

Tartószerkezetek megbízhatóságának vizsgálata extrém hőterhekre

Tézisek



Rózsás Árpád

Tudományos vezetők:

Kovács Nauzika, Ph.D.

Hidak és Szerkezetek Tanszék

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi
Egyetem

Sýkora Miroslav, Ph.D.

Szerkezetek Méretezéselmélete Tanszék

Cseh Műszaki Egyetem

2016. június

1. Bevezetés

1.1. Motiváció

Építőmérnöki területen a valószínűségi modellek tipikusan alulértékelték és kevesebb kutatási foglalkozik velük, mint a fizikai modellekkel. Ezt a fókuszot azonban nem indokolja az előbbieket alárendelt szerepe. Gyakran a valószínűségi modellek fejlesztése nagyobb gyakorlati nyereséggel jár, mint ugyanakkora relatív fejlesztés a fizikai modellekben. Jelen dolgozat célja, hogy kissé kompenzálja ezt az aránytalan fókuszot és a jelenlegi építőmérnöki gyakorlatban tipikus elhanyagolások hatását vizsgálja tartószerkezetek megbízhatóságára. Noha a dolgozat elsősorban extrém¹ hőterhekre koncentrál, az vizsgált kérdések és alkalmazott módszerek általánosak és alkalmazhatók más valószínűségi változók esetén is.

1.2. Problémafelvetés

A témaválasztást részben a hőterhek okozta relatíve gyakori szerkezeti károsodások és összeomlások indokolják (Geis et al., 2011). Ezek egyik lehetséges oka a jelenlegi előírások, szabványok hiányossága (Holický és Sýkora, 2009; Meløysund, 2010). További motiváció a jelenlegi szabványokban található inkonzisztenciák, pl. az éves hómaximumok vagy rendkívüli hőterhek vonatkozásában.

A dolgozatban elemzett főbb kérdések:

1. Hiányzik az egyetértés az éves hómaximumok leírására alkalmazandó eloszlástípus vonatkozásában. *Melyik eloszlástípus írja le „legjobban” az éves hómaximumokat? Milyen jellemzői vannak a megfelelő eloszlásnak?*
2. A jelenlegi gyakorlat rutinszerűen elhanyagolja a statisztikai bizonytalanságokat tartószerkezetek megbízhatóságának vizsgálatokor és reprezentatív kvantilisek számításakor. *Mekkora a hatása a statisztikai bizonytalanságok elhanyagolásának tartószerkezetek megbízhatóságára? Megalapozott az elhanyagolásuk?*
3. A jelenlegi építőmérnöki gyakorlat megbízhatósági vizsgálatokban tipikusan elhanyagolja a mérési bizonytalanságok hatását. *Hogyan kellene a mérési bizonytalanságokat figyelembe venni megbízhatósági vizsgálatokban? Konzervatív-e a jelenlegi gyakorlat, mely elhanyagolja ezt a bizonytalanságot?*

¹ 50-10000 éves visszatérési idejű eseményeket tekintek építőmérnöki szempontból extrém eseménynek.

4. A jelenlegi építőmérnöki gyakorlat túlnyomóan a történelmi tapasztalatokra épít és elfogadj a stacionaritási feltételezést, miszerint a hatsokat generáló folyamatok időben változatlanok. *Tartható-e a hómaximumok modellezésénél alkalmazott stacionaritási feltételezés? Milyen gyakorlati következményei vannak a hóterhekben mutatkozó hosszú idejű trendeknek tartószerkezetek megbízhatósága vonatkozásában?*
5. A jelenlegi építőmérnöki gyakorlatban a függőségi viszony szinte kizárólagosan Gauss-kopulával² van modellezve. *Mekkora hatása van a Gauss-kopula feltételezésnek tartószerkezetek időfüggő megbízhatóságára? Konzervatív a jelenlegi gyakorlat, mely a Gauss-kopulát használja?*

² A kopula egy két- vagy többváltozós eloszlásfüggvény, mely két vagy több valószínűségi változó közti függőségi viszonyt írja le.

2. Módszerek és adatok

2.1. Módszerek

Az 1.2-es fejezetben felvetett kérdések vizsgálatához több terület módszereit alkalmaztam, pl. matematikai statisztika, építőmérnökség. Az összes vizsgálat alapelve azonos:

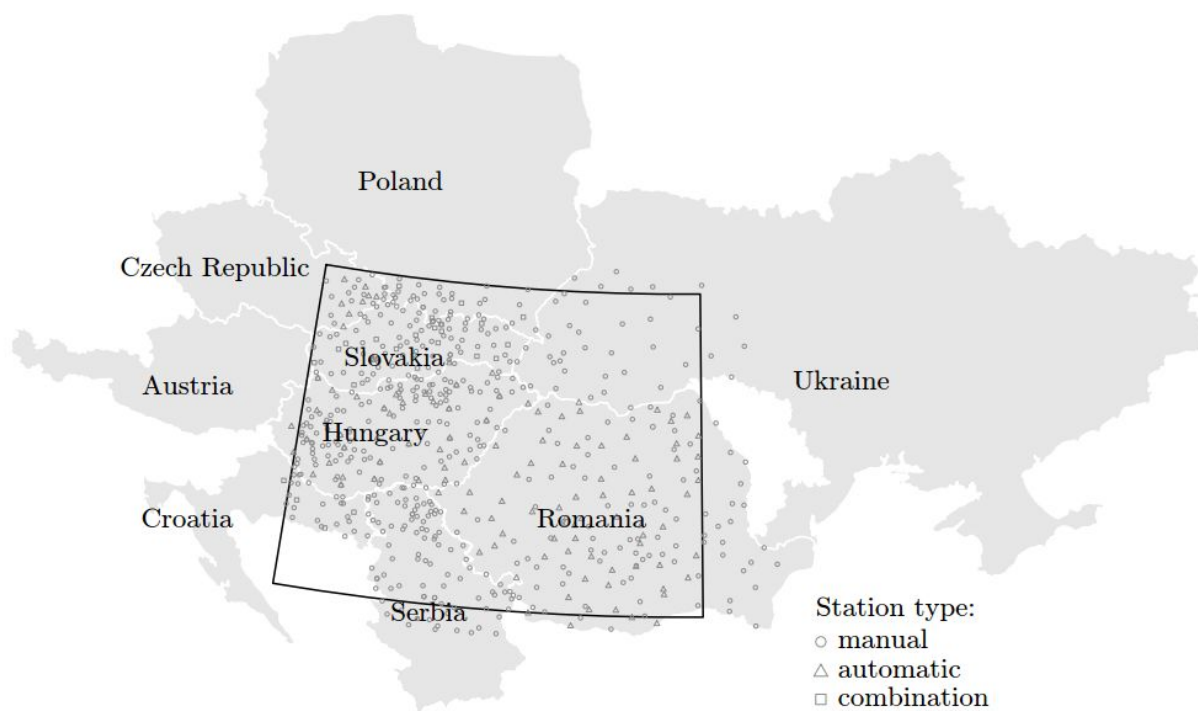
1. Hiányosságok, nemkonzervatív feltételezések azonosítása a jelenlegi gyakorlatban, tudásban.
2. Az azonosított problémakörhöz tartozó elvek vizsgálata és hipotézisek felállítása. Módszerek, eszközök választása vagy fejlesztése a problémák vizsgálatához.
3. Minőségi és mennyisége elemzése a jelenlegi, elterjedt építőmérnöki gyakorlatban alkalmazott módszereknek.
4. Paraméteres vizsgálatok minimális³ megbízhatósági problémák felhasználásával.
5. A hatások és módszerek szemléltetése gyakorlati példákon keresztül. A paksi atomerőmű és az Eiffel-csarnok vizsgálatára került sor.
6. Az eredmények diszkussziója távolabbi, döntéshozatali perspektívából.
7. Gyakorlati javaslatok és alkalmazási szabályok megfogalmazás.

A matematikai statisztika, valószínűségszámítás, információelmélet és méretezéselmélet módszereit alkalmaztam a kérdések megválaszolására.

2.2. Vizsgált adatok

A CarpatClim adatbázisban elérhető adatokat használtam a vizsgálatok bemenő paramétereiként (Szalai et al. 2013). Az adatbázis hó-víz egyenértékeket tartalmaz napi időbeli és 10km-es térbeli bontásban. A vizsgált régiót a 2.1. ábra mutatja.

³ A programozásban ismert minimális példa (minimal working example) értelemben használva. Olyan példa, mely a lehető legegyszerűbb, de még tartalmazza a vizsgált kérdés szempontjából esszenciális komponenseket.



2.1. ábra: A vizsgált régió illusztrációja (fekete keret) a vonatkozó országokkal és meteorológiai állomásokkal.

3. Összefoglalás és következtetések

Jelen munka főbb következtetéseit és eredményeit az 1.2-es fejezetben megfogalmazott kérdésekre adott válaszokként adom meg. A válaszok azonosan strukturáltak és a következő alfejezetekre tagoltak: korábbi munkák és gyakorlat, módszerek, újdonság, érvényesség és korlátok, tézis. Habár a gyakorlati javaslatok újdonságnak tekinthetők azokat nem az újdonságok között szerepeltetem, mivel a tézisekben már megjelennek. A jelenlegi gyakorlat, korábbi munkák és újdonságok leírásánál használt állítások nem abszolút kijelentések. Mindegyik elé odateendő, hogy *a jelölt legjobb tudomása szerint*.

3.1.Éves hómaximumok eloszlása

Melyik eloszlástípus írja le „legjobban” az éves hómaximumokat? Milyen jellemzői vannak a megfelelő eloszlásnak?

Korábbi munkák, jelenlegi gyakorlat

Hiányzik az egyetértés az éves hómaximumok leírására alkalmazandó eloszlástípus vonatkozásában. Gumbel és háromparaméteres Lognormális eloszlásokat alkalmaznak Európában, míg az Egyesült Államokban a kétparaméteres Lognormális eloszlás az elterjedt.

Módszerek

Momentumok módszerét, frekventista és Bayesi módszereket alkalmaztam az eloszlásfüggvények paramétereinek becslésére.

Újdonság

Fejlett statisztikai módszerekkel vizsgáltam az éves hómaximumok eloszlását. Ezek közül számos alkalmazása újszerű építőmérnöki területen és lehetővé teszi a jelenlegi gyakorlatban alkalmazott módszerek teljesítményének, jóságának megítélését.

Érvényesség és korlátok

Az alkalmazott módszerek alkalmazhatók és adaptálhatók más klimatikus hatások leírására is. Kizárólag a blokkmaximumok módszerét és éves blokkhosszt alkalmaztam, valamint az alkalmazott statisztikai módszerek és eloszlástípusok száma is korlátozott.

I. Tézis

Statisztikailag elemeztem a Kárpátok régió több, mint 6000 rácspontjának felszíni hó-víz egyenérték adatsorát, melyek az 1961-2010 időszakot fedik le és 49 telet foglalnak magukba. Számos eloszlástípust illesztettem a napi észlelésekből nyert hómaximumokra és kiterjedt statisztikai vizsgálatok felhasználásával:

I./a Megmutattam, hogy szemben a jelenleg szabványosított – Eurocode által is javasolt és Magyarországon alkalmazott – Gumbel-eloszlással, a hegységek és dombságok éves hómaximumait a Weibull, míg alföldekét a Fréchet-eloszlás írja le jobban. A Gumbel-modell gyakran érdemben alábecsüli az alföldek hómaximumait, így túlbecsüli a szerkezetek megbízhatóságát. A Lognormális modell általában még gyengébben teljesít, mint a Gumbel. Megbízhatósági, empirikus (adat vezérelt) és elméleti megfontolások alapján – a vizsgált eloszlástípusok közül – a Weibull-eloszlást javaslom hegységek és dombságok esetén, míg a Fréchet-eloszlást alföldekre.

I./b Előállítottam a régió reprezentatív területeihez tartozó hómaximumok jellemző értékeinek posterior eloszlását. Ezek prior információként használhatók hasonló klimatikus adottságú régiók vizsgálatakor. Továbbá, készítettem egy nyílt forráskódú, online, interaktív, 10 km felbontású hótérképet, mely karakterisztikus hóterhek, valamint rendkívüli hóterhek meghatározására használható.

(Rózsás és Sýkora, 2015b,c; Rózsás et al., 2016b)

3.2. Statisztikai bizonytalanságok hatása

Mekkora a hatása a statisztikai bizonytalanságok elhanyagolásának tartószerkezetek megbízhatóságára? Megalapozott az elhanyagolásuk?

Korábbi munkák, jelenlegi gyakorlat

A jelenlegi gyakorlat rutinszerűen elhanyagolja a statisztikai bizonytalanságokat tartószerkezetek megbízhatóságának vizsgálatakor és reprezentatív kvantilisek számításakor.

Módszerek

Frekventista és Bayesi statisztikai módszereket használtam a paraméterbecslési és modellválasztási bizonytalanságok figyelembevételére. Bayesi posterior előrejelző eloszlást

használtam a paraméterbecslési bizonytalanság figyelembevételére, míg Bayesi modell átlagolást a modellválasztási bizonytalanság esetén.

Újdonság

A statisztikai bizonytalanságok elhanyagolásának megbízhatóságra kifejtett hatásának szisztematikus, alapos vizsgálatát adtam. A jelenlegi gyakorlatban alkalmazott elhanyagolások jelentős hibájára való rámutatás újdonságnak tekinthető.

Érvényesség és korlátok

A vizsgálatok elsősorban éves hómaximumokra fókuszálnak, így a numerikus eredmények azokra érvényesek. Ugyanakkor az alkalmazott módszerek általánosabban alkalmazhatóak.

II. Tézis

Elemeztem a statisztikai bizonytalanságok (paraméter becslés és modell választás bizonytalanság), hatását éves felszíni hómaximumok jellemző kvantiliseire és szerkezeti megbízhatóságra. A jelenlegi építőmérnöki gyakorlat többségében elhanyagolja ezeket a bizonytalanságokat, habár elkerülhetetlenül jelen vannak az adatok szűkössége miatt.

II./a Megmutattam, hogy a paraméterbecslési bizonytalanság elhanyagolása a jellemző kvantilisek jelentős (20%) alulbecsléséhez vezethet. Továbbá, rámutattam, hogy az alkalmazott eloszlás típusának (modell választás bizonytalanság) nagyobb hatása van a jellemző kvantilisekre, mint a paraméter becslési bizonytalanságnak. Kétparaméteres Lognormális, háromparaméteres Lognormális, Gumbel és Általánosított extrém eloszlásokat alkalmaztam.

II./b Megbízhatósági analízisek felhasználásával megmutattam, hogy a statisztikai bizonytalanságok elhanyagolása akár több nagyságrenddel is alulbecsülheti a tönkremeneteli valószínűséget. Illusztráltam, hogy a „legjobb” pontbecslések, mint a maximum likelihood becslés vagy a momentumok módszere alkalmazása megbízhatósági szempontból nem konzervatív. Ezek a jellemző kvantilisek és tönkremeneteli valószínűségek gyakorlati szempontból szignifikáns alulbecsléséhez vezethetnek. Az eredmények alapján javaslatot tettem a statisztikai bizonytalanságok kezelésére és figyelembevételére biztonsági szempontból kritikus és normál szerkezetek esetére. A Bayesi posterior előrejelző eloszlás alkalmazását javaslom megbízhatósági analízisekben, továbbá modell átlagolást a modell választási bizonytalanság figyelembevételére..

(Rózsás et al., 2016a; Rózsás és Sýkora, 2015a,b,c,d; Rózsás és Vigh, 2014)

3.3. Mérési bizonytalanságok hatása

Hogyan kellene a mérési bizonytalanságokat figyelembe venni megbízhatósági vizsgálatokban? Konzervatív-e a jelenlegi gyakorlat, mely elhanyagolja ezt a bizonytalanságot?

Korábbi munkák, jelenlegi gyakorlat

A jelenlegi építőmérnöki gyakorlat megbízhatósági vizsgálatokban tipikusan elhanyagolja a mérési bizonytalanságok hatását. A valószínűségi modelleket ezen bizonytalanságok elhanyagolásával illesztik.

Módszerek

Statisztikai és intervallum alapú módszereket alkalmaztam a mérési bizonytalanságok figyelembevételére.

Újdonság

Az elvégzett vizsgálatok mind módszerében, mind eredményeiben újszerűnek tekinthetők tartószerkezetek megbízhatóságának vizsgálatában.

Érvényesség és korlátok

Habár az eredmények korlátozottak az alkalmazott eloszlástípusok, paramétertartományok vonatkozásában, a javasolt módszerek kiterjeszthetők. A mérési bizonytalanságok vizsgálatát több valószínűségi változóra is ki kellene terjeszteni és a minta elemszámának hatását vizsgálni kellene.

III. Tézis

Megvizsgáltam a felszíni hőterhek éves maximumai mérési bizonytalanságának hatását szerkezetek megbízhatóságára. Ezt a bizonytalanságot a jelenlegi építőmérnöki gyakorlat tipikusan elhanyagolja. Statisztikai és intervallum alapú vizsgálatokra tettem javaslatot és megmutattam, hogy:

III./a A mérési bizonytalanság elhanyagolása jelentősen (nagyságrend) alulbecsülheti a tönkremeneteli valószínűséget. Meghatároztam a legfontosabb paraméterek azon tartományát, amelyekben a mérési bizonytalanságot figyelembe kellene venni. Ezeket Normális, Lognormális és Gumbel-eloszlások, többféle relatív szórás (0.2-0.6) és többféle nagyságú mérési bizonytalanság figyelembevételével állítottam elő (0-10% az éves maximumok átlagának)

III./b Amennyiben a mérési bizonytalanságot generáló mechanizmus ismert, úgy a statisztikai, míg ellenkező esetben az intervallum alapú megközelítést javaslom a bizonytalanság figyelembevételére. Alföldek hómaximumai esetén a mérési bizonytalanságok elhanyagolása elfogadható. Egyéb esetekben fejlettebb módszerek (statisztikai, intervallum) alkalmazása ajánlott.

Gyakorlati alkalmazásokban rendre a megbízhatósági intervallum alsó határa és az előrejelző megbízhatósági index alkalmazását javaslom intervallum és statisztikai alapú megközelítések esetén. A pontbecslések bizonytalansági intervallumokkal való kiegészítését javaslom.

(Rózsás és Sýkora, 2016)

3.4. Hosszú idejű trendek az éves hómaximumokban

Tartható-e a hómaximumok modellezésénél alkalmazott stacionaritási feltételezés? Milyen gyakorlati következményei vannak a hóterhekben mutatkozó hosszú idejű trendeknek tartószerkezetek megbízhatósága vonatkozásában?

Korábbi munkák, jelenlegi gyakorlat

A jelenlegi építőmérnöki gyakorlat túlnyomóan a történelmi tapasztalatokra épít és elfogadj a stacionaritási feltételezést, miszerint a hatsokat generáló folyamatok időben változatlanok. Hóterhek vonatkozásában azonban az utóbbi évek észlelései és klímamodellek eredményei kikezdi ezt feltételezést.

Módszerek

Nemstacionárius extrém érték vizsgálattal elemeztem az éves hómaximumokban mutatkozó hosszú idejű trendeket. Öt nemstacionárius és egy stacionárius Általánosított extrém eloszlást használtam a vizsgálatokhoz. Statisztikai és információelméleti eszközöket használtam.

Újdonság

Tudomásom szerint a hómaximumokban mutatkozó hosszú idejű trendek megbízhatóságra kifejtett hatását még nem vizsgálták korábban. Tovább a Kárpátok régió hómaximumai trendjeinek statisztikai vizsgálatát sem végezték még el kellő alaposággal.

Érvényesség és korlátok

Az alkalmazott módszerek más valószínűségi változók esetén is alkalmazhatóak. A szűkös adatok (49 év hómaximumai) miatt a levont következtetések nem túl erősek, a statisztikai bizonytalanságok hatása jelentős. Mindössze egyetlen eloszlástípus felhasználásával végeztem el a számításokat, ennek szintén jelentős hatása lehet az eredményekre.

IV. Tézis

Nemstacionárus extrém érték analízis alkalmazásával megvizsgáltam a Kárpátok Régió elmúlt 49 év felszíni hómaximumaiban mutatkozó hosszú idejű időbeli trendeket. Statisztikai és információelméleti vizsgálatokkal kimutattam, hogy:

IV./a A vizsgált Kárpátok régió területének 97%-án időben csökkenő tendencia mutatkozik a hómaximumokban. Statisztikailag szignifikáns ($p < 0.05$) csökkenő trendet találtam a régió területének 65%-án. A hipotézisvizsgálatot a hatás mértékének és a teszt erejének vizsgálatával is kiegészítettem. Továbbá, kimutattam, hogy néhány helysín karakterisztikus hóterhének csökkenése gyakorlati szempontból is szignifikáns. Az időbeli trendeket információelméleti módszerekkel is igazoltam.

IV./b A régió Fréchet-eloszlással jellemezhető helyszíneinek többsége esetén a csökkenő hómaximumoknak csekély hatása van a szerkezetek megbízhatóságára. A paraméterbecslés bizonytalansága domináns. Erős csökkenő tendenciával és Weibull-eloszlással jellemezhető helyszínek esetén a csökkenés hatása gyakorlati szempontból is szignifikáns a szerkezeti megbízhatóság vonatkozásában. Ugyanakkor a változás biztonsági szempontból kedvező, mivel növeli a megbízhatóságot.

(Rózsás et al., 2016a,b; Sýkora et al., 2016)

3.5. Függőségi viszony hatása

Mekkora hatása van a Gauss-kopula feltételezésnek tartószerkezetek időfüggő megbízhatóságára? Konzervatív a jelenlegi gyakorlat, mely a Gauss-kopulát használja?

Korábbi munkák, jelenlegi gyakorlat

A jelenlegi építőmérnöki gyakorlatban a függőségi viszony szinte kizárólagosan Gauss-kopulával van modellezve.

Módszerek

Az időfüggő megbízhatóságot a PHI2 módszerrel az áthaladási sebesség felhasználásával számítottam Gauss, t, Gumbel, elforgatott Gumbel és elforgatott Clayton-kopulák

felhasználásával. Három egyszerű példán keresztül demonstráltam a kopulaválasztás hatását a megbízhatóságra.

Újdonság

Tudomásom szerint időben folytonos sztochasztikus folyamatok és időfüggő megbízhatóság tekintetében még nem vizsgálták a Gauss feltételezés hatását.

Érvényesség és korlátok

A vizsgálatok, eredmények minden időben folytonos sztochasztikus folyamat esetére érvényesek és iránymutatóak, nem csak hómáximoakra érvényesek.

V. Tézis

Megvizsgáltam a széles körben alkalmazott Gauss-kopula feltételezés hatását időben folytonos sztochasztikus folyamatokra és megmutattam, hogy:

V./a Az alkalmazott függőségi szerkezetnek (kopula függvény) jelentős hatása van az időfüggő megbízhatóságra. A túlnyomóan alkalmazott Gauss-kopula feltételezés akár negyed- vagy tízszer akkora tönkremeneteli valószínűséget is eredményezhet, mint a többi vizsgált kopula függvény (t , Gumbel, elforgatott Gumbel, elforgatott Clayton). Egy egyszerű esetre megmutattam, hogy a kopula függvény megfelelő megválasztásával tetszőleges nagyságú eltérést hozhatunk létre az átlépési sebességben a Gauss-kopulához viszonyítva.

V./b Az autokorrelációs függvény típusának számottevő hatása van az időfüggő tönkremeneteli valószínűségekre. A Cauchy illetve Gauss-autokorrelációs függvényekkel kapott normalizált tönkremeneteli valószínűségek aránya 1.41. Az arányszámot kizárólag az autokorrelációs függvény típusa befolyásolja.

V./c Nemfüggetlen felszíni hőteher maximumok esetén az extrém típusú kopulák, mint a Gumbel, jelentősen jobban illeszkednek az adatokra, mint a Gauss-kopula. A Gumbel-kopula akár négyszer kisebb átlépési sebességet is eredményezhet, mint a Gauss.

Amennyiben elegendő észlelés áll rendelkezésre, úgy a kopula függvényt azokból célszerű meghatározni statisztikai módszerekkel. Kevés észlelés esetén több kopula függvény alkalmazása javasolt a modell választási bizonytalanság mértékének felmérésére. Utóbbi esetben a Gauss-kopula kizárólagos alkalmazása nem indokolt, az a biztonság kárára is tévedhet. Modell átlagolást javaslom a kopula modell választási bizonytalanság figyelembevételére.

(Rózsás and Mogyorósi, 2016)

3.6. Összefoglaló megállapítások

Az elvégzett vizsgálatok azt mutatják, hogy számos a jelenlegi építőmérnöki, megbízhatósági vizsgálatokban alkalmazott elhanyagolás jelentősen alulbecsülheti a tönkremeneteli valószínűséget. Ezek a statisztikai bizonytalanságok, mérési bizonytalanságok, hosszú idejű időbeli trendek és a függőségi viszony. Elhanyagolásuk akár nagyságrendnyi alulbecsléséhez is vezethet a tönkremeneteli valószínűségnek.

A bizonytalanságok elhanyagolása megsérti a valószínűségszámítás egyik alapelvét, miszerint minden bizonytalanságot és információt figyelembe kell venni események valószínűségének számításakor⁴. Ugyanakkor minden bizonytalanság figyelembevétele gyakorlati szempontból használhatatlan megbízhatósági mérőszámokat is eredményezhet. Ennek oka az adatok szűkössége.

Mivel a méretezéselmélet nem egy egzakt tudomány, hanem egy döntéstámogató módszer a mérnökök kezében, ezért a probléma egy lehetséges megoldása, hogy a terület képviselői megegyeznek az alkalmazott modellek típusában. Ezzel az adatokon túli tartományba történő extrapolálás bizonytalansága jelentősen csökkenthető.

Megbízhatósági vizsgálatok és szabványosítás egy kényes egyensúlyozás ezen két követelmény között: a valóság minél pontosabb közelítése és bizonytalanságok beépítése a modellekbe, valamint gyakorlati hasznosíthatóság. Úgy gondolom, hogy az itt bemutatott hatások és figyelembevételük közelebb visz minket a valóság pontos leírásához, ugyanakkor a gyakorlati alkalmazhatóságot sem rontja érdemben.

A vizsgált kérdések általánosak és a legtöbb valószínűségi változó esetén is relevánsak, pl. szélesség, forgalmi terhek intenzitása, földrengési terhek. Emiatt az eredmények ezek esetén is alkalmazhatók és segíthetnek jobb szabványok és biztonságosabb építmények létrehozásában.

⁴ Ez konzisztencia követelményként jelenik meg Jaynesnél (Jaynes, 2003) és teljesség követelményként ismert méretezéselméletben (Der Kiureghian, 1989).

Hivatkozások

Der Kiureghian, A. (1989). Measures of structural safety under imperfect states of knowledge. *Journal of Structural Engineering*, 115(5):1119–1140.

Geis, J., Strobel, K., és Liel, A. (2011). Snow-induced building failures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 26(4):377–388.

Holický, M. és Sýkora, M. (2009). Failures of Roofs under Snow Load: Causes and Reliability Analysis, pages 444–453. American Society of Civil Engineers. doi:10.1061/41082(362)45.

Jaynes, E. T. (2003). *Probability Theory: The Logic of Science*. Cambridge University Press.

Meløysund, V. (2010). Prediction of local snow loads on roofs. Ph.D. thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Structural Engineering.

Rózsás, Á., Kovács, N., Vigh, L. G., és Sýkora, M. (2016a). Climate change effects on structural reliability in the Carpathian Region. *Időjárás*, 120(1):103–125.

Rózsás, Á. és Mogyorósi, Zs. (2016). The effect of copulas on time-variant reliability with continuous stochastic processes. In *International Conference in Modelling in Mechanics and Structural Reliability*, pages 1–14, Ostrava, Czech Republic.

Rózsás, Á. és Sýkora, M. (2015a). Effect of parameter estimation uncertainty on structural reliability. In Krejsa, M., editor, *Modelling in Mechanics*, pages 100–111, Ostrava, Czech Republic.

Rózsás, Á. és Sýkora, M. (2015b). Effect of statistical uncertainties in ground snow load on structural reliability. In *IABSE Conference: Structural Engineering: Providing Solutions to Global Challenges*, pages 220–227, Geneva, Switzerland.

Rózsás, Á. és Sýkora, M. (2015c). Model comparison and quantification of statistical uncertainties for annual maxima of ground snow loads. In Podofillini, L., Sudret, B., Stojadinovic, B., Enrico, Z., és Kröger, W., editors, *Safety and Reliability of Complex Engineered Systems: ESREL 2015*, pages 2667–2674, Zürich, Switzerland. CRC Press.

Rózsás, Á. és Sýkora, M. (2015d). Neglect of parameter estimation uncertainty can significantly overestimate structural reliability. *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Civil Engineering Series*, 15(2):1–10.

Rózsás, Á. és Sýkora, M. (2016). Propagating snow measurement uncertainty to structural reliability by statistical and interval-based approaches. In 7th International Workshop on Reliable Engineering Computing, REC2016. Computing with Polymorphic Uncertain Data, pages 91–110, Bochum, Germany.

Rózsás, Á., Sýkora, M., és Vigh, L. G. (2016b). Long-term trends in annual ground snow maxima for the Carpathian Region. *Applied Mechanics and Materials*, 821:753–760.

Rózsás, Á. és Vigh, L. G. (2014). On the reliability of steel frames exposed to snow load. Considering the effect of epistemic uncertainty. In Landorfo, R. and Mazzolani, F., editors, 7th European Conference on Steel and Composite Structures, Eurosteel 2014, pages 1–6, Naples, Italy.

Sýkora, M., Diamantidis, D., Retief, J., Viljoen, C., és Rózsás, Á. (2016). On risk-based design of structures exposed to changing climatic actions (accepted for publication). In Proceedings of the Fifth International Symposium on Life -Cycle Civil Engineering IALCCE2016, pages 1–9, Delft, The Netherlands.

Szalai, S., Auer, I., Hiebl, J., Milkovich, J., Radim, T., Stepanek, P., Zahradnicek, P., Bihari, Z., Lakatos, M., Szentimrey, T., Limanowka, D., Kilar, P., Cheval, S., Deak, G., Mihic, D., Antolovic, I., Mihajlovic, V., Nejedlik, P., Stastny, P., Mikulova, K., Nabyvanets, I., Skyryk, O., Krakovskaya, S., Vogt, J., Antofie, T., és Spinoni, J. (2013). Climate of the greater Carpathian Region. Report.

Vigh, L. G., , Rózsás, Á., Zsarnóczay, Á., Balogh, T., Morais, E. C., és Simon, J. (2016). A BME Hidak és Szerkezetek Tanszék Tudományos Közleményei: Tassi Géza és Orosz Árpád 90 éves, chapter Application of reliability analysis to the study of structures subjected to extreme actions (In Hungarian: Megbízhatósági analízis alkalmazása extrém hatásoknak kitett szerkezetek vizsgálatára), pages 119–128. Department of Structural Engineering, Budapest University of Technology and Economics.