

MTA DOKTORI ÉRTEKEZÉS

**Acélszerkezetek integrált analízise és méretezése: az
újszerű eljárásoktól az alkotásig**

TÉZIS

Írta:

Papp Ferenc CSc.

aki a Magyar Tudományos Akadémia doktora
cím elnyerésére pályázik

Győr, 2018

1. Bevezetés

A műszaki tudomány kandidátusa fokozat megszerzését követő két évtizedben (1996-2018) a kutató-alkotói tevékenységemet az acél tartószerkezetek integrált számítógépes analízise és méretezése témára összpontosítottam. A téma a *műszaki tudományok* tudományterületéhez, azon belül az *építőmérnöki tudományok* tudományágához kötődik. Munkásságom legfőbb eredményének a ConSteel integrált acélszerkezeti méretező szoftver tudományos-szakmai alapjainak lerakását és folyamatos fejlesztését tartom (ConSteel, 2017). A kutatási eredményeim ebben az innovatív szoftverben tárgyiasultak, és váltak a szerkezet-építőmérnök társadalom számára elérhetővé.

Az értekezésemben a közel 20 éves munka eredményét foglalom össze. Bemutatom a ConSteel szoftver tudományos alapjait és innovatív méretezési módszereit, kiemelten kezelve az utolsó két évben kidogozott, az *egyenértékű geometriai tökéletlenség* elven alapuló stabilitásvizsgálati módszert. Az alkotó munkám eredményeit a ConSteel szoftver három ágensén, és egy kiválasztott műszaki alkotásomon keresztül mutatom be. Felvázolom, hogy az alkalmazott mechanika, az alkalmazott információs technológia és a méretezéselméleti alapkutatás szinergiájából hogyan született meg egy innovatív szoftver, és annak alkalmazásával számos műszaki alkotás.

1.1 Tudományos előzmények

A ConSteel szoftver tudományos-szakmai alapjait és prototípusát a műszaki alkotásomnak tekintem. Ezt a jogomat a BME Habilitációs Tanácsa az „*Acélszerkezetek integrált számítógépes méretezése: kutatástól a megvalósításig*” című habilitációs tézisének (Papp, 2009) alapján 2010-ben elismerte. Az elmúlt két évtizedben folytatott tudományos-szakmai tevékenységemnek meghatározó szerepe volt a ConSteel szoftver létrejöttében és folyamatos fejlődésében. Az alkotás újszerűségét és szakmai értékeit az alábbi részterületeken elért eredményeim rövid leírásával mutatom be:

- újszerű méretezéselméleti megközelítések;
- fejlett rúd vége-selemes analízis;
- objektum orientált modellezése.

Az előírásokkal szabályozott mérnöki méretezés tudományos hátterét a **méretezéselmélet** tudományága biztosítja. Az acélszerkezetek méretezésének tudományos előzményrendszerét a szerkezetek túlnyomó részét kitevő hagyományos és szabályos szerkezeti elemek körében vizsgálom, az elemzésből kizárom a kifejezetten vékonyfalú, illetve a különleges kialakítású szerkezeti elemeket és szerkezeteket.

Az acélszerkezetek méretezésében a stabilitásvizsgálatnak kiemelt szerepe van: a szerkezetek tönkremenetelének jelentős részét a stabilitásvesztés okozza. A jelen áttekintést az acélszerkezeti elemek globális stabilitásvizsgálatára korlátozom.

A két végén csuklósan megfogott és állandó erővel központosan nyomott állandó keresztmetszetű tökéletlen acélrúd kihajlási ellenállása meghatározásának részletes tudománytörténeti összefoglalását megtaláljuk az Iványi Miklós által összeállított szöveggyűjteményben (Halász és Iványi, 2001:a). A múlt század '80-as éveinek végére létrejött a nagyszámú laboratóriumi és numerikus kísérletekből álló adatbázis, amelyen kalibrálták az Ayrton-Perry ellenállási formulát, és ezzel a nyomott acélrúd méretezése tudományos alapokra került. A fejlődés sarokköveinek tartom Beer és Schulz, valamint Strating és Vos numerikus szimulációit (Beer and Schulz, 1970; Strating and Vos, 1973), Maquoi és Rondal kalibrációs vizsgálatait (Maquoi and Rondal, 1978), továbbá Fukumoto és Itoh javaslatát a bővített kísérleti adatbázison alapuló új kihajlási görbékre (Fukumoto and Itoh, 1983). A kutatási eredmények összegzése elvezetett az Eurocode 3 szabványban rögzített kihajlási ellenállási formulához (MSZ EN 1993-1-1, 2005:a). A szabvány lezárását követően a témában új

eredményt Silva és társai kutatása hozott, akik a méretezési formula megbízhatóságát vizsgálták (Silva et al. 2016a). Kutatásuk két fontos eredményre vezetett: (i) a kihajlási ellenállás képletében a $\gamma_{M1}=1.0$ parciális tényező a biztonság kárára van, különösen a nagy karcsúságú rudak esetén, (ii) a kezdeti belső feszültségek nem lineárisan függnek a folyásértéktől. További új eredményekre, pontosabban az ismert formulák újraértelmezésére, az elterjedőben lévő nagyszilárdságú acélanyagok kapcsán számítottak. Ilyen eredményről számol be Kövesdi és Somodi cikke (Kövesdi and Somodi, 2018).

A kifordulásra érvényes Ayrton-Perry formulát Costa és Rondal azzal a feltételezéssel vezette le, hogy a gerenda kezdeti tökéletlensége csak a tengely körüli elcsavarodásból áll (Costa and Rondal, 1987; Halász és Iványi, 2001:c). Az általuk levezetett kifejezés harmadfokú, amelynek megoldása zárt alakban nem írható fel, így a kutatók a kihajlás esetére levezetett másodfokú formula alkalmazását javasolták. A szabványt 2005-ben úgy zárták le, hogy a kifordulási ellenállási formula kalibrálásához nem állt rendelkezésre megfelelő számú mintát tartalmazó kísérleti adatbázis. A szabvány lezárása után fokozott kutatás indult olyan ellenállási formulák megalkotására, amelyek tudományosan megalapozott kísérleti adatbázisokra támaszkodnak, és megfelelnek a feltörekvőben lévő modell alapú integrált méretezési paradigmának (Papp, 2009). Jelentős előrelépést hozott Taras és Greiner munkája, amikor a végein villásan megfogott és állandó nyomatékkal terhelt gerenda kifordulásának vizsgálatát a konzisztens Ayrton-Perry formulára alapozták (Taras and Greiner, 2010). Ezzel párhuzamosan jelentettük meg az Ayrton-Perry formula általánosítását, ami teljes azonosságot mutatott a Taras és Greiner által alkalmazott formulával (Szalai and Papp, 2010). A referenciaelemtől eltérő megtámasztási és terhelési feltételekre Taras és Greiner nem talált konzisztens megoldást (Taras and Unterweger, 2012:a). Az értekezésemben Taras és Greiner alapformulája kiemelt szerepet kapott.

A két végén villásan megtámasztott, központosan nyomott és az erős tengely körül hajlított gerendára vonatkozó viszonylag kevés számú teherbírási kísérletet elsősorban külpontosan nyomott rudakon végeztek. Megfelelő számú kísérleti eredményt tartalmazó adatbázis és megfelelő mechanikai tartalommal rendelkező ellenállási formula hiányában az Eurocode 3 a nyomott és hajlított elemek ellenállását a tiszta esetek ellenállásainak lineáris interakciójával határozta meg (MSZ EN 1993-1-1, 2005:c). Greiner, majd Boissonade és társai a formula interakciós tényezőit nagyszámú numerikus kísérleti eredményen kalibrálták (Greiner, 2001; Boissonade et al. 2002). A formula csak a két végén villásan megfogott, az elemvégek között szabad vagy oldalról folyamatosan megtámasztott, állandó szelvényű elemekre érvényes. A kalibráció érvényességi körébe tartozó esetekre a formula megfelelő pontossággal becsüli a teherbírást, azonban más esetekben jelentős hibát eredményez.

Az elmúlt tíz évben a lineáris interakciós formula kiváltására több javaslat született. Szalai ötlete alapján már 2010-ben közzétű az Ayrton-Perry formula általánosítását kihajlás és kifordulás interakciójára, rögzített normálerő esetében (Szalai és Papp, 2010). A formula alapján Silva kutatócsoportja (ISISE) egy EC3 konzisztens módszert dolgoztak ki (Tankova et al. 2017). Közben Szalai elvégezte az Ayrton-Perry formula teljes általánosítását (Szalai, 2017). Az ECCS TC8 Stability tudományos bizottság 2017-ben Drezdában tartott rendes ülésén Feldmann (RWTH Aachen) egy új megközelítésről számolt be, amelyben konzisztens imperfekciós tényezők alkalmazásával egységes csökkentő tényezőt alkalmaz a kihajlás és a kifordulás interakciójára (Feldmann, 2017; Feldmann et al. 2017). Az eredmények ellenére átfogó megoldás nem született.

A szerkezetek **végeleemes analízise** az elmúlt évtizedekben hatalmas fejlődésen ment keresztül. Megjelentek a napi tervezési munkát támogató, az elmozdulásmódszeren alapuló speciális szerkezettervező szoftverek (Structural Design Software; továbbiakban: SDS).

A viszonylag kis alakváltozást szenvedő, viszonylag vékonyfalú szelvényekből épített nyomott-hajlított acélszerkezeti elemek modellezésében a leghatékonyabb mechanikai eszköznek a 14 szabadságfokú rúd végelem bizonyult. Az elem klasszikus változatát Rajasekaran publikálta (Chen and Atsuta, 1977:a). Az elem továbbfejlesztett változatai jól alkalmazható numerikus eljárásokhoz

vezetettek, mind az anyagilag lineáris analízis (ConSteel, 2013), mind a nemlineáris analízis területén (Szalai and Papp, 2005a, 2005b; Szalai, 2007). A végeelem az összes feszültségeredő (normálerő, hajlítónyomaték, nyíróerő és csavarónyomaték) másodrendű hatását figyelembe veszi.

A méretezés gyakorlatában a héj végeelemes analízis kiegészíti a rúd végeelemes analízist: alkalmazásának célja általában a rúdmodell alapú analízis pontosságának ellenőrzése, vagy a globális szerkezet egyes részleteinek pontosabb vizsgálata. Az elmúlt évtizedekben a nemzetközi kutatás felmérhetetlen tudásanyagot halmozott fel a héj végeelemes módszer területén. A kutató-fejlesztő munkám során Vörös helyzetelemzését követtem: „...egy gyakorlati mérnöki tervező programrendszer (SDS) akkor őrizheti meg a hatékonyságát, ha csak néhány, de több célra alkalmas elemtípust használ. Numerikus vizsgálatok bizonyították, hogy a vastag és sík héjelemek a görbült héjfelületek tetszőleges pontosságú számítására is alkalmasak, miközben az elemi merevségi mátrixok egyszerűbbek, a számítás gyorsabb és pontosabb...” (Vörös, 2003).

A mérnöki gondolkodás alaptermészetéből következik az **objektum-orientált** megközelítés. Ezt a megközelítést alkalmaztam a szerkezeti és a mechanikai modellek megfogalmazásánál. Az értekezésemben a ConSteel koncepció két domináns részterületét mutatom be: (i) a keresztmetszetek modellezését, és (ii) a szerkezeti elem modellezését.

A viszonylag vékonyfalú rúdszerkezeti elem nominális keresztmetszeti jellemzőinek származtatása megtalálható Ypban korai, orosz nyelvű összefoglaló művében (Ypban, 1955). Chen és Atsuta átfogó leírást közölt a nagyhírű könyvükben (Chen and Atsuta, 1977:b). Az integrál kifejezésekkel felírt jellemzők kiszámítására Kollbrunner és Basler közölt korai, kézi számításra alkalmas eljárást, amely a Simpson-formulán alapul (Kollbrunner and Basler, 1966). A végeelemes analízis térnyerésével elterjedtek a numerikus módszerek, amelyek közül a Pilkey által közzétett, háromszög hálózaton alapuló végeelemes eljárást emelem ki (Pilkey, 2002). A századunk elejére a rúdelem keresztmetszeti jellemzőinek származtatása és az integrál kifejezések kiszámítása megoldott kérdéssé vált. A kutatás iránya a számítási módszereknek az információs technológia legújabb környezetében történő alkalmazása felé fordult. Az SDS rendszerek stratégiai kérdésévé vált a komplex megoldást célzó keresztmetszeti modul kifejlesztése. Az objektum-orientált programozási paradigma térhódítása magával hozta a rúdszerkezeti keresztmetszetek objektumként történő értelmezését. Az eredmények publikálása, a fentiekből következően, a papír alapú közléstről áthelyeződött a szoftver alapú közzétételre: az innovatív eredmények közvetlenül beépültek a szoftverbe. Ebben a környezetben kivételes esetnek számított az általam kifejlesztett, egységes, objektum-orientált keresztmetszeti osztály publikálása (Papp et al. 2001). A megközelítés újszerűsége abban rejlett, hogy az Eurocode 3 által meghatározott keresztmetszeti jellemzők és szabványos ellenállási formulák számítását egységes, zárt rendszerbe foglaltam (SECTION osztály).

A számítógéppel támogatott acélszerkezeti tervezés három specifikus résztvevőre osztható: építészeti CAD, konstrukciós CAD és SDS. A résztvevők specifikussága miatt a szoftverfejlesztés sokáig egymástól elszigetelve, önálló és öntörvényű környezetben zajlott. A specifikus részrendszerek integrálásának gondolata már a kezdeteknél foglalkoztatta az SDS fejlesztő stratégiákat. Az integrációra alapvetően két út kínálkozott: (i) több alkalmazás egységes rendszerben történő fejlesztése (pl. integrált konstrukciós CAD és SDS), vagy (ii) elkülönülten fejlesztett specifikus alkalmazások modellcseréjének biztosítása világszintű adatmodell szabvány kifejlesztésével. A több részterületet átfogó integrált fejlesztések sorra elbuktak, mert a részterületek fogalmi rendszereinek és adatmodelljeinek egységes rendszerbe foglalása gyakorlatilag megoldhatatlan feladatot jelent. Ugyanakkor egy korszerű acélszerkezeti SDS alkalmazással szemben alapvető elvárás, hogy a szerkezeti modell, illetve a modellt alkotó szerkezeti elemek objektumrendszere kompatibilis legyen a konstrukciós CAD alkalmazások világában formálódó objektum-rendszerrel (Papp, 2006). A CAD orientált szemléletmód alaptétele, hogy a szerkezeti

modellt alkotó objektumok feleljenek meg a gyártási és szerelési egységeknek, illetve azok kapcsolatainak. Az SDS szerkezeti és kapcsolati objektum-rendszerének a CAD-rendszerhez tartó konvergenciájának gátat szabnak a két rendszer között fennálló lényegbeli különbségek.

1.2 Célkitűzés

Az értekezésemben tágabb megközelítésben az acélszerkezetek modell alapú méretezésével foglalkozom, szűkebb megközelítésben a modell alapú stabilitási méretezés egy innovatív módszerével, amely az *egyenértékű geometriai tökéletlenség* elvén alapul. A modell alapú stabilitási méretezéssel kapcsolatos bármely probléma a három tudományos részterület (méretezésmélet, numerikus analízis és objektum-orientált modellezés) által meghatározott térben vizsgálható. Az acélszerkezeti elemek stabilitási méretezését történetileg az Ayrton-Perry formulára (továbbiakban: AP formula) alapozott csökkentő tényező módszer (Overall Stability Design Method, továbbiakban: OSDM) határozza meg. Az AP formula mechanikai értelemben a geometriailag tökéletlen rugalmas rúdelem szilárdsági határállapotát fejezi ki. A valós rúdelem tényleges geometriai és anyagi tökéletlenségeinek hatása a kalibrációt biztosító tökéletlenségi tényezőben jut érvényre, amely tényező a stabilitási csökkentő tényező paramétere. Az előzőkből következik, hogy az OSDM mellett léteznie kell egy duális módszernek: ez a módszer az egyenértékű geometriai tökéletlenség módszer (Overall Imperfection Method, továbbiakban: OIM). Az OIM direkt módon alkalmazza az AP formula mechanikai modelljét: a stabilitási határállapot vizsgálata elvégezhető az egyenértékű geometriai tökéletlenséggel terhelt rugalmas szerkezeti modell keresztmetszeti ellenállásának vizsgálatával, ahol az igénybevételeket másodrendűen (geometriailag nemlineárisan) számítjuk.

Az OIM elven régóta ismert, de eddig csak a síkbeli globális stabilitásvesztés esetére alkalmazták (MSZ EN 1993-1-1, 2005). A módszer alkalmazása térbeli stabilitásvesztési módok esetében fejlett számítógépes analízist igényel. A módszer mérnöki gyakorlatban történő alkalmazásának alapfeltétele a 14 szabadságfokú rúd végeselemes analízis (rövidítve: 14 DOF VEM), vagy annál magasabb szintű (héj- vagy test végeselemes) analízis alkalmazása. A magasabb szintű analízisnek a mérnöki gyakorlatban történő alkalmazását két tényező erőteljesen gátolja: (i) a speciális szakmai felkészültség igénye, és (ii) a vonatkozó szabványok hiánya.

Az értekezésem tágabb célkitűzése, hogy egységes rendszerbe foglaljam a méretezésmélet, a numerikus analízis és az objektum-orientált modellezés területén elért tudományos-szakmai eredményeimet. Ez a téma alkotja az értekezésem befoglaló rétegét. Az értekezésem szűkebb célkitűzése az egyenértékű geometriai tökéletlenség (OIM) elvének általánosítása a globális stabilitásvesztési módokra. Ez a téma jelenti az értekezésem tudományos magját. Az értekezésben nem térek ki az OSDM tárgyalására, mivel azzal mélyebben a téma szakértője, Szalai József foglalkozik. Az objektum-orientált szerkezeti modellezés bevonása a tárgyalásba a tágabb célkitűzésem eléréséhez szükséges. Az értekezésem fontos célja, hogy a szűkebb témát jelentő OIM a mérnöki gyakorlatba beágyazva kerüljön tárgyalásra. A befogadó környezetet a ConSteel szoftver jelenti, amelynek ágenseire saját alkotásként hivatkozom.

1.3 Tudományos módszertan

Az acélszerkezetek méretezésméleti paradigmája változóban van. A jövő módszertana kétséget kizáróan a numerikus kísérleteken alapuló, a tökéletlen szerkezeti modell geometriailag és anyagilag nemlineáris analízisét (GMNIA) alkalmazó méretezési elv (Dunai, 2017). Ugyanakkor a szerkezet-építőmérnöki társadalom napi gyakorlatában az egyszerűsített lineárisan rugalmas statikai

modelleken és általában a biztonság javára közelítő szabványos méretezési formulákon alapuló hagyományos méretezési módszertan még egy-két évtizedig bizonyosan meghatározó marad, különösen az általam vizsgált hagyományos kialakítású acél rúdszerkezetek esetében. Értekezésemben a hagyományos paradigma keretében mutatok be olyan innovatív megoldásokat, amelyek megfelelő pontossággal közelítik az új paradigma alkalmazásával kapható eredményeket.

Az általam követett méretezési paradigmára a következő tudományos módszertan a jellemző. A szerkezetek lehetséges tönkremeneteli formáit határállapotokba soroljuk. Az adott határállapot bekövetkeztéhez tartozó állapotjellemzőket kísérletek alapján, valószínűségi alapon határozzuk meg. A kísérleteket eleinte laboratóriumban valós próbatesteken végeztük, később számítógéppel, a GMNIA módszertan alapján (Strating and Vos, 1973; Somodi and Kövesdi, 2018). A laboratóriumi kísérleteket ma már főleg a numerikus modellek ellenőrzésére használjuk. Az így létrehozott adatbázisra kalibráljuk az egyszerűsített mechanikai modell szabad paraméterét. A vázolt módszertan alapján tudományosan megalapozott globális stabilitásvizsgálati formula csak az egyszerű nyomott rúd kihajlási határállapotára (Silva et al. 2016a) és az egyszerű hajlított gerenda kifordulási határállapotára (Taras and Greiner, 2010) áll rendelkezésünkre. Más esetekben (pl. nyomott-hajlított gerenda vagy keretszerkezet) mérnöki közelítéseket kell alkalmaznunk. Az értekezésem magjában tárgyalt OIM esetén, az irreguláris elemekre történő általánosításnál, szintén mérnöki közelítést (munkahipotézist) alkalmazok. Az eljárásom fejlett 14 DOF FE analízisen alapszik, és felhasználja a fent említett Ayrton-Perry formulára alapozott, tudományos alapokon álló méretezési formulákat.

A fentieknek megfelelően az értekezésemben, annak belső rétegében (OIM), az alábbi lépésekkel leírható módszertant használok:

- kísérleti adatbázis létrehozása (vagy adaptálása) nyomott-hajlított szerkezeti elemekre és szerkezetekre, nemzetközi szinten elfogadott GMNIA modellen végzett numerikus kísérlettel;
- a két alapesethez (nyomott rúd kihajlása és hajlított gerenda kifordulása) tartozó OIM formula származtatása a tudományos háttérrel rendelkező méretezési formulák alapján;
- a formula általánosítása az egyenértékű referenciaelem munkahipotézisének alkalmazásával;
- a 14 DOF végeselemes analízisen és a keresztmetszeti szilárdsági ellenőrzésen alapuló kiértékelő eljárás kifejlesztése;
- az általánosított formula viszonylagos pontosságának kimutatása numerikus kísérleti adatbázis alapján.

A fentiekben megfogalmazott célokat az utóbb meghatározott tudományos módszertant követve kívántam elérni. A munka során létrejött innovatív eredményeket az alábbi 5 tételben fogalmaztam meg.

2. TÉZISEK

Az 1. tézis

Kidolgoztam a viszonylag vékony lemezekből álló acél rúdszerkezeti elem keresztmetszetének egységes objektum-orientált modellrendszerét, ahol a keresztmetszet „természetes” geometriai adataiból általánosított eljárások generálják a duális EPS-GSS nominális keresztmetszeti modelleket, valamint a származtatott hatékony keresztmetszeti modellt (effEPS modell) és a képlékeny viselkedéshez rendelt UPR keresztmetszeti modellt. A keresztmetszeti jellemzők, a feszültségek és a kihasználtságok EN 1993-1-1 alapú számítását a megfelelő modelleken értelmezett általánosított eljárásokkal valósítottam meg. Az általam kidolgozott SECTION osztály tudományos-szakmai értékei biztosítják a ConSteel szoftver SECTION ágensének innovatív tulajdonságait, a folyamatos fejlesztésének lehetőségét, és a nemzetközi szintű versenyképességét.

A tézist alátámasztó publikációk: Papp et al. 2001; Papp, 2003a; Papp, 2005; ConSteel, 2013, 2011 és 2002.

A 2. tézis

Rajasekaran vékonyfalú 14 szabadságfokú rúd végeelemének módosításával az acélszerkezeti tervezésben jól használható geometriailag nemlineáris végeelemhez jutottam. A módosított elemet alapul véve kidolgoztam az acél rúdszerkezetek objektum-orientált szerkezeti és mechanikai modelljét. A kidolgozott modellrendszer saját kutatásaimhoz köthető innovatív tulajdonságai a következők:

- *a nyíróerőknek a súlypontban (referenciapontban) történő értelmezése;*
- *a szerkezeti elem külpontos elhelyezése a referenciatengelyhez képest;*
- *a geometriailag szabálytalan (változó gerincmagasságú) szerkezeti elemek modellezése;*
- *az EPS keresztmetszeti modellel konzisztens duális héjszerkezeti modell generálása.*

A kidolgozott rúdszerkezeti modellrendszer megfelelő alapot biztosít a fejlett méretezési módszerek kutatásához és gyakorlati alkalmazásához.

A tézist alátámasztó publikációim: Papp and Iványi, 2000; Papp et al. 2014a, 2014b, 2014c; ConSteel, 2013, 2011, 2002.

A 3. tézis

Az „általános” stabilitásvizsgálati módszer formulájának felírásával és a nemzeti szabványban történő bevezetésével megelőztem az EN 1993-1-1 szabvány ez irányú folyamatát. A nemzetközi trendet megelőzve a gyakorlatban alkalmaztam a 14 DOF rúd végeelemes analízis és az „általános” stabilitásvizsgálati módszer integrálásán alapuló méretezési eljárást. A hipotézisen alapuló méretezési formula helyességét Szalai legújabb kutatása igazolta. A kutatási eredményeimmel hozzájárultam a

globális stabilitásvizsgálat „általános” módszerének nemzetközi szintű elterjedéséhez, illetve a probléma közeljövőben várható teljes körű megoldásához.

A tézist alátámasztó saját publikációk: Papp, 2003; Papp et al. 2014b; Szalai and Papp, 2017; ConSteel 2013, 2011.

A 4. tézis

Chladný munkásságából kiindulva általánosítottam az egyenértékű geometriai tökéletlenség elvén alapuló globális stabilitásvizsgálati módszert. Az általánosítás során elért részeredmények a következők:

- *Kimutattam, hogy az EC3 5.3.2(11) formula a hajlított gerenda kifordulási problémájára is érvényes. Felírtam a referenciaelem egyenértékű amplitúdójának EC3-al összhangban álló kifejezését.*
- *Kimutattam, hogy a referenciaelem egyenértékű amplitúdója kifordulási probléma esetén is felírható a megfelelő kezdeti geometriai tökéletlenséggel terhelt referenciaelem és célelem legnagyobb összegzett másodrendű normálfeszültségeivel.*
- *Szalai elméleti eredményére alapozva munkahipotézis formájában felírtam a nyomott és hajlított referenciaelem egyenértékű amplitúdóját; 1120 darab referenciaelem GMNIA alapú teherbírési kísérlete alapján meghatároztam a módszer viszonylagos pontosságát.*
- *Munkahipotézisre alapozva általánosítottam a módszert és kidolgoztam az eljárás részletes protokollját. 3299 darab nyomott-hajlított szerkezeti elem GMNIA alapú teherbírési kísérletének eredménye alapján meghatároztam a módszer viszonyított pontosságát. További 4 darab szakirodalmi példa esetében mutattam ki a módszer pontosságát.*
- *Keretszerkezetekre vonatkozóan munkahipotézist állítottam fel a módszer viszonyított pontosságának kutatására.*

A tézist alátámasztó publikációk: Papp, 2016; Hajdú and Papp, 2018; Hajdú et al. 2017.

Az 5. tézis: Alkotások

*A kutatási eredményeim alapján megalkottam a **ConSteel** acélszerkezeti integrált számító és méretező szoftver **SECTION, ANALYSIS** és **DESIGN** ágenseinek koncepcióit és működő prototípusait. A prototípusok alábbi K+F+I tulajdonságai a mai napig meghatározzák a szoftver tudományos-szakmai teljesítményét, biztosítják a versenyképességét és a továbbfejlesztésének lehetőségét.*

*A **SECTION** ágens innovatív tulajdonságai:*

- *objektum-orientált duális (EPS-GSS) keresztmetszeti geometriai modellrendszer;*
- *keresztmetszeti jellemzők teljes spektrumának számítása;*

- szabványos keresztmetszeti ellenállások teljes spektrumának (η_1 - η_4 szintek) számítása az EPS modelleken, általánosított eljárásokkal;
- globális stabilitási ellenállás számítása az EPS modelleken általánosított eljárásokkal.

Az **ANALYSIS** ágens innovatív tulajdonságai:

- objektum-orientált duális rúd- és héjszerkezeti modellezés;
- külpontos szerkezeti elemek és terhek;
- változó gerincmagasságú szerkezeti elemek;
- 14 szabadságfokú rúd végelelemes módszer;
- globális rugalmas stabilitási analízis.

A **DESIGN** ágens innovatív tulajdonságai:

- globális stabilitásvizsgálat az „általános” és az OIM módszerek alapján;
- globális szerkezetvizsgálat a SECTION osztályba zárt általánosított eljárások támogatásával;
- mértékadó vizsgálatok automatikus kiválasztása, a vizsgálati eredmények mélyelemzésének biztosítása.

A ConSteel 3.0 szoftver verzióban implementált ágensek alkalmazásával megalkottam az UTE Stadion „2003 European Award for Steel Structures by ECCS” díjas acélszerkezetének koncepcionális tervét.

A tézist alátámasztó publikációk: Papp et al. 2001; Papp and Iványi, 2000; Papp et al. 2014a, 2014b; Papp et al. 2015; Papp Ferenc és Hegedűs Tamás, 2001; Papp, 2003a.

3. Összegzés

Az acélszerkezetek méretezését korunkban két módszertan (paradigma) határozza meg. A hagyományos módszertan a robosztus rúdszerkezeti modelleken végzett analízis és a szabványos ellenőrzési formulákat alkalmazó méretezés összekapcsolásán alapul. A feltörekvő módszertan a GMNIA módszertanát ülteti át a kutatás szintjéről a napi gyakorlat szintjére. A két módszertan a következő egy-két évtizedben még bizonyosan együtt él. Az értekezésemben a hagyományos módszertanon alapuló integrált eljárásrendszer kutatásával és fejlesztésével foglalkoztam. A javasolt eljárásrendszer a napi tervezési gyakorlatban legtöbbször előforduló acélszerkezeti típusok tervezésére ad olyan megoldásokat, amelyek megfelelő pontossággal közelítik az új módszertan eszközszerkezetével kapható eredményeket.

A kutatói és alkotói tevékenységem eredményeit minősített nemzetközi tudományos és ismeretterjesztő publikációkban adtam közre, és a ConSteel integrált acélszerkezeti méretező szoftverben jelenítettem meg. A két területen elért eredményeimet a jelen értekezésben foglaltam össze. A tudományos eredményeket az értekezés első négy tézisében fogalmaztam meg, az alkotói tevékenységem kiemelt eredményeit az ötödik tézisben.

A kutatás-fejlesztési munkám legfőbb célja az volt, hogy a kutatói területen már ismert 14 DOF rúd végelelemes módszert integráljam a szabványos méretezéssel, és a kapott eljárásrendszert bevezessem a mérnöki tervezés gyakorlatába. Ennek alapfeltétele egy olyan szoftver létrehozása volt, amelyik a napi mérnöki tapasztalatokból építkezik, ugyanakkor képes befogadni az új kutatási eredményeket. Ehhez három részterületen végeztem új eredményekkel járó kutató-fejlesztő munkát.

Az első részterület a keresztmetszetek modellezése és a keresztmetszeti jellemzők számítása volt. Megalkottam az újszerű objektum-orientált EPS keresztmetszeti modellt és kifejlesztettem egy prototípus programot, amely az új koncepció alapján működött. Az eljárás újszerűség, hogy a keresztmetszeti jellemzők számítását és a szabványos ellenállásokat számító eljárásokat az általánosított EPS modellen értelmeztem, és a SECTION osztályba zártam. Az újszerű tudományos eredményeket az **1. tézisben** mondtam ki.

A második részterület a 14 DOF rúd végelemen alapuló analízisnek a napi mérnöki gyakorlatba történő átültetése volt. Megalkottam a ConSteel objektum-orientált szerkezeti modelljének koncepcióját és adatmodelljét. Prototípus programokat fejlesztettem, amelyek alapját képezték a ConSteel szoftver további fejlesztésének. A külpontos elhelyezés és a változó gerincmagasság hatásának figyelembevételével kifejlesztett eljárásom a napi tervezési gyakorlat kiszolgálása mellett alkalmassá vált újszerű méretezési módszerek (OSDM és OIM) kutatására is. A tudományos eredményeket az **2. tézisben** mondtam ki.

A harmadik részterület az „általános” globális stabilitásvizsgálati módszer kutatása és a tervezési gyakorlatba történő bevezetése volt. Az újszerűség a 14 DOF végeleemes analízis és a munkahipotézisen nyugvó „általános” módszer összekapcsolásában, valamint a gyakorlati alkalmazást lehetővé tevő program kifejlesztésében rejlett. Az általam javasolt módszert elsőként az Eurocode 3 magyar nemzeti alkalmazása vezette be, majd később megjelent az európai EN 1993-1-1 szabványban is. Az újszerű tudományos eredményeket az **3. tézisben** mondtam ki.

A három részterületen elért kutatási eredmények szilárd alapot adtak a modell alapú globális stabilitásvizsgálat nemzetközi szintű kutatásához. Az utóbbi évek munkája vezetett el az *egyenértékű geometriai tökéletlenség* elvének (OIM) általánosításához és pontosságának elemzéséhez. Itt kell megemlítenem Szalai kutatását is, aki bizonyította az „általános” módszer formulájának elméleti helyességét, és ezzel a hipotézis szintjéről tudományos alapokra helyezte a téma nemzetközi szintű kutatását. Az újszerű tudományos eredményeimet az **4. tézisben** mondtam ki.

A fenti kutatási eredmények közvetlenül beépültek a ConSteel szoftverbe, amelynek koncepcióját és a későbbi verziók alapját képező prototípus programját saját alkotásomnak tekintem, és azt három tételes alkotás formájában mutattam be. A kutatás és fejlesztés mellett több jelentős acélszerkezet koncepcionális tervezésében vettem részt. Ezek közül az UTE Stadion acélszerkezetét emeltem ki, ahol az alkotási folyamat szorosan kapcsolódott a ConSteel szoftver újszerű tulajdonságaihoz. Az alkotói tevékenységem eredményeit az **5. tézisben** mondtam ki.

A modell alapú integrált analízis-méretezés módszertanának kutatás-fejlesztése a 2002-ben általam megfogalmazott „e-Design koncepció” mentén folytatódik. Az NKFIÁ Vállalati KFI_16 program keretében 2018. év elején elindult a STEELSpace nevű projekt, amelynek rövid címe: „*Integrált tervezési tér a hatékony acélszerkezeti építészetért*”. A K+F+I projekttől jelentős előrelépést várok a ConSteel koncepció vonatkozásában.

A 14 DOF rúd végeleemes analízis és az újszerű OSDM és OIM eljárások általános és összetett térbeli modelleken történő alkalmazhatóságának alapfeltétele a deformációk csomóponton (keretsarkon) történő átvitelének megfelelő megoldása. A téma kutatását a kutatócsoportom és a ConSteel fejlesztői együtt végzik.

A kutatás-fejlesztési eredményeinket (OSDM és OIM), az EN 1993-1-1 új kiadásával összekötve, egy ECCS technikai dokumentumban kívánjuk megjelentetni. A kötet megírására az ECCS TC8 Stability tudományos bizottságának elnöke, Bert Snijder kért fel a bizottság 2017. október 27-i coimbrai ülésén. A könyvben bemutatandó eredmények közvetlenül hasznosíthatók lesznek az SDS alkalmazásokban. Erre feltehetően először a ConSteel szoftverben kerül sor, aminek következtében a szoftver nemzetközi szinten is versenyelőnyre tehet szert.

Az értekezésben bemutatott újszerű méretezéselméleti elvek és eljárások középtávon olyan SDS alkalmazások kifejlesztéséhez vezethetnek, amelyek képesek a modern acélépítészeti jelentős területét robosztus rúdszerkezeti modellezésen alapuló eljárásokkal lefedni. Az eljárások pontossága a tárgyalt szerkezeti kialakítások esetén megközelítik a GMNIA alapján álló tervezési eljárás pontosságát. Más szerkezeti kialakítások esetén (pl. összetett kialakítású csomópontok; különleges kialakítású tartóelemek; stb.) a GMNIA eszköze rendszere jelent megoldást. A két módszertan eszköze rendszerének párhuzamos alkalmazása minden eddiginél hatékonyabb acélszerkezeti tervezést tesz lehetővé.

4. Hivatkozások

- Agüero, A., Pallarés, L. and Pallarés, F.J. (2015a). "Equivalent geometric imperfection definition in steel structures sensitive to flexural and/or torsional buckling due to compression.", *Engineering Structures* 96:160-177.
- Agüero, A., Pallarés, L. and Pallarés, F.J. (2015b). "Equivalent geometric imperfection definition in steel structures sensitive to lateral torsional buckling due to bending moment.", *Engineering Structures* 96:41-55.
- Andrade, A. and Camotim, D. (2005). „Lateral-torsional buckling of singly symmetric tapered beams: theory and application.”, *Journal of Engineering Mechanics ASCE* 131(6):586-597.
- Andrade, A., Providência, P. and Camotim, D. (2010). „Elastic lateral-torsional buckling of restrained web-tapered I-beams.”, *Computers and Structures* 88:1179-1196.
- Anwar, G. (2015). *Assessment and Validation of an Ayrton-Perry Design Methodology for the Verification of Flexural and Lateral-Torsional Buckling of Prismatic Beam-Columns*, MSc Thesis University of Coimbra.
- Badari Bettina (2016). *Új eljárás hajlított és nyomott-hajlított acélszerkezeti elemek stabilitásvizsgálatára*, PhD disszertáció, BME Hidak és Szerkezetek Tanszék.
- Badari, B. and Papp, F. (2015). „On design method of lateral-torsional buckling of beams: State of the art and a new proposal for a general type design method.”, *Periodica Polytechnica-Civil Engineering* 59 (2):179-192.
- Balogh, J. (2003). *An Object-Oriented Architecture for Analysis and Design of Steel Structures*, PhD Dissertation, Colorado State University – Budapest University of Technology and Economics, Fort Collins – Budapest.
- Basaglia, C., Camotim, D. and Silvestre, N. (2011). „Torsion warping transmission at thin-walled frame joints: Kinematics, modelling and structural response.”, *Journal of Constructional Steel Research* 69(1):39-53.
- Beer, H. and Schulz, G. (1970). “Bases théoriques des courbes européennes de flambement.”, *Construction Métallique* 3:37-57.
- Bernuzzi, C., Pieri, A. and Squadrito, V. (2014). „Warping influence on the static design of unbraced steel storage pallet racks.”, *Thin-Walled Structures* 79:71–82.
- Bernuzzi, C., Draskovic, N. and Simoncelli, M. (2015). „European and United States approaches for steel storage pallet rack design: Part 2: Practical applications.”, *Thin-Walled Structures* 97(12):321-341.
- Bijlaard, F., Feldmann, M., Naumes, J. and Sedlacek, G. (2010). “The “general method” for assessing the out of plane stability of structural members and frames and the comparison with alternative rules in EN1993 – Eurocode3 – Part1-1.”, *Steel Constructions* 3(1):19–33.

Boissonade, N., Jaspart, J.P., Muzeau, J.P. and Villette, M. (2002). "Improvement of the interaction formulae for beam columns.", *Computers & Structures* 80:2375-2385.

Barsoum, R.S. and Gallagher, R.H. (1970). "Finite element analysis of torsional and torsional-flexural stability problems.", *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 2:335-352.

Bradford, M. and Cuk, P.E. (1988). "Elastic buckling of tapered Monosymmetric I-beams.", *Journal of Structural Engineering ASCE* 114(5):977-996.

Calgaro, J.A., Bijlard, F., Kuhlmann, U., Snijder, B., Lagerquist, O., Kouhi, J., Naumes, J., Sedlacek, G., Aasen, B., Pope, R., Pescatore, I.P., Saegrov, R. and Müller, V. (2010). *Consistency of the equivalent imperfections used in design and the tolerance for geometric imperfections used in execution*, Document CEN/TC250-CEN/TC135-Liaison, Version February 2010.

Chen, W. and Atsuta, T. (1977). *Theory of Beam-Columns. Vol. 2: Space Behavior and Design*. McGraw-Hill: a:539-608, b:17-47

Chladný, E. and Štujberová, M. (2013a). "Frames with global and local imperfection in the shape of the elastic buckling mode (Part 1).", *Stahlbau* 83(8):609-617.

Chladný, E. and Štujberová, M. (2013b). "Frames with global and local imperfection in the shape of the elastic buckling mode (Part 2).", *Stahlbau* 83(9):684-694.

ConSteel (2013). *Professzionális acélszerkezet tervező szoftver építőmérnököknek*, <http://www.consteel.hu/hu>.

Costa, F.C.M. and Rondal, J. (1987). "Effect des imperfections sur les phénomènes d'instabilité des structures en acier.", *Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics* 451.

Cristea, A.C. and Alexa, P. (2012). „Structural design of a roof steel structure having double curvature.", *Acta Technica Napocensis: Civil Engineering & Architecture* 55(3):263-275.

Dunai, L. (2007). *Innovative steel and composite structures*, MTA Doktora disszertáció, Budapest.

ECCS (2003). *Covering of the UTE Stadium's Grandstand Budapest*, Steel references in Europe: Hungary, (<https://www.steelconstruct.com/old/references>).

Eggemann, H. (2003). „Entwurf, Fertigung und Wirtschaftlichkeit im Stahlbau.", *Stahlbau* 73(4):282

EN 1993-1-5 (2006). *Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1-5: Plated structural elements*:13-17.

Feleki, A. and Nagy, Zs. (2016). "Challenges in structural designing of egg-shaped steel structure." In: 19th IABSE Congress: Challenges in Design and Construction of an Innovative and Sustainable Built Environment:1-8.

Ferreira, J., Real, P.V. and Couto, C. (2017). "Comparison of the General Method with the Overall Method for the out-of-plane stability of members with lateral restraints.", *Engineering Structures* 151: 153-172.

FINAL DRAFT prEN 1993-1-1 (2003). *Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings*.

Feldmann, M. (2017). *Proposal for a general reduction curve for combined out-of-plane FB and LTB by consistent interaction approach*, ECCS TC8 Stability document, 19 May 2017, Drezda, Germany.

Feldmann, M., Wiescholke, M. und Heinemeyer, C. (2017). „Biege- und Biegedrillknicken in konsistentem Ansatz als Basis einer allgemeinen Knickkurve für EC3-1-1, 6.3.4.", *Stahlbau* 86(8):699-706.

Frisch, E.C. (2003). *Hungary: Covering of the UTE Stadium's Grandstand Budapest*, Steel Design Awards 2003, Editor and copyright: Evelyn C. Frisch, SZS Swiss Institute of Steel Construction, Zurich, 2003 (2 oldalas nyomtatott ismertető).

Fukumoto, Y. and Itoh, Y. (1983). „Evaluation of multiple column curves using the experimental data-base approach.", *Journal of Constructional Steel Research* 3:2-19.

Gensichen, V. and Lumpe, G. (2013). „Theorie II. und III. Ordnung – die großen Missverständnisse.", *Stahlbau* 82(10):762-774.

- Greiner, R. (2001). *Background information on the beam-column interaction formulae at Level 1*, ECCS TC 8, Ad-hoc working group on beam-columns, Technical University Graz.
- Greiner, R. and Aswandy, A. (2005). "Design of members under bending and axial compression with intermediate lateral restraints – Numerical simulations and application of EC3.", 4th European Conference on Steel and Composite Structures, Eurosteel 2005, Maastricht.
- Hajdú, G., Papp, F. and Rubert, A. (2017). "Vollständige äquivalente Imperfektionsmethode für biege- und druckbeanspruchte Stahlträger.", *Stahlbau* 86(6):483-496.
- Hajdú, G. and Papp, F. (2018). "Safety assessment of different stability design rules for beam-columns.", *Structures* 14C:376-388, DOI 10.1016/j.istruc.2018.05.002.
- Halász Ottó és Iványi Miklós (2001). *Stabilitáselmélet. Acélszerkezetek méretezésének elvei és módszerei*, Akadémiai Kiadó, Budapest: a:464-478, b:574-576, c:585-587.
- Hunyadi Ferenc (1962). *Vékonyfalú nyílt és zárt szelvényű acélrudak stabilitási kérdései*, Műszaki doktori értekezés, Építőipari és Közlekedési Műszaki Egyetem, Budapest.
- IFC2x4 (2009). *Industrial Foundation Classes (IFC)*, IAI Tech International, buildingSMART International, (<http://www.iai-tech.org>).
- Iványi János, Iványiné Konrád Gizella és Bazsó Gábor (2009). "Volt egyszer egy város... Újpest jelentős épületei.", Kossuth Kiadó (ISBN 978-963-09-6006-9):246.
- Jiang, L., Qi, J., Scanlon, A. and Sun, L. (2013). „Distortional and local buckling of steel-concrete composite box-beam.”, *Steel and Composite Structures* 14(3):243-265.
- Jörg, F. and Kuhlmann, U. (2018). *Experimental investigation of steel members subjected to axial compression, bending and torsion*, ECCS TC8 Stability Document, 18 May 2018, Munich, Germany.
- Kindmann, R. and Kraus, M. (2011). *Steel structures. Design using FEM*, Verlag Ernst & Sohn Berlin:315-328.
- Kitipornchai, S. and Trahair, N.S. (1975). "Elastic behavior of tapered monosymmetric I-beams.", *Journal of the Structural Division* 101(8):1661-78.
- Koczubiej, S. and Cichoń, C. (2014). "Global static and stability analysis of thin-walled structures with open cross-section using FE shell-beam models.", *Thin-Walled Structures* 82:196-211.
- Kolbrunner, F.C. and Basler, K. (1966). *Torsion*, Springer Berlin:96-128.
- Kövesdi, B. and Somodi, B. (2018). "Buckling resistance of HSS box sections Part II: Analytical study.", *Journal of Constructional Steel Research* 140:25–33.
- Kucukler, M., Gardner, L. and Macorini, L. (2015). "Lateral–torsional buckling assessment of steel beams through a stiffness reduction method.", *Journal of Constructional Steel Research* 109:87–100.
- La Poutre, D. (2005). *Inelastic spatial stability of circular wide flange arches*, Technische Universiteit Eindhoven DOI: 10.6100/IR585818:121-130.
- László, G. and Papp, F. (2018). "Buckling assessment of portal frames through overall imperfection method.", The Thirteenth International Conference on Computational Structures Technology 2018, 4-6 September 2018, Sitges, Barcelona, Spain, (accepted extended abstract to oral presentation, ref. num. CSTX2018_0258).
- László, G., Papp, F. and Movahedi, R.M. (2018). "Examination of bimoment transmission through joints of steel frame structures.", *Pollack Periodica* 13 (under review)
- Lip, H. (2004). „The Beam element verification for 3D elastic steel frame analysis.", *Computers & Structures* 82:1167-1179.
- Marques, LRS. (2012). *Tapered steel members: Flexural and lateral-torsional buckling*. Dissertação apresentada para o grau de Doutor na Especialidade de Construção Metálica e Mista, Coimbra:204-209.
- Marques, LRS., Taras, A., Silva, L.S., Greiner, R. and Rebelo, C. (2012). "Development of a consistent buckling design procedure for tapered columns.", *Journal of Constructional Steel Research* 72:61-74.

- Maquoi, R. and Rondal, J. (1978). „Mise en equation des nouvelles courbes Européennes de flambement.”, *Construction Métallique* 1:17-30.
- MSZ 15024/1-85 (1986). *Építmények acélszerkezeteinek erőtan tervezése. Általános előírások*:10.
- MSZ ENV 1993-1-1 NAD (2000). *Eurocode 3: Acélszerkezetek tervezése 1.1 részéhez: Általános szabályok. Általános és az épületekre vonatkozó szabályok*:32-36.
- MSZ EN 1993-1-1 (2005). *Eurocode 3: Acélszerkezetek tervezése, 1-1. rész: Általános és az épületekre vonatkozó szabályok*: a:56-60, b:60-64, c:64-65, d:36
- MSZ EN 1998-1 (2005). *Eurocode 8: Tartószerkezetek földrengésállóságának tervezése, 1. rész: Általános szabályok, szeizmikus hatások és az épületekre vonatkozó szabályok*:59-61.
- MTI (2003). *Európai Acélszerkezeti Díj az UTE stadion lefedéséért*, MTI Direkt – Magyar Távirati Iroda Zrt., Tény és való 2003. szeptember 26. 10:55.
- Ofner, (1997). *Traglasten von Stäben aus Stahl bei Druck und Biegung*, PhD thesis, TU Graz.
- Papp, F. (1996). *Computer aided design of steel beam-column structures*, MTA kandidátusi értekezés.
- Papp, F. (1998). „An automatic procedure for computer aided design of steel beam-column structures.”, *Journal of Constructional Steel Research* 46(1-3) (Paper No. 325. on CD:1-9) .
- Papp, F. (2003a). „Application of ConSteel in design of UTE Stadium.”, Proceedings of the International Conference on Metal Structures – ICMS-03, Miskolc, Hungary, April 3-5, 2003, Metal Structures – Design, Fabrication, Economy, (ed. Jármái,K., Farkas,J.), Millpress 2003:329-336.
- Papp Ferenc (2003b). *Internet alapú e-Design architektúra*, e-Design K+F Közlemények III. kötet. (2003. június 30.), NKFP 2002 2/16 projekt kiadványa, Budapest, 2003-2006.
- Papp, F. (2003c). *Roofing UTE Stadium in Budapest - Project for Reconstruction of Hungarian Stadiums*, International Steel Day, European Steel Design Award 2003, 17 September, 2003. Hotel Schweizerhof, Lucerne, Switzerland, (20 diaképből álló prezentáció, KÉSZ Kft. Szeged).
- Papp Ferenc (2006). *Internet alapú e-Design architektúra*, e-Design K+F Közlemények III. kötet, NKFP 2002 2/16 projekt kiadványa, Budapest, 2003-2006, 5. fejezet: *Az e-Design rendszer megvalósítása*, 2006. január 9.
- Papp, F. (2008). “Global stability analysis using general method.”, www.consteelsoftware.com/en/downloads/white-papers:1-6.
- Papp, F. (2009). *Acélszerkezetek integrált számítógépes méretezése: kutatástól a megvalósításig*. Habilitációs tézisek, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki Kar Habilitációs Bizottsága, Budapest.
- Papp, F. (2016). „Buckling assessment of steel members through overall imperfection method.”, *Engineering Structures* 106:124–136.
- Papp, F. and Iványi, M. (2000). „ConSteel as the prototype of a CAD/CAM oriented program for concurrent design of beam-column structures.”, In Computational steel structures technology, Civil-Comp Press Edinburgh, UK 2000, ISBN:0-948749-72-5:1-12.
- Papp Ferenc és Hegedűs Tamás (2001). “Az UTE Stadion acélszerkezete.”, *MAGÉSZ Hírlevél* (Magyarországi Acélszerkezet Gyártók és Építők Szövetségének szakmai folyóirata), ISSN 1585 668, 2001. III. évfolyam 4. szám, Dunaújváros:24-30.
- Papp, F., Iványi, M. and Jármái, K. (2001). “Unified object-oriented definition of thin-walled steel beam-column cross-sections.”, *Computers & Structures* 79:839-852.
- Papp, F. and Iványi, M. (2002). “Developments in structural design of beam-columns: A review from CAD point of view.”, Stability and Ductility of Steel Structures, SDSS Colloquium 2002, Professor Ottó Halász Memorial Session, Budapest, Akadémiai Kiadó:13-22.

- Papp, F., Rubert, A. and Szalai, JA. (2014a). "DIN EN 1993-1-1-konforme integrierte Stabilitätsanalysen für 2D/3D-Stahlkonstruktionen (Teil 1).", *Stahlbau* 83:1–15.
- Papp, F., Rubert, A. and Szalai, JA. (2014b). "DIN EN 1993-1-1-konforme integrierte Stabilitätsanalysen für 2D/3D-Stahlkonstruktionen (Teil 2).", *Stahlbau* 83:122–141.
- Papp, F., Rubert, A. and Szalai, JA. (2014c). „DIN EN 1993-1-1-konforme integrierte Stabilitätsanalysen für 2D/3D-Stahlkonstruktionen (Teil 3).“, *Stahlbau* 83:325–342.
- Papp, F., Rubert, A. and Szalai, JA. (2015). „Räumliche Stabilitätsanalysen und Globale Stabilitätsnachweise nach DIN EN 1993-1-1.“, *Bauingenieur* 90:469-477.
- Papp Ferenc, Szalai József és Virányi Viktor (2003). *A 4. keresztmetszeti osztályú szelvények héj-végeselemes alapú méretezési elmélete*, e-Design K+F Közlemények I. kötet: Alapkutatási eredmények, 2. Fejezet, NKFP 2002 2/16 projekt kiadványa, Budapest:19-25.
- Papp, F. and Szalai, JA. (2011). "Theory and application of the general method of Eurocode 3 Part 1-1.", EuroSteel 2011, 6th European Conference on Steel and Composite Structures, Edited by Dunai et al. Budapest.
- Papp, F. and Szalai, JA.(2013). "New approaches in Eurocodes 3 – efficient global structural design Part 0: An explanatory introduction.", ConSteel Solutions Ltd., (<http://www.consteel.hu/hu/cikkek/ismeretterjeszto-cikkek>)
- Pilkey, WD. (2002). *Analysis and Design of Elastic Beams: Computational Methods*, Wiley, ISBN:978-0-471-38152-5:153-167.
- Rajasekaran, S. (1994). "Equations for tapered thin-walled beams of generic open sections.", *Journal of Engineering Mechanics* 120:1607-1629.
- Ronagh, HR., Bradford, MA. and Attard, MM. (2000a). „Nonlinear analysis of thin-walled members of variable cross-section. Part I: Theory.“, *Computers & Structures* 77.3:285-299.
- Ronagh, HR., Bradford, MA. and Attard, MM. (2000b). „Nonlinear analysis of thin-walled members of variable cross-section. Part II: Application.“, *Computers & Structures* 77.3:301-313.
- Rondal, J. and Maquoi, R. (1979). "Formulation d'Ayrton-Perry pour le flambement des barres metaliques.", *Construction Metallique* 4:41–53.
- RSTAB (2017), RSTAB – Structural Engineering Software for Analysis and Design, <https://www.dlubal.com/en/products/cross-section-properties-software>.
- Shayan, S. and Rasmussen, KJR. (2014). "A model for warping transmission through joints of steel frames.", *Thin-Walled Structures* 82:1-12.
- Silva, LS., Tankova, T., Marques, L. and Rebelo, C. (2016a). "Safety assessment of Eurocode 3 stability design rules for the flexural buckling of columns.", *Advanced Steel Construction* 12(3):328-358.
- Silva, LS., Tankova, T. and Marques, L. (2016b). "On the Safety of the European Stability Design Rules for Steel Members", *Structures* 8 Part II:157-169.
- Snijder, B., Aa, R., Hofmeyer, H. and Hove, D. (2018). „Lateral torsional buckling design imperfections for use in non-linear FEA.“, *Steel Construction* 11:49-56.
- Stangenberg, H. (2007). *Zum Bauteilnachweis offener, stabilitätsgefährdeter Stahlbauprofile unter Einbeziehung seitlicher Beanspruchungen und Torsion*, PhD Dissertation, RWTH Aachen, Heft 61, Shaker Verlag.
- Strating, J. and Vos, H. (1973). „Computer simulation of the E.C.C.S. Buckling Curves using a Monte Carlo Method.“, *HERON* 19(2):5-38.
- Szalai József (2007). *Melegen hengerelt acélrudak szabványos teherbírásának vizsgálata valószínűségelméleti alapon*, PhD disszertáció, BME Hidak és Szerkezetek Tanszék, Budapest:107-114.
- Szalai, JA. (2011). "The "General Method" of EN 1993-1-1.", *New Steel Constructions* 19(4):30-31.
- Szalai, JA. (2017). "Complete generalization of the Ayrton-Perry formula for beam-column buckling problems.", *Engineering Structures* 153:205-223.

- Szalai, JA. and Papp, F. (2005a). "A new residual stress distribution for hot-rolled I-shaped sections.", *Journal of Constructional Steel Research* 61(6):845-861.
- Szalai, JA. and Papp, F. (2005b). "An automatic strain-based incremental-iterative technique for elasto-plastic beam-columns.", *Rakenteiden Mekaniikka - Journal of Structural Mechanics* 38(1):28-44.
- Szalai, JA. and Papp, F. (2010). "On the theoretical background of the generalization of Ayrton-Perry type resistance formulas.", *Journal of Constructional Steel Research* 66:670-679.
- Szalai, JA. and Papp, F. (2017). *Reforming the „General method”. Overall Stability Design Method OSDM – the Hungarian proposal*, Document of the ECCS TC8 Stability Committee, 19 of May 2017, Coimbra, Portugal.
- Tankova, T., Marques, L., Andrade, A. and Silva, L.S. (2017). "A consistent methodology for the out-of-plane buckling resistance of prismatic steel beam-columns.", *Journal of Constructional Steel Research* 128:839-852.
- Tankova, T., Martins, JP., Silva, L.S., Simoes, R. and Craveiro, HD. (2018). "Experimental buckling behaviour of web tapered I-section steel columns.", *Journal of Constructional Steel Research* 147:293-312.
- Taras, A. and Greiner, R. (2010). "New design curves for lateral-torsional buckling - Proposal based on a consistent derivation.", *Journal of Constructional Steel Research* 66:648-663.
- Taras, A. and Unterwieser, H. (2012). *Proposal for amended rules for member buckling and semi -compact cross-section design*, ECCS Doc. TC8 – 2012-11-018 (2nd version): a:26-29, b:31-34.
- Tong, GS., Yan, XX. and Zhang, L. (2005). "Warping and bimoment transmission through diagonally stiffened beam-to-column joints.", *Journal of Constructional Steel Research* 61:749-763
- Trahair, NS. (1993). *Flexural-torsional buckling of structures*, E & FN SPON London, ISBN 0 419 17110 5:217.
- Vlasov, VZ. (1961). *Thin-walled elastic beams* (2nd ed.), Israel Program for Scientific Translation, Jerusalem, Israel.
- Vörös Gábor (2003). *Többfunkciós héj végelelemes számító motor (H-motor)*, e-Design K+F Közlemények, I. Alapvetési eredmények, 1. fejezet, NKFP 2002/16 Projekt, Budapest: 5-9.
- Wieschollek, M., Schillo, N., Feldmann, M. and Sedlacek, G. (2012). "Lateral-torsional buckling checks of steel frames using second-order analysis.", *Steel Construction* 5(2):71-86.
- Wu, L. and Mohareb, M. (2013). „Finite-Element Formulation for the Lateral Torsional Buckling of Plane Frames.", *Journal of Engineering Mechanics* 139:512-524.
- Wunderlich, W. and Kiener, G. (2004). *Statik der Stabtragwerke*, Teubner, Wiesbaden, ISBN-13: 978-3-519-05061-2:315-328.
- Yang, Y-B. and Yau, J-D. (1987). „Stability of beams with tapered I-sections.", *Journal of Engineering Mechanics* 113:1337-1357.
- Yau, J-D. (2006). "Stability of tapered I-beams under torsional moments.", *Finite Elements in Analysis and Design* 42:914-927.
- Урбан, ИВ. (1955). *Теория Расчёта Стержневых Тонкостенных Конструкций*, Государственное Транспортное Железнодорожное Издательство, Москва.