

T 049305 : Acélszerkezetek méretezése virtuális kísérletek alapján

ZÁRÓJELENTÉS

A kutatás eredményei

Dr. Dunai László, egyetemi tanár, témavezető

Tartalom

- 1. Bevezetés**
 - 1.1 A kutatás tárgya és célja
 - 1.2 Kutatási stratégia
- 2. A kidolgozott módszerek, eljárások és elvégzett vizsgálatok**
 - 2.1 Vizsgálati módszertan
 - 2.2 Numerikus modellek
 - 2.3 Imperfekciók és gyártási sajátfeszültségek
 - 2.4 Méretezési eljárások
- 3. Az elért eredmények bemutatása**
 - 3.1 Új tudományos eredmények
 - 3.2 Publikációk
 - 3.3 Nemzetközi együttműködés
 - 3.4 Az eredmények hasznosítása
 - 3.5 A kutatás folytatása

1. Bevezetés

1.1 A kutatás tárgya és célja

Az OTKA kutatás tárgya nagy pontosságú numerikus szerkezeti modellezésen és analízisen alapuló méretezési eljárások kidolgozása adott típusú acél-, alumínium- és öszvérszerkezetek esetén. A kutatás szükségességét az indokolja, hogy az empirikus kutatásokon alapuló, egyszerűsített szerkezeti analízist igénylő méretezés, és a komplex hatásokat figyelembe vevő numerikus analízis egymással inkompatibilissá vált.

A kutatás célkitűzése az volt, hogy olyan integrált méretezési módszereket dolgozzunk ki, amelyek nagy pontosságú numerikus modellen végrehajtott nemlineáris szerkezeti analízisen – virtuális kísérleten – alapulva határozzák meg a szerkezeti ellenállást (teherbírást) az Eurocode által megkövetelt biztonsági szinten. A módszer általános elveinek kidolgozása mellett célunk volt az alkalmazási részletek kifejlesztése az alábbi tipikus szerkezetekre: vékonyfalú hegesztett és hidegen alakított acélszerkezetek, merevített acél és alumínium lemezek, öszvérszerkezetű gerendák és csomópontok. Terveztük a vizsgálatok kiterjesztését meglévő – környezeti hatások és terhek által károsított – szerkezetekre is; ezt az OTKA kutatás keretében nem valósítottuk meg, azonban az elmúlt két évben egy új doktorandusz hallgató (Oszvald Katalin) ezen a területen dolgozik.

1.2 Kutatási stratégia

A kutatási stratégiában fontos szerepet kaptak a laboratóriumi és helyszíni kísérletek, amelyek a numerikus vizsgálatok alapjául szolgáltak. A kísérleti kutatást nem az OTKA pályázat költségvetéséből támogattuk, hanem más, ipari, illetve nemzetközi együttműködés K+F projektjei keretében végeztük el. A kutatást a témavezető által kialakított – fiatal oktatókból és doktorandusz hallgatókból álló – csoport hajtotta végre, akikhez TDK-zó és diplomázó hallgatók csatlakoztak. A belőlük kinövő doktorandusz hallgatók beépültek az OTKA projektbe. A kutatást több területen is nemzetközi kooperáció keretében hajtottuk végre. A kutatómunkához kapcsolódott egy másik alapkutatói projekt is (OTKA K62970, témavezető: Dr. Ádány Sándor); az ott elért eredményeket felhasználtuk az imperfekciók elemzése során. A nagy számítási igényű numerikus analízis hardver/szoftver hátterét, valamint a nagyszámú kutatócsoport nemzetközi konferenciákon való publikálási lehetőségét az OTKA projekt biztosította.

A kutatómunkát az alábbi fő lépésekben végeztük el:

1. A vizsgálati módszer általános elveinek és metodikájának kidolgozása.
2. Numerikus modell fejlesztés és ellenőrzés.
3. Imperfekciók és gyártási sajátfeszültségek meghatározása és modellezése.
4. Méretezési eljárások kidolgozása.

A 2-4. lépések szerkezet függőek, ezért ezeket a fentiekben bemutatott szerkezeti típusokra dolgoztuk ki és alkalmaztuk.

A kutatás során felhasználtuk az előző OTKA projektünk eredményeit, amely jelentősen növelte a munkánk hatékonyságát: T 035147: Vékonyfalú acélszerkezetek kölcsönhatási jelenségei, témavezető: Dunai László, 2001-2004.

2. A kidolgozott módszerek, eljárások és elvégzett vizsgálatok

Ebben a fejezetben röviden összefoglaljuk a projekt során elért eredményeket; a részletek a hivatkozott cikkekben találhatóak. A kutatómunkát több ipari és nemzetközi projekttel párhuzamosan – részben átfedésben – hajtottuk végre. Így a publikációk esetenként más kutatási projekthez is kapcsolódnak; ezért a jelen alapkutatói projekt eredményeit pontosítjuk a leírásban, illetve az értekezések téziseiben.

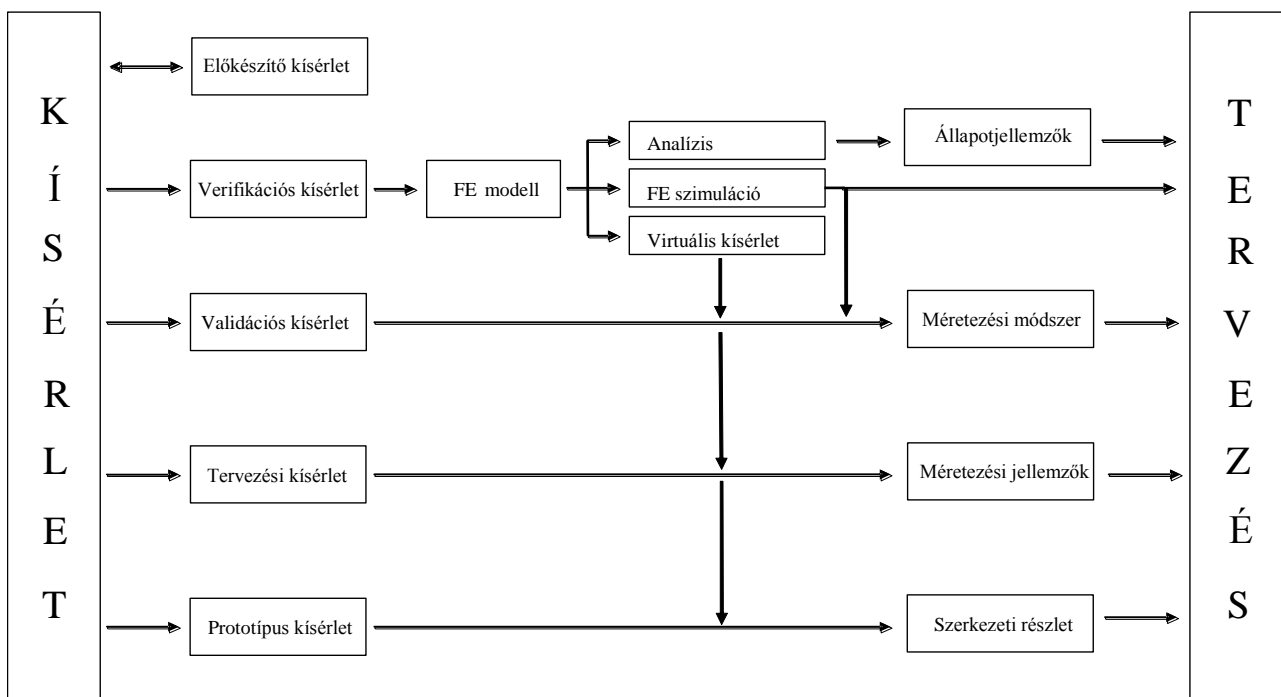
2.1 Vizsgálati módszertan

A nagypontosságú szerkezeti analízisen alapuló méretezési eljárás fejlesztésére egy általános kutatási módszertant dolgoztunk ki, melyet az 1. ábra illusztrál és részletei [1]-ben találhatóak.

A stratégia egységes rendszerbe integrálja a kísérleti és a numerikus kutatási eszközöket és magába foglalja a rendszert működtető humán erőforrást is.

A módszertan alappillére a kísérleti vizsgálat: a különböző típusú kísérleteket az alkalmazási célok alapján definiáltuk. A kísérleti viselkedési módok kvalitatív és kvantitatív értékelési módszerét az adott problémákra és a különböző típusú kísérletekre külön-külön dolgoztuk ki.

A numerikus vizsgálatok fejlett modelleken alapulnak, amelyek követik a szerkezet meghatározó – többnyire igen összetett, nemlineáris – viselkedését. A modellek ellenőrzése kísérleti alapon történik; azok alkalmazhatók egyrészt (i) közvetlenül méretezési módszerként, másrészt (ii) a kísérleti vizsgálatok kiterjesztésére, „virtuális kísérletek” elvégzésével.



1. ábra: A kutatás módszertana: kísérlet – végeselemes modellezés és analízis – méretezés.

2.2 Numerikus modellek

Adott szerkezet típusokra és szerkezeti részletekre különböző végeleemes numerikus modelleket fejlesztettünk az Ansys végeleemes program felhasználásával. A nagy szabadságfokú modelleken a kezdeti geometriai imperfekciók és sajátfeszültségek figyelembe vételével geometriailag és anyagilag nemlineáris analízist hajtottunk végre. Imperfekció érzékenységi és konvergencia vizsgálatokat végeztünk, illetve az ellenőrzéshez felhasználtuk a korábbi és a jelen alapkutatóval párhuzamosan végzett kísérleteink eredményeit. A fejlesztés eredményeként megfelelő pontosságú és az adott hardver környezetben hatékonyan működő végeleemes modelleket kaptunk.

A modell fejlesztéshez kapcsolódó eredményeink az alábbi publikációkban találhatóak:

Felületszerkezeti modellek:

- vékonyfalú hegesztett szerkezeti elemek [6, 7, 10, 16, 21, 27]
- hidegen alakított szerkezetek [4, 5, 12, 14, 15, 23]
- merevített lemezek [2, 22, 26]
- alumínium pályalemez szegmens [2, 22]

Test végeleemes modellek:

- öszvérfödém nyírt kapcsolatok [15]
- hegesztett szerkezeti részletek [2, 7]

Vegyés, felület-rúd, felület-test végeleemes modellek:

- csavarozott csomópontok [4, 14]
- öszvérszerkezetek [3]

2.3 Imperfekciók és sajátfeszültségek

A geometriai imperfekciók és a sajátfeszültségek numerikus modellezéséhez először olyan alpméréseket végeztünk el, amelyek a gyártási és szerkezet viselkedési modellezés verifikációs bázisául szolgálnak. A hegesztéses gyártás numerikus szimulációjával olyan eljárásokat fejlesztettünk ki, amelyek az imperfekció kialakulási folyamatát képesek követni. Az imperfekciók szerkezeti viselkedésre gyakorolt hatását – a numerikus modellezéssel párhuzamosan – paraméteres imperfekció érzékenységi vizsgálatokkal elemeztük.

Eredményeinket az alábbi disszertációk és publikációk foglalják össze:

Geometriai imperfekciók és sajátfeszültségek laboratóriumi meghatározása:

- **Hegesztett vékonyfalú szerkezeti elemek:** a hegesztés hatásának elemzésére gyártócsarnokban végrehajtottunk egy állapotmérést, amely során a hegesztés közbeni hőmérsékletváltozást követtük; az elkészült szerkezeti elemeket laboratóriumban vizsgáltuk: mértük a geometriai imperfekciókat, sajátfeszültségeket, végül teherbírasi kísérleteket hajtottunk végre rajtuk [7, 17, 18, 25].
- **Alumínium-szerkezetek:** Friction Stir Welding (FSW) hatására kialakuló kilágyulás mint anyagi inhomogenitás jellemzése, az anyagjellemzők meghatározása az Osaka University-vel való együttműködés keretében [2].

- Merevített lemezek: az előző pontban részletezett hegesztett szerkezeti elemek egy részéből további hegesztéssel merevített lemez próbatesteket alakítottunk ki a laboratóriumban, amelyeken mértük és elemeztük az imperfekciók és sajátfeszültségek változását a gyártás (merevítőbordák hegesztése) folyamán [2, 26].

Hegesztés gyártási szimulációja:

Építőmérnöki acélszerkezet hegesztéses gyártásának szimulációját a Heriot-Watt University-vel való együttműködés keretében dolgoztuk ki. A kidolgozott eljárás eredménye a lemezelemkből virtuális gyártással összeállított hegesztett szerkezet, amely tartalmaz geometriai imperfekciókat és sajátfeszültségeket; így elemezhető a különböző gyártástechnológiai megoldások hatása, a kialakult virtuális kísérleti modell viselkedése pedig tovább vizsgálható nemlineáris végelelemes analízis végrehajtásával [7, 17].

Imperfekció érzékenységi vizsgálatok:

Az geometriai imperfekciók és sajátfeszültségek szerkezeti viselkedésre gyakorolt hatását szerkezet típusonként, nagyszámú paraméteres virtuális kísérletekkel vizsgáltuk, az alábbiak szerint:

- Hegesztett vékonyfalú szerkezeti elemek: egyoldalú sarokvarrattal kialakított hegesztett gerendák [21], trapézgerincű hegesztett gerendák [6, 13].
- Hidegen alakított szerkezeti elemek: geometriai imperfekció alakjának meghatározása [4, 12, 19, 24]; érzékenységi vizsgálatok [4, 5].
- Merevített lemezek: hegesztett merevített lemezek imperfekció érzékenységének elemzése [1, 2, 26].

2.4 Méretezési eljárások

Az előzőekben bemutatott, pontosított – imperfekciókat, sajátfeszültségeket tartalmazó – végelelemes modellek alkalmassá váltak a valós teherbírási kísérletek részleges kiváltására, illetve kiterjesztésére. Virtuális kísérleteket hajtottunk végre különböző szerkezeti elemeken, csomópontokon és szerkezeteken, geometriai és anyagi nemlinearitást és imperfekciókat figyelembevevő analízisek útján. A virtuális kísérleti programok eredményei alapján különböző méretezési eljárásokat dolgoztunk ki, az 1. ábrán látható algoritmus alapján, az Eurocode szabvánnyal konform módon [11]. Eredményeinket az alábbi publikációkban jelentettük meg:

Vékonyfalú hegesztett szerkezetek:

- Trapézgerincű gerenda: méretezési zárt formula kidolgozása virtuális kísérletek alapján [6, 10, 13].
- Trapézgerincű gerenda: helyettesítő geometriai imperfekciókon alapuló méretezési eljárás kidolgozása laboratóriumi és virtuális kísérletek alapján [6, 16].
- Hegesztett keretszerkezet: végelelemes szimulációs elven alapuló méretezési eljárás kidolgozása [27].
- Hegesztett alumínium pályalemez szegmens, gerenda: beroppanás és hajlítás kölcsönhatása; a szabványos méretezési módszer pontosítása; végelelemes szimulációs elven alapuló méretezési eljárás kidolgozása [2, 28].

Hidegen alakított vékonyfalú szerkezetek:

- Szelemen-rendszer: végeelemes szimuláción alapuló méretezési eljárás kidolgozása [4].
- Rácsostartó-rendszer: laboratóriumi és virtuális kísérletek alapján méretezési eljárás kidolgozása külpontosan húzott/nyomott szerkezeti elemekre és csavarozott csomópontokra [5, 8, 14].

Merevített lemezek:

- Szabványos méretezési eljárások módosítása virtuális kísérletek alapján [21, 26].
- Végeelemes szimulációs elven kidolgozott méretezési eljárások [2, 22, 26].

Öszvérszerkezetek:

- Szabványos méretezési eljárás kidolgozása hidegen alakított gerendával együttműködő öszvérgerenda méretezésére laboratóriumi és virtuális kísérletek alapján [3].
- Öszvérszerkezeti elem véglemezes csomópont kialakítására szerkesztési szabályok kidolgozása laboratóriumi kísérletek és numerikus analízis alapján, ciklikus teher hatására [9].
- Profillemezes öszvérfödém behengerelt együttműködő kapcsolatára méretezési eljárás kidolgozása laboratóriumi és virtuális kísérletek alapján [15, Seres N. PhD disszertáció – tanszéki vita: 2012. február 3].

3. Az elért eredmények bemutatása

3.1 Új tudományos eredmények

Az OTKA kutatás eredményeiből több értekezés tézisei kerültek elfogadásra, az alábbiak szerint:

1. Dunai, L.: Innovative steel and composite structures, MTA doktori disszertáció, 2008 – 3. és 4. tézis.
2. Vigh, L.G.: Virtual and real test based analysis and design of non-conventional thin-walled metal structures, BME Építőmérnöki Kar, PhD disszertáció, 2006, témavezetők: Dunai, L., Okura, I. – 2, 3. és 4. tézis.
3. Erdélyi, Sz.: Light-gauge steel and concrete composite beams, BME Építőmérnöki Kar, PhD disszertáció, 2007, témavezető: Dunai, L. – 4. tézis.
4. Joó, A.L.: Analysis and design of thin-walled roof systems, BME, Építőmérnöki Kar, PhD disszertáció, 2009, témavezető: Dunai, L. – 1. és 5. tézis.
5. Jakab, G.: Analysis and design of cold-formed C-section members and structures, BME, Építőmérnöki Kar, PhD disszertáció, 2010, témavezető: Dunai, L. – 1, 4. és 5. tézis.
6. Kövesdi, B.: Patch loading resistance of girders with corrugated webs, BME, Építőmérnöki Kar, PhD disszertáció, 2010, témavezető: Dunai, L., Kuhlmann, U. – 1, 2, 4. és 5. tézis.
7. Néző, J.: Virtual fabrication of full size welded steel plate girder specimens, Heriot-Watt University, Edinburgh, PhD disszertáció, 2010, témavezetők: Topping B.H.V., Dunai, L. – valamennyi új eredmény.

3.2 Publikációk

Az alábbiakban bemutatjuk az összegző jellegű folyóiratcikkeket és azokat a konferenciacikkeket, amelyek vagy nem kerültek publikálásra folyóiratban, vagy jelentős kiegészítő eredményeket tartalmaznak a folyóiratcikkekhöz képest. A korábbi éves OTKA jelentések közleményeiben részletesen bemutatjuk a kutatás során készült egyéb publikációkat is.

Folyóiratcikk

8. Jakab, G., Dunai, L.: Resistance of C-profile cold-formed compression members: test and standard, *Journal of Constructional Steel Research*, 64:(7-8), pp. 802-807, 2008, IF: 0.841
9. Kovács, N., Calado, L., Dunai, L.: Experimental and analytical studies on the cyclic behaviour of end-plate joints of composite structural elements, *Journal of Constructional Steel Research*, 64:(2), pp. 202-213, 2008, IF: 0.841
10. Kövesdi, B., Kuhlmann, U., Dunai, L.: Combined shear and patch loading of girders with corrugated webs, *Periodica Politechnica – Civil Engineering*, 54:(2), pp. 79-88, 2010, IF: 0.077
11. Dunai, L.: Végeselemes analízisen alapuló méretezési elvek az Eurocode 3-ban, *MAGÉSZ Acélszerkezetek*, VI:(3) pp. 66-72, 2009.
12. Joó, A.L, Ádány, S.: FEM-based approach for the stability design of thin-walled members by using cFSM base functions, *Periodica Politechnica – Civil Engineering*, 53:(2), pp. 61-74, 2009, IF: 0.222
13. Kövesdi, B., Braun, B., Kuhlmann, U., Dunai, L.: Patch loading resistance of girders with corrugated webs, *Journal of Constructional Steel Research*, 66, pp. 1445-1454, 2010, IF: 1.003
14. Dunai, L, Jakab, G: Stability behaviour and design of nonconventional cold-formed steel structures - research review, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 11:(5), pp. 903-927, 2011, IF: 0.644
15. Seres, N., Dunai, L.: Experimental and numerical studies on concrete encased embossments of steel strips under shear action of composite slabs with profiled steel decking, *Journal of Steel and Composite Structures*, 11(1), pp. 39-58, 2011, IF: 0.532
16. Kövesdi, B, Dunai, L: Determination of the patch loading resistance of girders with corrugated webs using nonlinear finite element analysis, *Computers & Structures*, 89:(21-22) pp. 2010-2019, 2011, IF: 1.719
17. Néző, J, Dunai, L, Topping, B.H.V.: A mixed time integration scheme for virtual fabrication of steel plate girders, *Computers & Structures*, 89:(21-22) pp. 1859-1873, 2011, IF: 1.719

Nemzetközi konferencia-kiadványban megjelent cikk

18. Dunai, L., Jakab, G., Néző, J., Topping, B.H.V.: Experiments on welded plate girders: fabrication, imperfection and behaviour, 1st International Conference on Advances in Experimental Structural Engineering, Nagoya, Japan, Proceedings, Vol. 1, pp. 51-58, 2005.

19. Ádány, S., Joó, A.L., Schafer, B.W.: Approximate identification of the buckling modes of thin-walled columns by using the cFSM modal base functions, International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, Lisbon, Portugal, Sept. 6-8, 2006, Proceedings, P.B., IST Publisher, 197-204, 2006.
20. Vigh, L.G.: On the Eurocode buckling formulas of multi-stiffened metal plates, International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, Lisbon, Portugal, Sept. 6-8, 2006, Proceedings, P.B., IST Publisher, 545-552, 2006.
21. Jakab, G., Szabó, G., Dunai, L.: Imperfection sensitivity of welded beams: experiment and simulation, International Conference on Metal Structures, ICMS 2006, Poiana Brasov, Romania, Balkema, 173-181, 2006.
22. Vigh, L.G., Dunai, L.: Standardized FE simulation based design – applications and experiences, International Conference on Metal Structures, ICMS 2006, Poiana Brasov, Romania, Balkema, 257-264, 2006.
23. Honfi, D., Dunai, L.: Experimental and numerical investigation of hat-shaped beam members with hole in the web, International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, Lisbon, Portugal, Sept. 6-8, 2006, Proceedings, P.B., IST Publisher, 705-712, 2006.
24. Ádány, S., Joó, A. L., Moen, C., Schafer, B.W.: Identification of FEM buckling modes of thin-walled columns by using cFSM base functions, Fifth International Conference on Coupled Instabilities in Metal Structures, CIMS 2008, June 23-25, 2008, Sydney, Australia, Proceedings, 2008.
25. Dunai, L., Jakab, G.: Plate girders fabricated by single sided fillet weld: imperfections, tests, resistances, International Conference on Design, Fabrication and Economy of Metal Structures, DFE 2008, May, 2008, Miskolc, Hungary, Proceedings, 2008.
26. Vigh, L.G., Dunai, L.: Advanced stability analysis of regular stiffened plates and complex plated elements, International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures, SDSS' Rio 2010, Rio de Janeiro, Brazil, Keynote Lecture, Proceedings, pp. 81-100, 2010.
27. Joó, A. L., Dunai, L.: Finite element simulation based design of steel frames, 6th European Conference on Steel and Composite Structures, EUROSTEEL 2011, Budapest, Hungary, Aug. 31 - Sept. 2, pp. 2451-2456, 2011.

3.3 Nemzetközi együttműködés

Az OTKA kutatás tárgya nemzetközi szempontból az adott szakterület kiemelt témái között szerepel. Szoros kapcsolatot tartottunk fenn a kutatás során az alábbi nemzetközi kutatókkal:

L. Calado, TU Lisbon, Portugal

U. Kuhlmann, Stuttgart University, Germany

I. Okura, Osaka University, Japan

B. Schafer, Johns Hopkins University, Baltimore, USA

B.H.V. Topping, Heriot-Watt University, Edinburgh, Scotland

F. Werner, Bauhaus University, Weimar, Germany

3.4 A kutatás eredményeinek hasznosítása

Amint azt az 1.2 fejezetben említettük a kutatás témája kapcsolódik több nemzetközi együttműködéshez és alkalmazott ipari K+F projekthez, emiatt az alapkutatási eredmények egy része közvetlenül hasznosításra került. A kidolgozott végeselemes szimulációs eljárást alkalmaztuk a dunaújvárosi Pentele-híd szerelési állapotának tervezése, a budapesti Megyeri-híd független statikai ellenőrzése, egy új generációs acélszerkezetű hűtőtorony prototípusának fejlesztése, valamint meglévő hegesztett keretszerkezetek élettartamának ellenőrzése során [1, 2, 26, 27].

A kidolgozott módszerek támogatták vékonyfalú szerkezeti rendszerek fejlesztését: öszvérfödém [3], szelemenrendszer [4], rácsostartó rendszer [5].

A kidolgozott, illetve kidolgozás alatt lévő méretezési eljárások hiánypótlóak és az Eurocode szabványon alapulnak; felhasználásuk közvetlenül lehetséges a gyakorlatban.

Az eredmények hasznosításra kerültek/kerülnek a nemzetközi szabványfejlesztési folyamatban is. A végeselemes szimuláción alapuló méretezés fejlesztésével az Európai Acélszerkezeti Szövetség (ECCS) szakbizottságai intenzíven foglalkoznak. A Task Working Group 8.3: Stability – Buckling (TWG 8.3) bizottságnak tagjai vagyunk és eredményeink megjelennek a méretezési ajánlásokban és az Eurocode szabvány új, 2015-ben kiadandó változatában [6, 13, 16, 20].

Fontos hasznosítását látjuk a projekt eredményeinek a fejlett végeselemes analízisen alapuló acél- és öszvérszerkezeti méretezés MSc szintű egyetemi oktatásában, az AcélVEM tárgy keretében.

3.5 A kutatás folytatása

A kutatómunka alap gondolatát már eddig is több szerkezeti típusra alkalmaztuk. A kutatás folytatása lehetséges:

- a kidolgozott módszer alkalmazásával az adott szerkezet továbbfejlesztésére K+F kutatás keretében, és
- a módszer kiterjesztésével új típusú szerkezetre.

További alapkutatást tartunk szükségesnek az alábbi területeken:

- a hidegalakítás gyártási szimulációjával a hidegen alakított szerkezeti elemek imperfekcióinak pontosabb meghatározása;
- öszvérszerkezetek acél-beton kölcsönhatása következtében kialakuló összetett tönkremeneteli módok vizsgálata nagy pontosságú modelleken alapuló virtuális kísérletek alapján;
- korrodált szerkezetek módosult geometriáját és imperfekcióit figyelembevevő modellek kidolgozása és alkalmazása laboratóriumi és helyszíni mérésekkel párhuzamosan a maradó teherbírás meghatározására,
- hegesztett acél szerkezeti elemek ciklikus képlékenyedésének vizsgálata.