; EXP – kísérletek során kapott eredmények (Forrás: Kálmán 2007)

Hefny tanulmányozta a nedves hó vezetékéről való lehullása okozta dinamikus hatásokat és ehhez szintén ADINA alkalmazásával végeelem-modellt készített, melynek során a nedves hó vezetékhez való tapadószilárdságát vette figyelembe (Hefny 2013). A nedves hó tapadószilárdságának (nyíró és húzó) megállapításához szintén kísérleteket végzett, és ennek eredményeit használta fel a modellfejlesztéshez. Annak ellenére, hogy az ő tanulmánya a nedves hó terhelésre koncentrál, alapjaiban hasonló megközelítéssel és ugyanazzal az eszközzel vizsgálja a témát, mint a fenti, jégterhelésre bemutatott modellek, és – ezeken túlmenően – figyelembe veszi a korábbi tanulmányok ajánlásait is. A nedves havat pontterhelésű rugóelemekkel modellezi, melyeknek csupán a tömegét veszi számításba, míg a hó tapadására vonatkozó tulajdonságok egy másik, függőleges irányú rugóelemmel – csupán a merevségi paraméterek (tömeg és csillapítási tényezők nélkül) definiálásával – veszi számításba, azonban a hőterhelés egyéb fizikai tulajdonságait a modell elhanyagolja.

### 3. A MODELLFEJLESZTÉS LEHETSÉGES TOVÁBBI LÉPÉSEI

Kermani részletesen tanulmányozta az atmoszferikus jég mechanikai tulajdonságait különböző környezeti körülmények (hőmérséklet, relatív nedvességtartalom, szélsebesség stb.) között laboratóriumi szélcsatornában képződő jégdarabokon, különböző alakváltozási sebességek mellett (Kermani 2007; Kermani et al. 2008). Így a bemutatott modell egyik korlátozó tényezője, azaz az atmoszferikus jég mechanikai tulajdonságainak ismerete közelebb viheti a fejlesztőket egy megbízhatóbb jégtörési kritérium definiálásához.

Kombinálva a jeges vezetékre fejlesztett modelleket a bemutatott nedves hóval borított vezetékre fejlesztett modellel, és integrálva a jégre vonatkozó és elérhető mechanikai tulajdonságokat, valamint a tapadószilárdságra vonatkozó paramétereket, egy olyan modellhez juthatunk, mellyel komplex rendszerek jég hullásra adott dinamikus válaszai is jó közelítéssel, költséghatékonyan szimulálhatóak.

### 4. KONKLÚZIÓ

A bemutatott végeelem-modell jó kiindulási alapot szolgáltat ahhoz, hogy alkalmazásával a jeges távvezeték jég hullásra (akár spontán, akár generált) adott dinamikus válaszait tanulmányozzuk úgy, hogy figyelembe vesszük a jég mechanikai tulajdonságait. A bemutatott modell fejlesztése óta történtek új kutatások, és erre épülő újabb modellfejlesztések a témában. Azonban ezen eredmények, tapasztalatok egy modellbe való integrálása még várat magára.

Úgy gondolom, hogy ilyen típusú modellek alkalmazása hatalmas segítséget fog biztosítani a távvezeték hálózatok jégköri jegesedése okozta dinamikus terhelések

megbecslésére és azok tervezéskori figyelembevételére annak érdekében, hogy az extrém időjárási körülmények során a légköri jegesedés okozta súlyos üzemzavarok elkerülhetőek legyenek.

## HIVATKOZOTT IRODALOM

- Hefny 2013 Hefny, R. M. H.: *Numerical and experimental investigation of the influence of dynamic loads on wet snow shedding from overhead cables*. Ph.D. Thesis. UQAC (Canada) 2013.
- Index 2014 Hónapokig tart, amíg megjavítják a leszakadt vezetékeket. *Index* 2014.12.02. [http://index.hu/belfold/2014/12/02/honapokig\\_tart\\_amig\\_megjavitjak\\_a\\_leszakadt\\_vezeteket](http://index.hu/belfold/2014/12/02/honapokig_tart_amig_megjavitjak_a_leszakadt_vezeteket) (Utolsó megtekintés: 2015.10.02.)
- Jamaledine et al. 1993 Jamaledine, A. – McClure, G. – Rousselet, J. – Beauchemin, R.: Simulation of ice shedding on electrical transmission lines using ADINA. *Computers and Structures* 47 (1993) 4/5. 523–536.
- Kálmán 2007 Kálmán, T.: *Dynamic behavior of iced cables subjected to mechanical shocks*. Ph.D. Thesis. UQAC (Canada) 2007.
- Kálmán et al. 2005 Kálmán, T. – Farzaneh, M. – McClure, G. – Kollár, L. E. – Leblond, A.: Dynamic behavior of iced overhead cables subjected to mechanical shocks. *Proceedings of the 6th International Symposium on Cable Dynamics*. Charleston (USA) 2005. 339–346.
- Kálmán et al. 2007a Kálmán, T. – Farzaneh, M. – McClure, G.: Numerical analysis of the dynamic effects of shock-load-induced ice shedding on overhead ground wires. *Computers and Structures* 85 (2007) 375–384.
- Kálmán et al. 2007b Kálmán, T. – Farzaneh, M. – McClure, G. – Leblond, A.: De-icing of overhead cables by mechanical shocks: numerical and experimental analyses. *Proceeding of the 12th International Workshop on Atmospheric Icing on Structures*. Yokohama (Japan) 2007. (in CD Proc.)
- Kermani 2007 Kermani, M.: *Ice shedding from cables and conductors – a cracking model of atmospheric ice*. Ph.D. Thesis. UQAC (Canada) 2007.
- Kermani et al. 2008 Kermani, M. – Farzaneh, M. – Gagnon, R. E.: Bending strength and effective modulus of atmospheric ice. *Cold Regions Science and Technology* 53 (2008) 2. 162–169.
- Leblond et al. 2005 Leblond, A. – Lamarche, B. – Bouchard, D. – Panaroni, B. – Hamel, M.: Development of a portable de-icing device for overhead ground wires. *Proceedings of the 11th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures*. Montréal (Canada) 2005. 399–404.
- McClure–Lapointe 2003 McClure, G. – Lapointe, M.: Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines. *Computers and Structures* 81 (2003) 825–834.
- Mirshafiei 2010 Mirshafiei, F.: *Modelling the dynamic response of overhead line conductors subjected to shock-induced ice shedding*. Master Thesis. McGill University, Montréal (Canada) 2010.
- Mirshafiei et al. 2010 Mirshafiei, F. – McClure, G. – Kálmán, T. – Farzaneh, M.: Improved ice shedding modelling of iced cables: a comparison with experimental data. *Proceeding of the 2nd International structural specialty conference, ISSC-02*. Winnipeg (Canada) 2010. 978–988.
- Pekánovics et al. 2011 Pekánovics L. – Tóth L. – Varga L.: Mechanikai biztosítás szerelvények alkalmazásával kapcsolatos kutatások és vizsgálatok. *Elektrotechnika* 12 (2011) 8–11.

- Roshan Fekr 1995 Roshan Fekr, M.: *Dynamic response of overhead transmission lines to ice shedding*. Master Thesis. Department of Civil Engineering and Applied Mechanics. McGill University, Montréal (Canada) 1995.
- Szabó–Farkas 2009 Szabó Gy. – Farkas Gy.: *2009.01.27.-30. közötti időszakban, Vas és Zala megyében tömeges üzemzavart okozó középfeszültségű (KÖF) oszlopok kitérés okainak, vezetékek szakadásának feltáró elemzése*. Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Budapest 2009.

## NUMERICAL ANALYSES OF OVERHEAD TRANSMISSION CABLES EXPOSED TO ATMOSPHERIC ICING

### *Summary*

In countries where atmospheric icing often causes serious damages to engineering structures, strong effort is taken to increase the in-depth knowledge of this phenomenon and to develop methods to prevent the occurrence of catastrophic events or at least to mitigate their effect. One segment of these engineering structures exposed to atmospheric icing belongs to the electric power distribution and transmission system. In winter season, heavy adherent wet snow, hard rime, large but lightweight rime ice, and dense glaze ice deposited on overhead transmission lines are often responsible for damages of supporting structures or other line components. This study is aimed to provide a general introduction about atmospheric icing affecting overhead transmission lines and a de-icing technique of interest that uses mechanical shocks to remove accreted ice from the cable. The author developed a finite element model for an iced span section that calculates the dynamic effects of shock-load-induced ice-shedding and explicitly considers the rupture criteria of glaze ice. The author used the results of his Ph.D. studies carried out in Canada, within the framework of CIGELE to compile this paper and integrated new scientific evidences that have been achieved in the subject.

**Keywords:** overhead transmission line, atmospheric icing, dynamic analysis, finite element model