

GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET

műszaki, vállalkozási, befektetési, értékesítési, kutatás-fejlesztési, piaci információs folyóirata

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Dr. Döbröczeni Ádám

elnök

Vesza József

főszerkesztő

Dr. Jármai Károly

Dr. Péter József

Dr. Szabó Szilárd

főszerkesztő-helyettesek

Dr. Barkóczy István

Bányai Zoltán

Dr. Beke János

Dr. Bercsey Tibor

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Dudás Illés

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Kármán Antal

Dr. Kulcsár Béla

Dr. Kalmár Ferenc

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Pálincás István

Dr. Patkó Gyula

Dr. Péter László

Dr. Penninger Antal

Dr. Rittinger János

Dr. Szabó István

Dr. Szántó Jenő

Dr. Timár Imre

Dr. Tóth László

Dr. Varga Emilné Dr. Szűcs Edit

A szerkesztésben közreműködött:

Dr. Jármai Károly

KEDVES OLVASÓ!

A Gép folyóirat második számában folytatjuk a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt keretében az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával megvalósuló azon kutatásokat ismertetését, melyek a 4-es Kiválósági Központ keretében Innovációs Gépészeti Tervezés és Technológiák címmel folynak a Miskolci Egyetemen. A Kiválósági Központ a kutatás, a fejlesztés, az innováció és az oktatás szolgálatában áll. A központ célja a kutatási potenciál fejlesztése olyan kutatásokkal, amelyek innovatív modellezést, tervezést és technológiai folyamatokat valósítanak meg. Ez összhangban van az Európai Unió azon törekvésével, amely az innováció serkentésére, a leg-hatékonyabb környezetbarát technológiák alkalmazására, fejlesztésére irányul.

A Kiválósági Központ hét tudományos műhelyre tagozódik, melyek egy-egy tanszék köré szerveződnek. Ezek a következők: Mechanikai Technológiai, Gépgyártástechnológiai, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek, Vegyipari Gépek, Mechanikai, Gép- és Terméktervezési, valamint az Anyagmozgatási és Logisztikai Tanszék. Az itt dolgozó oktatók BSc, MSc és doktorandusz hallgatókat is bevonnak a kutatásokba, amelyek így jó lehetőséget biztosítanak arra, hogy a fiatalok megismerkedjenek a tudományos munkával. A háromnegyed éve működő központ programjához kapcsolódva nem egy hallgató nyújtott már kiemelkedő teljesítményt, illetve készített színvonalas TDK dolgozatot.

Felvetődik az, hogy hol jelennek meg az eredmények, az eddigi eredmények alkalmazása hol történhet? A Tudományos Műhelyeken belül működő húsz K+F téma nagyon szerteágazó. Néhány közülük az alapkutatásokhoz közelít, míg mások inkább a gyakorlatban alkalmazhatók, egyesek már most látványos eredményt hoztak, mások távlati eredményekkel kecsegtetnek. Annak érdekében, hogy ezeket az eredményeket a szakmai közönség is megismerhesse, a műhely kutatói jelentős számú publikációt készítettek el és jelentettek meg hazai és külföldi konferenciákon, hazai és külföldi szakmai folyóiratokban. Természetesen az oktatásba is beépítésre kerülnek az eredmények. Ez a cikkgyűjtemény is ezt a célt szolgálja, bemutatva a Kiválósági Központ Tudományos Műhelyeinek leg-újabb tudományos eredményeit.

Prof. Dr. Jármai Károly

egyetemi tanár, a Kiválósági Központ vezetője

A szerkesztésért felelős: Vesza József. A szerkesztőség címe: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.

Telefon/fax: +36-46/379-530, +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Kiadja a Gépipari Tudományos Egyesület, 1027 Budapest, Fő u. 68. Levélcím: 1371 Bp. Pf.: 433.

Telefon: 202-0656, fax: 202-0252, e-mail: a.gaby@gteportal.eu, internet: www.gte.mtesz.hu

A GÉP folyóirat internetcíme: <http://www.gepujsag.hu>

Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Felelős kiadó: Dr. Igaz Jenő ügyvezető igazgató.

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Tel.: (46) 379-530, e-mail: gazdasz@chello.hu.

Előfizetésben terjeszti a Magyar Posta Rt. Hírlap Üzletága 1008 Budapest, Orczy tér 1.

Előfizethető valamennyi postán, kézbesítőkénél, e-mailen: hirlapelofizetes@posta.hu, faxon: 303-3440. További információ: 06 80/444-444

Egy szám ára: 1260 Ft. Dupla szám ára: 2520 Ft.

Külföldön terjeszti a Kultúra Könyv és Hírlap Külkereskedelmi Vállalat,
H-1389 Budapest, Pf. 149. és a Magyar Média, H-1392 Budapest, Pf. 272.

Előfizethető még közvetlenül a szerkesztőségben is.

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

A megjelent cikkek lektoráltak.

A kiadvány a Nemzeti Kulturális Alap támogatásával jelenik meg.

TARTALOM

1. Kamondi L.
Innovatív gépészeti termékfejlesztés..... 3
A műszaki termékek számos olyan alapfunkciókkal rendelkeznek, melyeket tervezési szempontból újra kell gondolni ahhoz, hogy a termék-megfelelőséget a kor pillanatnyi követelményeinek biztosítani tudják. A cikk a fejlesztési módszertannal és a funkció-megoldással foglalkozik, melyek lehetőséget nyújtanak az alkalmazásra és a fejlesztők orientálására.
2. Ecsedi I., Baksa A.
Egy egydimenziós állandósult állapotú hővezetési feladat analitikus megoldása 9
Egy egydimenziós, állandósult állapotú hővezetési feladat analitikus megoldását ismerteti a tanulmány. A vizsgálat tárgyát képező szerkezeti elem egyenes és körív középvonalú rudak láncszerű, elágazás mentes összekapcsolásával van kialakítva. Villamos ellenállás fűtés következtében beálló stationárius hővezetést vizsgálunk. A fajlagos ellenállás hőfok függésével is számol a tanulmány.
3. Daróczy L., Jármai K.
Acélvázak szerkezetek tervezésének automatizálása topológiai optimalással 13
Az új megközelítés alapötlete az, hogy a topológiai optimalás eredményét kizárólag az optimális topológia meghatározásához használjuk fel. A program automatikusan detektálja szerkezetet, és a végeredményt egy méretezési feladathoz használja fel bemenetként. Az alábbi megközelítés kifejezetten a nagyméretű acélvázak szerkezetekre fókuszál. A cikkben javasolt eljárás nem csak gyors és megbízható, de viszonylag egyszerűen implementálható, a 2D-s és 3D-s tesztek során gyorsnak is bizonyult.
4. Dül R., Palotás Á.B., Jármai K., Barkóczy P.
Égési levegőt előmelegítő hőcserélő fejlesztése kandallóhoz 19
A kutatás célja, hogy egy házi használatú, fatüzelésű, hegesztett acél szerkezetű kandalló hatásfokát növelik meg a kandalló kilépő füstcsonkjára helyezhető hőcserélő segítségével. Az általuk kifejlesztett berendezés feladata az, hogy a primer és szekunder égési levegőt is előmelegítve növeljük a kandalló hatásfokát. A fejlesztési folyamathoz áramlástan szimulációt (CFD) használtunk.
5. Farkas J., Jármai K.
Csőszelvényű rácsos tartó térfogat- és költség minimalása elmozdulás-korlát esetén 23
Az optimalási probléma a következő: megtalálni az optimális geometriát és a rudak keresztmetszeti területeit, amelyek minimalják a szerkezet térfogatát vagy költségét egy kéttámaszú rácsos csőszelvényű, nem-párhuzamos övek és szigorú lehajlási feltétel esetén.
6. Jármai K., Farkas J.
Egyirányú nyomással terhelt cellalemez tervezése költségminimumra 29
A cellaszerkezetű lemezek két fedőlemezről és a közéjük hegesztett bordarácsból állnak. Kettévágott I-szelvényeket használnak merevítőül gyártási okokból. A cellák nagyon merevek csavarás szempontjából. Az egyirányú nyomás kihajlási hatását a Huber-egyenlet megoldásából határozhatják meg. Két optimáló algoritmust alkalmaztak, a Részecscsoport módszert és a Válaszfelületek módszerét.
7. Kota L.
Genetikus programozás és tabu keresés összehasonlítása műszaki felügyeleti és karbantartó rendszerek optimalási feladatainál 33
Ebben a cikkben bemutatásra kerül a már előzőleg publikált, a fix végpontú több körjáratos többszörös utazó ügynökös probléma megoldására (mmTSP) kifejlesztett egyfázisú genetikus programozási algoritmus valamint a tabu keresés algoritmusának összehasonlítása. A cikk számos tesztpéldán keresztül mutatja be a genetikus programozási algoritmus előnyét a tabukereséshez képest
8. Kovács Gy.
Kompozit szendvicsszerkezet optimális tervezése 37
Egy új szerkezeti modell szerkezet-optimalási módszere került bemutatásra. A szerkezet laminált karbonszál-erősítéses fedőlemezekből (CFRP) és különböző típusú polisztirol szigetelő rétegekből (EPS) ragasztással lett összeállítva. A tervezés során az ideális rétegszámú CFRP fedőlemezekből, valamint az ideális típusú és vastagságú EPS belső rétegből összeállított optimális szendvicsszerkezet került meghatározásra, mely szerkezet biztosítja a minimális költséget és minimális tömeget.
9. Virág Z., Jármai K.
Bordázott lemezek fáradás vizsgálata különböző bordatípusokra 41
A cikkben az egyirányban nyomott bordázott lemezek vizsgálatát mutatják be különböző merevítők alkalmazásával költségszámítás mellett. A Nemzetközi Hegesztési Intézet ajánlásai alapján vizsgálják a nyomott lemezt. Az optimalásnál a merevítők száma ismeretlen. A trapézbordás merevítők bizonyultak a legjobbnak.
10. Mannheim V.
Komplex modell bevezetése pop tartalmú hulladékok termikus ártalmatlanítási technológiáinak mérlegelésére 45
Vannak „zöld kémia” módszerek és más kezelési módszerek a szerves ipari hulladék mennyiségének csökkentésére, de jelenleg termikus kezelési eljárás a legnépszerűbb alternatíva. Ez a cikk összefoglalja a termikus kezelési eljárásokat, összehasonlítja a különböző technológiákat, hangsúlyozva a befolyásoló tényezőket az alkalmazhatóság és működési megbízhatóság szempontjából.
11. Venczel G., Szepesi G., Siménfalvi Z.
Hőátadási tényezők közvetett meghatározása duplikatúrás készülékek köpenyterében 49
A hőátviteli folyamatok számítása során a hőátadási tényezők kritériális egyenletekből határozhatók meg, amennyiben a szükséges geometriai és műveleti adatok, valamint az anyagtulajdonsági jellemzők rendelkezésre állnak. A cikkben egy olyan számítási eljárást ismertetnek, amely segítségével a mért üzemi adatokból meghatározhatóak a hőátadási tényezők.

INNOVATÍV GÉPÉSZETI TERMÉKFEJLESZTÉS

INNOVATIVE MECHANICAL ENGINEERING, PRODUCT DEVELOPMENT

Dr. Kamondi László *

ABSTRACT

Nowadays it is a great challenge for the product developers to fulfil the harder and harder requirements of the era. Quick and economic solution of the product functions needs large research works and strict quality management. In this paper some most important subjects of development- methodology and function-solution are presented, which can offer the possibility of application and orientation for the developers.

1. A KUTATÁSOK CÉLKITŰZÉSEI

A termékvilág fejlődése a technikai, technológiai fejlesztésekkel, az emberi tudás fejlődésével újabb és újabb kihívásokat jelent a fejlesztők számára, mert a fejlesztett terméket meg kell feleltetni a minőségi-, gazdasági- és környezeti feltételeknek, ugyanakkor a versenyhelyzet miatt, ezt véges határidőn belül kell biztosítani.

A műszaki termékek számos olyan alapfunkciókkal rendelkeznek, melyeket tervezési szempontból újra kell gondolni ahhoz, hogy a termék-megfelelőséget a kor pillanatnyi követelményeinek biztosítani tudják. Az alapfunkciók nagy hányada a termékeknek az energiaátviteli lánc elemeit jelenti, melyek alapvetően a mozgásformák átvitelét, ill. megváltoztatását valósítják meg.

A 4. Kiválósági Központoz tartozó 4. Tudományos Kutató Műhely műszaki termékek néhány alapfunkciójának kutatására és megfelelőségi vizsgálatára helyezi a hangsúlyt. Ennek megfelelően a következő témákat emeljük ki, mint a hajtásrendszerben az energiaátvitel biztosításában a kutatás számára fontosakat:

- Fogazott tengelykapcsolók kinematikai és dinamikai viselkedése.
- Hajtásrendszerek szabadonfutói viselkedése.
- A nagy áttételű hajtáselemek.
- Nem szimmetrikus fogazott elempárok kapcsolódási jellemzői.
- Műanyag fogaskerekek tervezése és alkalmazása.
- Fogazott elempárú hajtások környezeti megfelelősége.

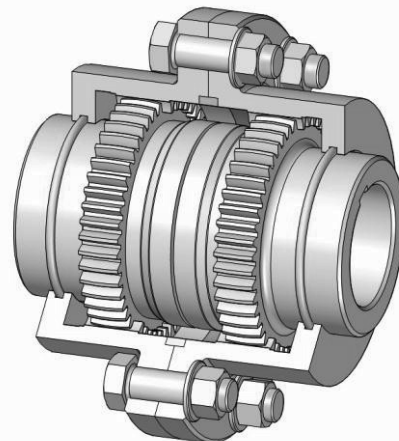
* egyetemi docens, tanszékvezető, Miskolci Egyetem Gép- és Terméktervezési Tanszék

- Fogaskerekek kapcsolódás közbeni dinamikai viselkedése.
- A természeti analógiák alkalmazása a termékfejlesztésben.
- A környezettudatos tervezés kérdései.
- Optimalizálási lehetőségek a termékfejlesztésben.

2. FOGAZOTT TENGYELYPAPCSOLÓK KINEMATIKAI ÉS DINAMIKAI VISELKEDÉSE

A kutatás célja a tengelykapcsoló hibakompenzáló képességének meghatározása (Dr. Sente József egyetemi docens és Kelemen László PhD hallgató kutatása). Ennek érdekében az alábbi kutatások elvégzése szükséges:

- Javaslat a belső fogazatú kerék fogazatának a külső fogazatú kerék hordósított fogazatának gyártására.
- A gyártással összhangban a fogfelületek matematikai modelljének előállítás.
- A fogazatkapcsolódás elemzésével a tengelykapcsoló hibakompenzáló képességének meghatározása.
- Kapcsolat keresése a hordósítási paraméterek és a hibák kompenzálásának mértéke között.
- A tengelykapcsoló teherbírásának számítása és tengelykapcsoló kenésének vizsgálata.



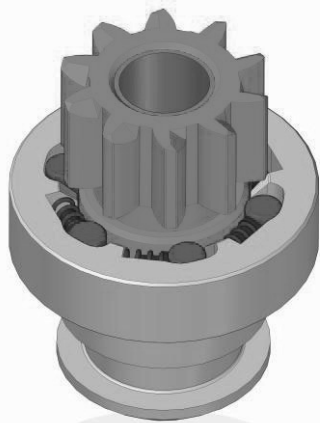
1. ábra. Fogasgyűrűs tengelykapcsoló

Az eddigi kutatások során a tengelykapcsoló (1. ábra) két alapelemének, a belső fogazatú gyűrűnek és a külső

fogazatú domborított fogaskereknek a gyártási lehetőségei, ill. a gyártással összhangban a fogfelületek matematikai modellezése kerültek kidolgozásra [1], [2]. A továbbiakban a tengelykapcsoló kenésével, valamint a fogaskerek kapcsolódás elméletének felhasználásával a hibakompenzáló képesség meghatározására kell irányítani a kutatást.

3. HAJTÁSRENDSZEREK SZABADONFUTÓI VISELKEDÉSÉNEK VIZSGÁLATA

Forgásirány-kapcsolón olyan tengelykapcsolót értenek, amelyik csak az egyik forgásirányban tud nyomatékot továbbítani, az elemek összekapcsolását, ill. szétválasztását automatikusan végzi (Dr. Sente József egyetemi docens, Bihari Zoltán adjunktus kutatása). A tengelykapcsoló kétféle üzemi állapota: a kapcsolás és a szabadonfutás. A kapcsolás állapotában a tengelykapcsoló hajtó és hajtott eleme ugyanakkora fordulatszámmal forog. A szabadonfutásra az jellemző, hogy a hajtó oldal fordulatszáma alacsonyabb a hajtotténál. A két működési állapot közötti átmeneteket zárásnak, ill. nyitásnak nevezik.



2. ábra. Görgős szabadonfutó

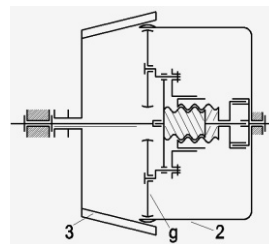
Kidolgozásra került egy olyan módszer, amely segítségével meghatározható a csillagkerék profilgörbéjének az alakja. A módszer lehetővé teszi ismeretlen szabadonfutók rekonstrukcióját [3], [4].

Az elméleti elemzéseket gyakorlati mérések követik. Ezek elvégzéséhez szükség van egy speciális mérőberendezés megtervezésére, amelynek hajtóegysége által generált rezgés csak elhanyagolható mértékben zavarja a vizsgált szabadonfutót. A valós darabokon elvégzendő mérések célja, hogy a szabadonfutók károsodása és a kialakult nyitás irányú súrlódási zaj között van-e valamilyen kapcsolat. A súrlódó nyomaték méréssel történő meghatározása lehetőséget teremthet az egyes elemek közötti súrlódási tényező pontosítására.

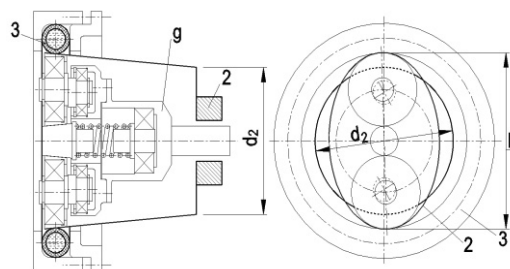
A kutatás áttekintette a görgős szabadonfutók működését, geometriáját, vizsgálta a terhelhetőséget, továbbá meghatározta az állandó záró-szöget biztosító geometria feltételét.

4. A NAGY ÁTTÉTELŰ HAJTÁSELEMEK KUTATÁSA

A kutatás célja a dörzs bolygó- és hullámhajtások geometriai, kinematikai és dinamikai viszonyainak tisztázása, konstrukciós megoldások figyelembe vételével (Németh Géza adjunktus, Prof. Döbröczöni Ádám, Dr. Péter József egyetemi docens kutatása). Fogaskerék-hullámhajtómű esetén a feladat a hullámkerék rugalmas alakváltozásának vizsgálata



3. ábra. Dörzs-hullámhajtómű terheléssel arányos előfeszítéssel



4. ábra. Dörzs-hullámhajtómű szabályozható átmérőjű belső gyűrűvel

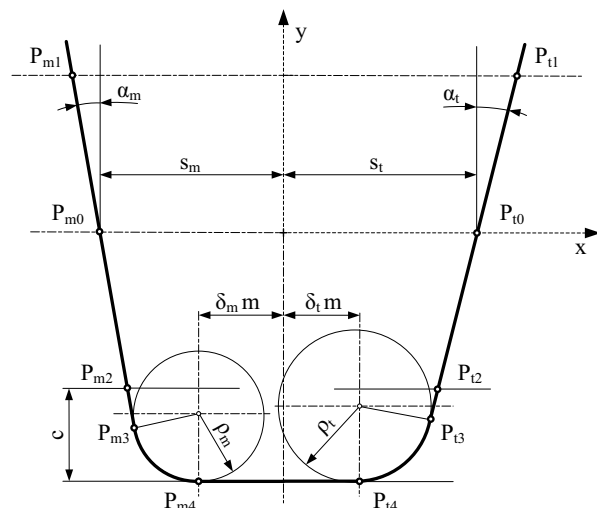
A kutatás során vizsgálat tárgyát képezték a nagyáttételű dörzshajtások bizonyos rendszerező szempontok alapján, mint a geometria, a kinematika, a dinamika és az anyag, továbbá azok a feladatok, melyeket az alakzáró hajtásokhoz képest meg kell oldani, pl. az előfeszítő erő biztosítása, és terheléssel arányos megoldások fejlesztése (3. és 4. ábra). Saját megoldás került ajánlásra a kitűzött feladatra [5]. A nagyáttételű hajtások jelentős hányada folytonosan változtatható áttételű. A kutatások a mechanikus elven működőket, de nem a szalaghajtásokhoz sorolható súrlódó hajtásokat, az áttétel tartomány kiterjesztésének lehetőségét vizsgálták. Konstrukciós megoldást ajánlottunk a hajtott elem forgásirányának megváltoztatására. Meghatározásra került egy adott kialakítású és méretű hajtás terhelhetősége [6].

5. NEM SZIMMETRIKUS FOGAZOTT ELEM-PÁROK KAPCSOLÓDÁSI JELLEMZŐINEK VIZSGÁLATA

Azoknál a hajtásoknál, ahol a fogaskerek fogoldalainak terhelése különböző mértékű, aszimmetrikus fogú fogaskerek [7] alkalmazásával növelhető a terhelhető-

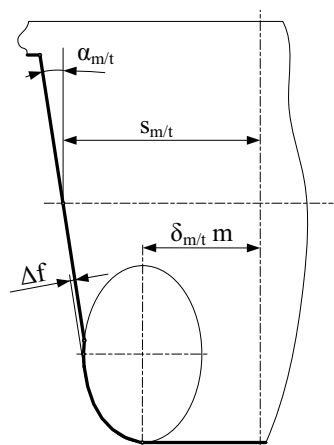
ség (Drágár Zsuzsa tanársegéd, Dr. Kamondi László egyetemi docens kutatása).

A fogazatot egyértelműen leíró alapprofil szabványtól való eltéréseivel (5. ábra) aszimmetrikus fogazat generálható. A szerszám-alapprofil egyes paraméterei (pl. α – profilszög, stb.) egy érvényességi tartományon belül szabadon megválaszthatók. [7]



5. ábra. Általános felépítésű szerszám-alapprofil

A szerszám-alapprofil felépítésénél a paraméterek meghatározása a kapcsolódási jellemzők változtatási lehetőségeit, a szerszámmal generált fogon a fogtő-feszültség maximális értékének csökkentését, a fogtő-görbe mentén a feszültség-gradiens értékének állandó szinten tartását szolgálja. [7]



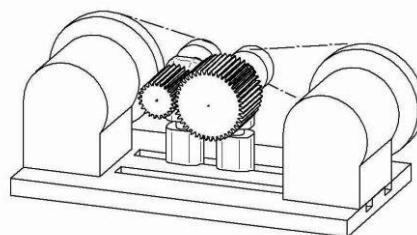
6. ábra. Protuberanciát figyelembe vevő szerszám-alapprofil, ellipszis ívvel

A szakirodalomban fellelhető aszimmetrikus szerszám-alapprofilok változataiból [8] kiindulva ki kell térni a protuberancia kérdésére. Ennek figyelembevételével a befejező, simító megmunkálást követően a fogprofil és a fogtő-görbe folytonos átmenete valósítható meg, elkerülve így feszültséggyűjtő helyek kialakulását [7].

További feladat a szerszám-alapprofil pontjainak pontos meghatározása, matematikai leírása az alapprofil koordináta-rendszerében. Ez magába foglalja az alapprofil felépítő görbelemek függvényének leírását, valamint a görbelemek határpontjainak meghatározását. Az alapprofillal származtatott fogaskerék fogprofil pontjait is meg kell határozni a fogaskerék koordináta-rendszerében. Továbbá egy számítógépi program összeállításával az alapprofil paraméterein történő változtatások hatásának vizsgálatát lehet elvégezni.

5. MŰANYAG FOGASKEREK TERVEZÉSE ÉS ALKALMAZÁSA

A műanyag fogaskerekek használatának számos előnye van (Bihari János tanársegéd, Dr. Kamondi László egyetemi docens kutatása). Jellemzően könnyebbek, mint a fémek, olcsón gyárthatók nagy sorozatban és könnyen létrehozhatók speciális fogazatok, amiknél nem kell tekintetbe venni az acél fogaskerekekénél a tervezést korlátozó gyártási határokat, mint pl. az alámetzés, vagy a fogkihegyesedés. Fontos tulajdonságuk a rezgések csökkentése, műanyag fogaskerék- fém fogaskerék kombináció használatával jelentősen csökkenthető egy berendezés zajszintje. A műanyag fogaskerekek használatával a korábbi módszereknél egyszerűbben létrehozható hézagmentes kapcsolódás, ami a precíziós eszközök gyártásának lényeges feltétele.



7. ábra. A mérőberendezés vázlatja

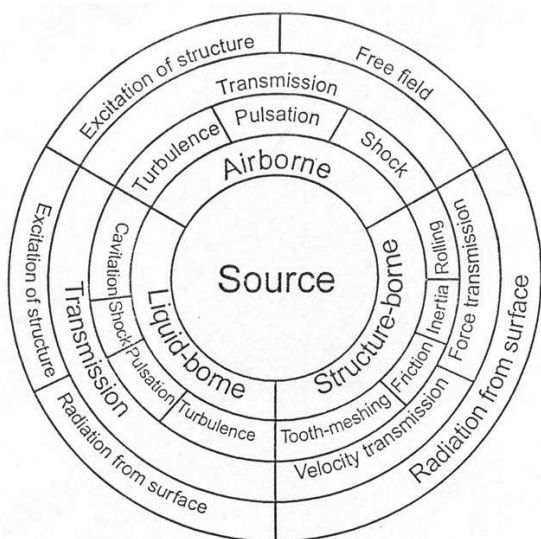
Kisméretű műanyag fogaskerekek tervezésekor és az ilyeneket tartalmazó hajtóművek tervezésekor is problémát jelent, hogy nehezen hozzáférhetőek olyan alaposan kidolgozott és jól használható irányelvek és szabványok, mint az acél fogaskerekekhez. A tervező gyakran rá van szorulva, hogy kísérleteket végezzen, vagy mások kísérleteinek eredményeit használja. Hosszú távú célunk egy kísérletsorozat elvégzése (7. ábra), amelynek eredményei segíthetik a kisméretű műanyag fogaskerekek tervezését, ehhez azonban létre kell hozni egy számos üzemállapot szimulálására képes tesztberendezést, valamint a hozzá kapcsolódó érzékelő, jelrögzítő és kiértékelő rendszert [9], [10].

6. FOGAZOTT ELEMPÁRÚ HAJTÁSOK KÖRNYEZETI MEGFELELŐSÉGE

A fogazott elempárú hajtások környezeti megfelelőségének kutatása nagy hangsúlyt fektet a fogaskerekes

hajtóművekben kialakuló rezgések területére. A rezgés-keltő elemek szerint részletesen elemezve a kialakuló rezgések folyamatát ábra szemlélteti (5. ábra).

Fontos feladat a kialakult rezgések csökkentésére alkalmazható eljárások felkutatása, hatásmechanizmusuk megértése, a rezgések mérésére kialakult módszerek és eljárások tanulmányozása működési elvük megértése [11], [12], [13]. A jelen állapot szerinti végső elérendő cél egy olyan számítási folyamat létrehozása, mely már tervezési fázisban figyelembe veszi a környezeti terhelést okozó szempontokat, különös tekintettel a zaj és rezgés értékekre.



8. ábra Gépek zajgerjesztésének alapmodellje [13]

7. A TERMÉSZETI ANALÓGIÁK ALKALMAZÁSA A TERMÉKFEJLESZTÉSBEN

A tervezésemélet számos módszere közül az analógia alapú tervezést tudatosan vagy tudat alatt, de igen gyakran alkalmazzák. Egy műszaki feladatra azonban nemcsak más műszaki területekről vagy peremterületekről gyűjthetőek megoldások, de egyik hatékony bár viszonylag ritkán alkalmazott forrása a természet is lehet (9. ábra) (Dömötör Csaba adjunktus, Dr. Péter József egyetemi docens kutatása).

Egy ilyen természeti hatáselvből és hatáshordozókból felépített tudásbázis akkor válik a mérnökök számára a gyakorlatban használhatóvá, ha könnyen kezelhető, jól csoportosított, de igény esetén más szempontok szerint újracsoportosítható, alapvető összefüggéseiben meghatározott rendszert alkot, mely a matematika illetve logika nyelvezetével leírható és így bármely új problémára könnyen alkalmazható. A kutatás egyik célja éppen e kritériumrendszernek megfelelő elméleti háttér kidolgozása.

A tervező munkája során tudományterületek eredményeit használja; a tervezőmunka integráló kultúra. A

megoldás keresésének egyik terepe az élővilág. A tervezőmunka egyik kulcseleme a felidézés, amely ember és állat számára egyaránt érvényes kategória. Minden körülöttünk lévő tárgy jelentést hordoz, felidéz valamit. A felidézés az állat számára konkrét, az ember számára kulturális háttérrel függően áttélt is tartalmaz. Az ember alkotta tárgyak az emberi beszédhez hasonlóan elmondanak, tudatnak valamit. A verbális vagy vizuális közlés kulcseleme a tagolás, ami a figyelem felkeltésének vagy elkerülésének egyik eleme. Az arányt és az arányos megoldást az ember könnyen felismeri. Az arányos megoldás az élőlények esetén a túlélés, ember alkotta tárgyak esetén a versenyképesség feltétele.



9. ábra. A természeti adaptáció két iránya



10. ábra. Analógiák

A szimmetria a rend, a nyugalom, a megbízhatóság kifejezője, az aszimmetrikus kialakítás a mozgást, a válto-

zást idézi fel [11]. A ritmikus megjelenés az élőlény és az ember alkotta termék üzenethordozója; rendben mennek a dolgok.

Az élőlénynek és a terméknek egyaránt van iránya, kifejezve az emelkedést vagy az elmúlást. A kontraszt érzékeléséhez legalább két dolog szükséges, segítségével az élőlény vagy a termék valamilyen tulajdonságra hívja fel a figyelmet (10. ábra).

A cikk e része és a hozzá kapcsolódó kutatómunka lényege az élővilág konstrukciós elveinek, mozgató erőinek feltárása, bemutatása, és példákkal történő illusztrálása [13].

8. Tervezési algoritmusok fejlesztése, a környezettudatos tervezés irányelveinek kutatása

A kutatási téma kidolgozása két utat követ a tervezési algoritmusok-, valamint a környezettudatos tervezés irányelveinek kutatása (Dr. Takács Ágnes adjunktus és Dr. Kamondi László egyetemi docens kutatása). A két téma egymástól nem esik távol, hiszen a környezettudatos tervezés szerves részét képezi a tervezési folyamatnak, így módon tulajdonképpen a téma a tervezésmódszertannal foglalkozik, azon belül is a tervezési folyamat algoritmusával, algoritmusaival, illetve azzal, hogy a környezettudatosság a tervezési folyamatban hol, és miképpen jelenik meg. A Dfx technikák közül a DfE, vagyis a Design for Environment napjainkban egyre nagyobb figyelmet kap. A kutatás fő célja, hogy a DfE elveit tanulmányozzuk és megvizsgáljuk a már megfogalmazott elvek, irányelvek továbbfejleszhetőségét [16].

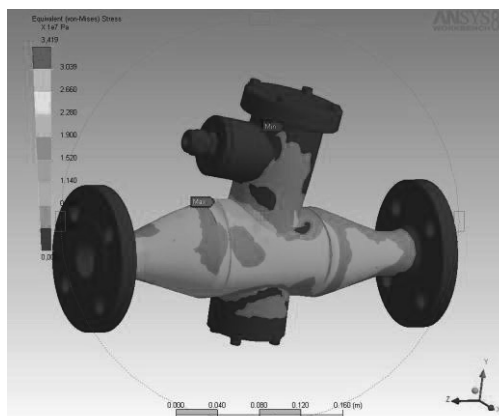
A Környezettudatos tervezés című tantárgy a BSc szintű Ipari termék- és formatervező szakos hallgatók számára a 6. félévben szabadon választható tantárgy. Tekintve, hogy az Ipari termék- és formatervező szak még annyira új a Miskolci Egyetem életében, hogy ebben a vizsgaidőszakban végez az első évfolyam, így maga a tantárgy is egy egészen új tananyagot fed le [17], [18]. Ennek megfelelően egy elektronikus jegyzetet írunk hozzá. Ennek néhány fejezete már összeállt, a többi pedig vázlatos formában áll rendelkezésre. Habár az elkészült fejezetek még nyers verziók, a hallgatók a következő félévben minden bizonnyal haszonnal fogják forgatni a jegyzetnek ezt a korai verzióját is. A tantárgyat már egy évfolyam hallgatta, a tapasztalat szerint eredményesen. Ezek közül a hallgatók közül ketten kicsit mélyebben is foglalkoztak a témával szakdolgozatukban. Velük foglalkoztunk az elmúlt időszakban. Ők a cikk írása közben nagy sikerrel védték meg szakdolgozatukat.

10. OPTIMALIZÁLÁSI LEHETŐSÉGEK A TERMÉKFEJLESZTÉSBEN

A számítástechnika fejlődése lehetővé tette a végeselemes módszer, a szerkezetanalízis és az

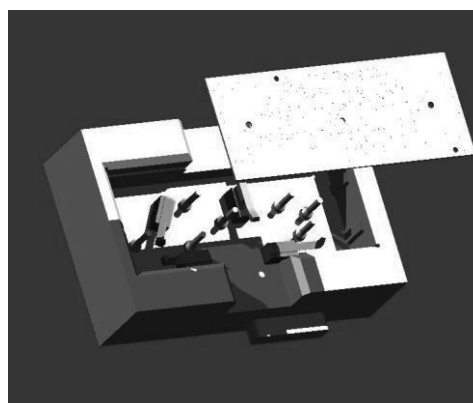
optimumszámítás tudományterületeinek nagyarányú elterjedését, széleskörű jelentős fejlődését. Ennek eredményeként kialakult a Multidiszciplináris Optimalás (MDO) tudománya.

Az optimalás alkalmazása a szerkezettervezésben jelentős előnyöket hozhat: növelhető a szerkezet teherbírási, csökkenthetők a különböző veszteségek, javítható a megbízhatóság, csökkenthető a gyártási és anyagköltség, hatékonyabbá tehető a gyártási folyamat (pl. a selejthányad csökkentésével).



11. ábra. Gyújtókamra vizsgálata és minősítése, TÜKI Miskolc felkérésére.

A szerkezettervezésben elérhető előnyök érvényesíthetők a terméktervezés során is, ezért szükségessé válik a végeselemes és numerikus módszerek, optimumkeresés és a Multidiszciplináris Optimalás beillesztése a terméktervezés és termékminősítés folyamatába. A termék-szimuláció során még a tervezés során, a termék megtestesülése, legyártása előtt, anélkül, hogy akár prototípust hoznánk létre, lehetségessé válik a termék lényegesebb tulajdonságainak vizsgálata, minősítése, javítása és akár optimalása is, jelentősen csökkentve ezzel a járulékos költségeket.



12. ábra. Elektronikus panelek gyártási selejthányadának csökkentése optimalással TÜKI, Miskolc felkérésére

A kutatás célja tehát az ilyen vizsgálati és optimálási módszerek rendszerezése, terméktervezés és termékminősítés folyamatába való beillesztése, alkalmazása.

Ennek során főleg az RVA (Random Virus Algorithm) továbbfejlesztése, tesztelése, kalibrálása a fő tevékenység, mely több numerikus kísérlet, benchmark-feladat megoldását jelenti. Emellett fontos, hogy ez a tevékenység olyan fejlesztésekhez társuljon, melyek konkrét alkalmazásokkal, megvalósulási lehetőséggel bírnak (11. ábra), vagy külső felkérés alapján azonnali hasznosíthatóságot jelentenek (12. ábra). A kutatás során képződő eredményeket nemzetközi és hazai tudományos fórumokon rendszeresen publikáljuk [19], [20].

A kutatás során képződő eredményeket nemzetközi és hazai tudományos fórumokon rendszeresen publikáljuk [19], [20].

10. ÖSSZEGZÉS

A sikeres és eredményes termékfejlesztés feltétele, hogy a termékben megjelenő funkciók a kor követelményeit, elvárásait kielégítve, gazdaságosan valósuljanak meg. A cikk a termékfunkciók néhány elemére és ezen belül azon kutatási irányokra kívánta a figyelmet felhívni, melyek tömeszerűségük, előfordulási gyakoriságuk és a fejlesztés számára fontosak lehetnek vagy lesznek.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

11. IRODALOM

- [1] SZENTE J., KELEMEN L.: Belső fogazatú fogaskerekek tervezése fogasgyűrűs tengelykapcsolóhoz, *Gép*, 2011. (LXII. évfolyam) 9-10. szám. p. 42-46.
- [2] SZENTE J., KELEMEN L.: Domborított fogazat matematikai modellezése fogasgyűrűs tengelykapcsolóhoz. *Gép*. 2011. (LXII. évfolyam) 9-10. szám. p. 47-50.
- [3] BIHARI Z., SZENTE J.: Geometrical Reconstruction of Machine Elements with Special Profile, *International Journal Advanced Engineering*, 5(2011) No.2,
- [4] BIHARI Z., SZENTE J.: Külső csillagkeresű görögös szabadonfutók egytengelyűségének vizsgálata, *Gép c. folyóirat LXII. évfolyam*, 2011/7-8 szám, I. kötet, 17-20. oldal.
- [5] NÉMETH G., DÖBRÖCZÖNI Á.: Dörzsolyóhajtások áttekintése. *GÉP. LXII. Évfolyam*. 2011/11. III. kötet. p. 18/21.
- [6] NÉMETH G., PÉTER J.: Continuously variable epicyclic traction drive. *Advanced Engineering 5th year*. No. 1. 2011. p. 47/56.

- [7] DRÁGÁR Zs., KAMONDI L.: Nem szabványos alapprofilú fogaskerekek tervezésének kérdései, *Géptervezők és Termékfejlesztők XXVII. Szemináriuma*, Miskolc, 2011, *GÉP, LXVII. évf.*, 2011/7-8., pp. 35-38.
- [8] A. KAPELEVICH: Geometry and design of involute spur gears with asymmetric teeth, *Mechanism and Machine Theory* 35 (2000) pp. 117-130.
- [9] BIHARI J., KAMONDI L.: Design grounds of a machine for testing small plastic gears, *Advanced Engineering* 5 (2011), ISSN 1846-5900
- [10] STARKE, L. & MEYER, B.R., *Toleranzen, Passungen und Oberflächengüte in der Kunststofftechnik*, ISBN 3 446 22722 9, Hanser Verlag, Wien, 2004.
- [11] Sarka, F. – Döbröczöni, Á.: Directives of Designing Machines With Low Noise Emission. *Advanced Engineering* 5(2011) No.2 ISSN 1846-5900, pp. 213-222.
- [12] Sarka, F. – Döbröczöni, Á.: Alacsony zajkibocsátású gépek tervezésének irányelvei. *Gép* 2011/9-10 II. kötet, pp. 20-23
- [13] MSZ EN ISO 11688-1
- [14] DÖMÖTÖR CS.: Hangszerek a természetben *GÉP. LXII. Évfolyam*. 2011/9-10. II. kötet. pp. 63-66.
- [15] .DÖMÖTÖR CS.: Csak természetesen!, *Műszaki Szemle*, 2008. májusi különszám, Brassó, pp. 120-124.
- [16] TAKÁCS, Á. – KAMONDI, L.: On design theories – Conceptual design, *Advanced Engineering*, 5. évf. 1. szám, ISSN 1846-5900, pp. 109-118, 2011.
- [17] KAMONDI, L.- SARKA, F.- TAKÁCS, Á.: Fejlesztés-módszertani ismeretek. *Elektronikus jegyzet*. Készült: „Korszerű anyag-, nano- és gépészeti technológiákhoz kapcsolódó műszaki képzési területeken kompetencia alapú, komplex digitális tananyag modulok létrehozása és on-line hozzáférésük megvalósítása” TÁMOP-4.1.2-08/1/a-2009-0001, <http://web.alt.uni-miskolc.hu/tananyag/index.html>, Miskolc, 2011.
- [18] OTTO, K.; WOOD, K.: *Product Design–Techniques in Reverse Engineering and New Product Development*, ISBN 0 13 021271 7, Prentice Hall, 2001.
- [19] SZABÓ F. J.: Finite Element Investigation of Tyre Loads of Cars Caused by Potholes, *Advanced Engineering*, 5 (2011) 1, ISSN 1846- 5900, pp. 97-108.
- [20] SZABÓ F. J.: Analógia a sport- világsúcsok története és az evolúciós típusú algoritmusok iteráció története között, *Gép*, LXII évf. 9-10. sz., 2011, II. kötet, pp. 28- 31.

EGY EGYDIMENZIÓS ÁLLANDÓSULT ÁLLAPOTÚ HŐVEZETÉSI FELADAT ANALITIKUS MEGOLDÁSA

ANALITICAL SOLUTION OF A ONE-DIMENSIONAL STEADY STATE HEAT CONDUCTION PROBLEM

Ecsedi István^{1*} és Baksa Attila^{2*}

ABSTRACT.

A one-dimensional steady state heat conduction problem is formulated and its analytical solution is presented. The considered one-dimensional structural component consists of straight and circular arc bar segments. The heat is generated within the solid as a result of an applied constant voltage difference. The generated heat by the constant voltage heat source is assumed to be dissipated by convection into a medium at a constant temperature.

1. BEVEZETÉS, HŐVEZETÉS

VILLAMOSAN HEVÍTETT RUDAKBAN

1.1. Egyenes középvonalú rúdelem

Az 1. ábra szemlélteti az egydimenziós állandó keresztmetszetű és homogén anyagú szerkezeti komponens.

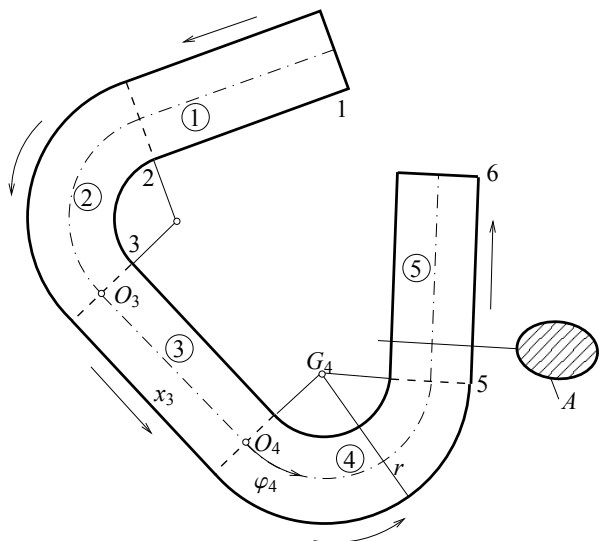
A keresztmetszetek súlypontjait összekötő egyenes és köríves szakaszból felépülő görbe a vizsgált elem középvonala, amelyet az 1. ábrán pont-vonal jelöl. Minden egyes egyenes és körív középvonalú rúdelemhez egy lokális koordináta-rendszert rendelünk. Az 1. ábrán csak az O_3x_3 és a $G_4r_4\varphi_4$ lokális koordináta-rendszerek vannak feltüntetve.

A 2. ábra egy tetszőleges O_iO_{i+1} pontokhoz tartozó egyenes középvonalú, állandó A keresztmetszetű, homogén L_i hosszúságú rúdelemet szemléltet. A rúdelem szélső keresztmetszeteinél az elektromos potenciált U_i és U_{i+1} jelöli. Jelölje I az áramerősséget, nyilvánvaló (Ohm-törvény), hogy

$$U_i - U_{i+1} = \rho \frac{L_i}{A} I, \quad (1)$$

ahol ρ a fajlagos ellenállást jelöli. A rúdelem egységnyi hosszára eső Joule hő

$$q_i = \frac{(U_i - U_{i+1})^2}{\rho L_i^2} A. \quad (2)$$



1. ábra. Egyenes és körív középvonalú rúd alakú testekből felépített szerkezeti komponens.

Az x_i és $x_i + dx_i$ koordinátákkal kijelölt keresztmetszettel határolt elemi rúdszakasz termikus egyensúlyából az alábbi differenciál egyenletet nyerjük a $T_i = T_i(x_i)$ hőmérsékletre [1, 3, 4]

$$\lambda A \frac{d^2 T_i}{dx_i^2} - \alpha K (T_i - T_0) + \frac{(U_i - U_{i+1})^2}{\rho L_i^2} A = 0, \quad 0 < x_i < L_i. \quad (3)$$

Itt T_0 a külső környezet ismert hőmérsékletét, α felületi hőátadási tényezőt, K pedig az A rúdkeresztmetszeti tartomány határgörbéjének hossza. A fajlagos ellenállás hőmérséklet függését a

$$\rho = \rho_0 (1 + \beta (T - T_0)) \quad (4)$$

képlet alkalmazásával közelítjük, ahol β a fajlagos ellenállás hőfok tényezője. A

$$\vartheta_i(x_i) = T_i(x_i) - T_0 \quad (5)$$

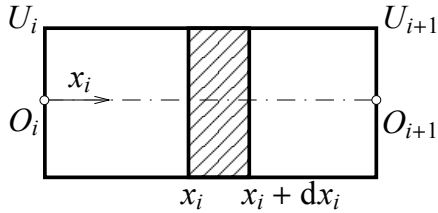
* Miskolci Egyetem, Mechanikai Tanszék, ¹egyetemi tanár, ²egyetemi docens

változó bevezetésével és a

$$\frac{1}{1 + \beta(T - T_0)} \approx 1 - \beta(T - T_0) \quad (6)$$

linearizáció alkalmazásával azt kapjuk, hogy

$$\lambda A \frac{d^2 \vartheta_i}{dx_i^2} - \left[\alpha K + \beta \frac{(U_i - U_{i+1})^2}{\rho_0 L_i^2} A \right] \vartheta_i + \frac{(U_i - U_{i+1})^2}{\rho_0 L_i^2} A = 0, \quad 0 \leq x_i \leq L_i. \quad (7)$$

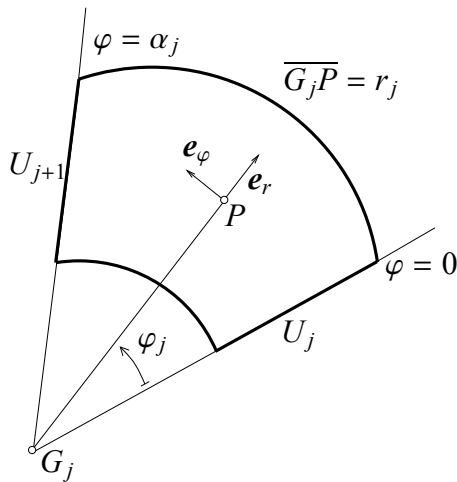


2. ábra. Egyenes rúdelem.

1.2. Körív középvezetű rúdelem

A 3. ábra szemlélteti a j jelű görbe rúdelemet és az elemhez kapcsolt $G_j r_j \varphi_j$ polárkoordináta-rendszert. A szélső keresztmetszetek villamos potenciálját U_j és U_{j+1} jelöli. Első lépésben a görbült elem villamos ellenállását határozzuk meg. Alapvető feltevés, hogy a villamos térerősség vektor \mathbf{E} és az áramsűrűség vektor \mathbf{J} egyaránt \mathbf{e}_φ irányú. E feltevessel összhangban $U = U(\varphi_j)$. Tekintettel arra, hogy U harmonikus függvény $U = U(\varphi_j)$ az alábbi alakban adható meg:

$$U(\varphi) = U_j + \frac{U_{j+1} - U_j}{\alpha_j} \varphi_j, \quad 0 \leq \varphi_j \leq \alpha_j. \quad (8)$$



3. ábra. Körív középvezetű rúdelem.

A villamos térerősség és áramsűrűség nem azonosan zérus komponenseire azt kapjuk, hogy

$$E_\varphi = -\frac{1}{r_j} \frac{dU}{d\varphi} = \frac{U_j - U_{j+1}}{r_j \alpha_j},$$

$$I_\varphi = \frac{E_\varphi}{\rho} = \frac{U_j - U_{j+1}}{\rho r_j \alpha_j}. \quad (9)$$

Az

$$I = \int_A I_\varphi dA \quad (10)$$

képlet és a (9) egyenletek alkalmazásával jutunk az

$$U_j - U_{j+1} = I \rho \frac{L_j}{A}, \quad L_j = c_j \alpha_j, \quad (11)$$

eredményre, ahol c_j

$$\frac{A}{c_j} = \int_A \frac{dA}{r_j} \quad (12)$$

egyenlet alapján határozható meg. A Joule hő számítására, amely a φ_j és $\varphi_j + d\varphi_j$ koordinátákkal kijelölt elemi rúdszakaszon keletkezik a villamos hevítés következtében a

$$\tilde{q}_j d\varphi = \left(\int_A \frac{E_\varphi^2}{\rho} r dA \right) d\varphi = \frac{(U_j - U_{j+1})^2}{\rho c_j \alpha_j^2} A d\varphi_j \quad (13)$$

összefüggést nyerjük.

A φ_j és $\varphi_j + d\varphi_j$ szögkoordinátákkal kijelölt elemi rúdszakasz termikus egyensúlyának a vizsgálatából az alábbi differenciálegyenletet tudjuk levezetni a

$$\vartheta_j(x_j) = T_j(x_j) - T_0, \quad x_j = c_j \varphi_j \quad (14)$$

hőmérséklet különbségre [1, 3, 4]

$$\frac{d^2 \vartheta_j}{dx_j^2} - \left(\frac{\alpha f_j K}{\lambda A c_j} + \frac{\beta}{\rho_0 L_j^2 \lambda} (U_j - U_{j+1})^2 \right) \vartheta_j + \frac{(U_j - U_{j+1})^2}{\rho_0 L_j^2 \lambda} = 0, \quad 0 < x_j < c_j \alpha_j = L_j, \quad (15)$$

ahol f_j a keresztmetszeti határgörbe súlypontjának radiális koordinátáját jelöli.

2. POTENCIÁL KÜLÖNBSÉGEK SZÁMÍTÁSA

Az Ohm-törvény alkalmazásával az ①, ②, ③, ..., ② rúdszakaszokra (1. ábra) írható, hogy

$$U_1 - U_2 = \rho \frac{L_1}{A} I, \quad U_2 - U_3 = \rho \frac{L_2}{A} I, \quad \dots$$

$$U_{n-1} - U_n = \rho \frac{L_{n-1}}{A} I. \quad (16)$$

A fenti egyenletekből az következik, hogy

$$\rho \frac{I}{A} = \frac{U}{L}, \quad U = U_1 - U_n, \quad L = \sum_{i=1}^n L_i. \quad (17)$$

A (16) és (17) egyenletek kombinálásával jutunk a (18) egyenletre

$$U_1 - U_2 = U \frac{L_1}{L}, \quad U_2 - U_3 = U \frac{L_2}{L}, \quad \dots \\ U_{n-1} - U_n = U \frac{L_{n-1}}{L} \quad (18)$$

3. HŐVEZETÉSI EGYENLETEK MEGOLDÁSAI

Az eddigi eredmények alapján az egyenes rúdszakaszokra vonatkozó differenciálegyenletet a következő alakba írhatjuk:

$$\frac{d^2 \vartheta_i}{dx_i^2} - \omega_i^2 \vartheta_i + q_i = 0, \quad x_i \leq x \leq L_i, \quad (19)$$

ahol

$$\omega_i^2 = \frac{\alpha K}{\lambda A} + \beta \frac{U^2}{\rho_0 \lambda L^2}, \quad q_i = \frac{U^2}{\rho_0 \lambda L^2}. \quad (20)$$

A fenti differenciálegyenlet megoldása a $\vartheta_i(0) = t_i$ és $\frac{d\vartheta_i}{dx_i}(0) = \tau_i$ kezdeti értékekkel megadva az alábbi alakba írható:

$$\vartheta_i(x_i) = t_i \operatorname{ch} \omega_i x_i + \frac{\tau_i}{\omega_i} \operatorname{sh} \omega_i x_i + \frac{q_i}{\omega_i^2} (1 - \operatorname{ch} \omega_i x_i), \\ 0 \leq x_i \leq L_i. \quad (21)$$

Egyszerű számítással kapjuk, hogy

$$\frac{d\vartheta_i}{dx_i} = \omega_i t_i \operatorname{sh} \omega_i x_i + \tau_i \operatorname{ch} \omega_i x_i - \frac{q_i}{\omega_i} \operatorname{sh} \omega_i x_i, \\ 0 \leq x_i \leq L_i. \quad (22)$$

A görbe rúdszakaszra vonatkozó differenciálegyenlet a (18) egyenlet alkalmazásával az alábbi alakba írható:

$$\frac{d^2 \vartheta_j}{dx_j^2} - \omega_j^2 \vartheta_j + q_j = 0 \quad 0 < x_j < L_j. \quad (23)$$

Itt bevezettük a következő jelöléseket:

$$\omega_j^2 = \frac{\alpha f_j K}{\lambda A c_j} + \beta \frac{U^2}{\rho_0 \lambda L^2}, \quad (24)$$

$$q_j = \frac{U^2}{\rho_0 \lambda L^2}. \quad (25)$$

A (21) és (22) egyenletek mintájára írható, hogy

$$\vartheta_j(x) = t_j \operatorname{ch} \omega_j x_j + \frac{\tau_j}{\omega_j} \operatorname{sh} \omega_j x_j + \\ + \frac{q_j}{\omega_j^2} (1 - \operatorname{ch} \omega_j x_j), \quad (26)$$

$$\frac{d\vartheta_j}{dx_j} = \omega_j t_j \operatorname{sh} \omega_j x_j + \tau_j \operatorname{ch} \omega_j x_j - \\ - \frac{q_j}{\omega_j} \operatorname{sh} \omega_j x_j, \quad (27)$$

ahol

$$t_j = \vartheta_j(0), \quad \tau_j = \left(\frac{d\vartheta_j}{dx_j} \right)_{x_j=0}. \quad (28)$$

A megoldásokban szereplő kezdeti értékeket (t_i, τ_i, t_j, τ_j) a szélső keresztmetszetekre vonatkozó peremfeltételek előírások, továbbá az egyenes és görbe rúdszakasz közös keresztmetszeteire vonatkozó illesztési feltételek kielégítése révén felírható lineáris egyenletrendszer megoldásából nyerjük. Az illesztési feltételek a hőmérsékletmező és a hőáram folytonosságát fogalmazzák meg. A követendő eljárás egy példa keretében ismerteti a tanulmány.

4. PÉLDA

A 4. ábra egy háromkomponensű 1-2, 2-3, 3-4 tömör körkeresztmetszetű elemet szemléltet. A 4. ábra alapján írható, hogy [1]

$$L_1 = L_3 = 150 \text{ mm}, \quad L_2 = 125,6637 \text{ mm},$$

$$a = 0,3 \text{ mm}, \quad f = 40 \text{ mm},$$

$$K = 2a\pi = 125,6637 \text{ mm},$$

$$A = a^2 \pi = 1256,6371 \text{ mm}^2,$$

$$c = \frac{a^2}{2f - 2\sqrt{f^2 - a^2}} = 33,3114 \text{ mm}, \quad [2].$$

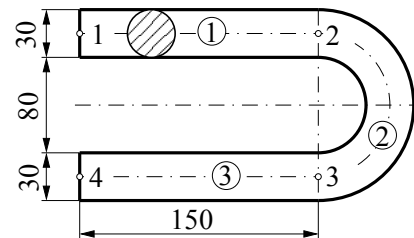
További adatok:

$$\lambda = 300 \frac{\text{W}}{\text{mK}},$$

$$\alpha = 100 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}},$$

$$\rho_0 = 1,6 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}, \quad U = 1 \text{ V}$$

A $\beta = 4,46 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$ esetben az áramerősség értéke $I = 13,37 \text{ A}$, a $\beta = 0$ esetben pedig $I = 25,3 \text{ A}$ az áramerősség értéke.



4. ábra. Három komponensű elem.

Az 5. ábra szemlélteti az összetett rúd alakú test keresztmetszeteiben fellépő ϑ hőmérséklet különbséget, mint a középvonalon értelmezett x ívkoordináta ($0 \leq x \leq L$ függvényét a $\beta = 4,27 \cdot 10^{-3} \text{ 1/K}$ és a $\beta = 0$ esetekre.

5. KÖVETKEZTETÉSEK

Egy egydimenziós, állandósult állapotú hővezetési feladat analitikus megoldását ismerteti a tanulmány. A vizsgálat tárgyát képező szerkezeti elem egyenes és körív középvonalú rudak láncszerű, elágazás mentes összekapcsolásával van kialakítva. Villamos ellenállás fűtés következtében beálló stacionárius hővezetést vizsgálunk. A fajlagos ellenállás hőfok függésével is számol a tanulmány.

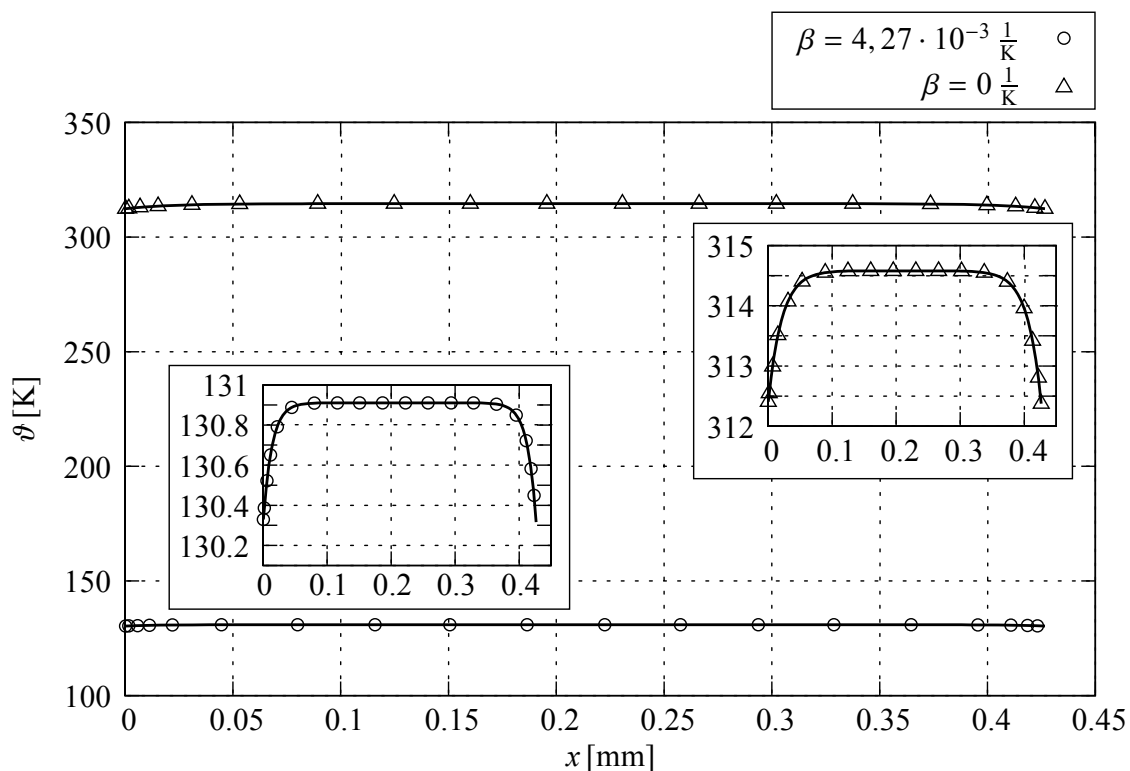
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás megvalósításához támogatást nyújtott az OTKA K67825 pályázat. A kutatás a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

szírozásával valósult meg.

HIVATKOZÁSOK

- [1] H. S. Carslaw – J. C. Jaeger: *Conduction of Heat in Solids*. 2nd edition. kiad. 1959, Oxford University Press.
- [2] R. D. Cook – W. C. Young: *Advanced Mechanics of Materials*. 1985, Macmillan, New York.
- [3] T. Czibere: *Vezetékes hőátvitel*. 1988, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc.
- [4] M. N. Özisik: *Boundary value Problems of Heat Conduction*. 1968, Dover Publ. Inc. New York.



5. ábra. $\vartheta = \vartheta(x)$ ($0 \leq x \leq L$) függvény görbéi.

ACÉLVÁZAS SZERKEZETEK TERVEZÉSÉNEK AUTOMATIZÁLÁSA TOPOLOGIAI OPTIMÁLÁSSAL

AUTOMATIZATION OF DESIGN OF FRAME AND TRUSS STRUCTURES USING TOPOLOGY OPTIMIZATION

Daróczy László*, Dr. Jármai Károly**

ABSTRACT

Although the field of topology optimization is a well-researched and advanced area, using topology optimization is still only the starting phase for a design process as almost no manufacturing constraints can be taken into account. The current article proposes a method to fully automatize the design of truss and frame structures using topology optimization, image interpretation and finally through a sizing problem, and focuses especially on the image interpretation part by introducing a flexible and fast method to extract the cross-section and number of joints, and the number, location and type of connections between them. Finally, some examples are presented in 2D and 3D for the image interpretation.

1. BEVEZETÉS

A számítógépek fejlődésével, a rendelkezésre álló számítási kapacitásoknak és a növekvő teljesítményeknek hála, valamint a véges-elem modellek (a továbbiakban VEM) fejlődésének és elterjedésének hála a rácsos tartók tervezése topológiai optimalás segítségével (a továbbiakban TO) egy megvalósítható tervezési alternatívává vált. A manapság elterjedt topológiai optimaló szoftverek képesek egyszerre több peremfeltétellel és akár több célfüggvényre vonatkozó megszorítással dolgozni egyszerre [1,2]. Ennek ellenére a topológiai optimalás eredményei nem használhatóak fel rögtön közvetlenül, hanem csupán egy kezdőpontként fog szolgálni a tervezést végző mérnök számára, mivel a topológiai optimalás végeredménye pl. nem szabványos profilú, de sokszor akár nem is állandó keresztmetszetű gerendákból van összeállítva, illetve a kötések vagy kihajlásra típusára is nehézkes

megkötéseket megadni. Bár több módszer is létezik optimális rácsos szerkezetek létrehozására, de a legtöbb ezek közül kötött számú rudat alkalmaz, amelyek csak előre meghatározott módon kapcsolódhatnak egymáshoz [3,4], és a CAD rendszerek és TO-rendszerek megfelelő integrációja még mindig hiányzik.

2. TERVEZÉSI FOLYAMAT AUTOMATIZÁLÁSA

Az új megközelítés alapötlete az, hogy a topológiai optimalás eredményét kizárólag az optimális topológia meghatározásához (azaz a szerkezeti elemek száma és típusa, valamint a közöttük lévő kötések) használjuk fel. A program automatikusan detektálja szerkezetet, és a végeredményt egy méretezési feladathoz használja fel bemenetként. A hasonló többlépcsős feldolgozások az az utóbbi időben egyre több helyen jelentek meg, ezek egy része azonban az alakoptimalás segítségével lép tovább [5,6,7], vagy egy szűk gyártási területre fókuszál, jellemzően kis méretű alkatrészekre szűkítve a kört [8]. Az alábbi megközelítés kifejezetten a nagyméretű acélvázak szerkezetekre fókuszál.

Azzal a feltételezéssel élve, hogy a topológia maga optimális, a méretezés célja pl. rácsos szerkezetek esetén a csomópontok pontos helyzetének és a rudak keresztmetszetének meghatározására egyszerűsödik. Ez utóbbi terület egy széles körben elterjedt eljárás a mérnöki tervezésben [9].

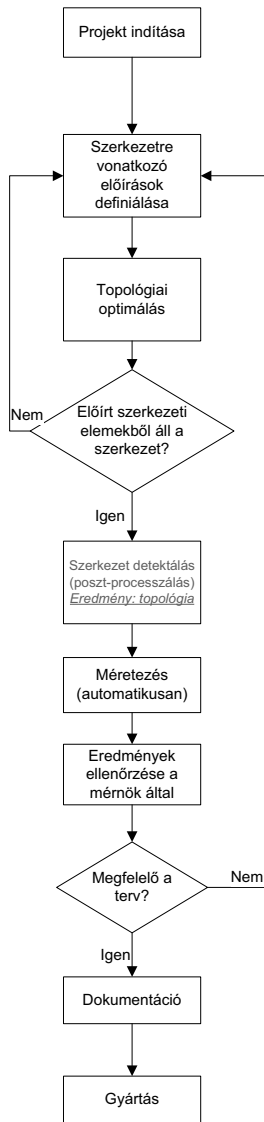
Mivel a méretezési feladat során a változók száma jelentősen kisebb, mint a topológiai optimalás folyamán, ezért ez gyorsan és pontosan végrehajtható, illetve például figyelembe vehetőek az EUROCODE szabvány által meghatározott, kihajlása és horpadásra vonatkozó feltételek is, valamint a cég különböző gyártástechnológiára és gyárthatóságra vonatkozó korlátait egyaránt.

Bár sok vázvonala- vagy „csontváz” detektáló algoritmus létezik, azonban ezek nem kifejezetten az optimalási feladatok végeredményének feldolgozására lettek kifejlesztve, ezért az alábbiakban ismertetésre kerül egy bitminta-primitív szűrők segítségével működő

* gépészmérnök MSc hallgató, Miskolci Egyetem

** egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Anyagmozgatási és Logisztikai Tanszék

detektáló algoritmus (ld. 1. ábra), mely a tesztek folyamán 100%-os megbízhatóságot mutatott.



1. ábra. Tervezés folyamata

Átmeneti csomópont: Pontosán két rúd közötti kapcsolódási pont. Ez a csomópont jelenthet egy átmeneti kapcsolatot a detektálás folyamatában, vagy egy végleges csomópontot amennyiben a rudak szögét bezáróan kapcsolódnak.



2. ábra. SIMP megoldása (TD: 160x40)



3. ábra. RTD (TD: 960x160)

Az alábbiakban néhány, a későbbiekben alkalmazásra kerülő fogalmat definiálunk.

Topológiai szerkezet (TD – Topology Design): A topológiai optimalítás végeredménye, ami tervezési tartományon belül értelmezett sűrűségértékekből áll (azaz az optimalt változók értékeiből; SIMP esetén ezek a $[0,1]$ vagy $[x_{\min},1]$ tartományban található értékek $[10,11]$; ESO/BESO esetén ezek a diszkrét $0.0/1.0$ vagy $x_{\min}/1$ értékek hard- illetve soft-kill eljárás esetén $[12,13,14]$). A diszkrétizáció történhet strukturált vagy strukturálatlan véges-elemes hálón, esetleg egyéb eljárásokkal is.

Csomópont: Két vagy több rúd találkozási pontja.

Végleges csomópont: Olyan rudak kapcsolódási pontja, amelynek a végleges topológiában is léteznie kell.

Evidens csomópont: Három vagy több rúd közötti csatlakozási pont. Egyben végleges csomópont is.

3. DETEKTÁLÓ ALGORITMUS FELÉPÍTÉSE

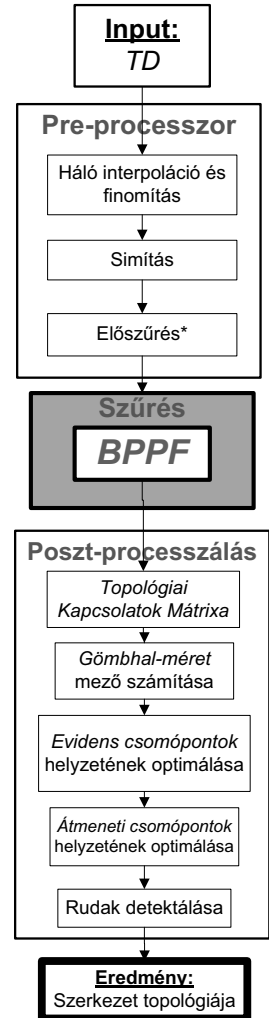
A detektáló algoritmus többszintű, bemeneti adata egy TD, és az alábbi lépésekre osztható fel (ld. 4. ábra):

1. lépés: A véges-elemes hálón alapuló TD alapján a BPPF számára is értelmezhető adat létrehozása.

a, **Háló interpoláció és simítás:** Ezen lépés célja az RTD létrehozása, mely az alábbiak szerint lesz definiálva:

Finomított Topológiai Szerkezet (RTD – Refined Topology Design): Strukturált diszkrétizált négyzetes (3D esetén kocka alapú) háló, mely a sűrűségértékeket tárolja. A TD értékeinek interpolációjával állítható elő. Amennyiben az eredeti TD is ilyen hálóval került kiszámításra, akkor az RTD megegyezhet a TD-vel, ellenkező esetben két eljárás használata javasolt az interpolációhoz.

Az első esetében a nagyon finom strukturált négyzetes (2D)/kocka alapú (3D) hálót az eredeti hálón belül, megfelelő nagyszámú pont esetén történő mintavételezéssel, míg a második esetben a cellánkénti sűrűségértékek történő átszámításával, majd ezek alapján az eredeti véges-elem háló alakfüggvényeivel történő interpolációval állítható elő.



4. ábra. Algoritmus felépítése

b, **Simítás:** Mivel a hálóinterpoláció eredményeként egyes esetekben az eredeti cellák különálló szerkezeti elemekként, blokkonként jelennek meg, ezért ajánlott a TO-ban alkalmazott hálófüggetlenségi szűrőhöz $[10,14,15]$ hasonló szűrőt alkalmazni a szerkezetre $r_s = (0.5 - 1.0)r_{\min}$ sugárral, ahol r_{\min} a TO-ban alkalmazott szűrő sugara.

A hálófinomítási tényező jelölése Ref_{mesh} , ami azt mutatja meg, hogy hányszor finomabb az interpolált háló az eredetinél. Ajánlott értékei 2-4.

$$Ref_{mesh} = \sqrt[x]{\frac{\text{új háló elemeinek száma}}{\text{rég háló elemeinek száma}}}, \text{ ahol } \begin{matrix} x = 2 & \text{2D-re} \\ x = 3 & \text{3D-re} \end{matrix} \quad (1)$$

c, **Előszűrés:** Az előszűrés egy meghatározott BPPF alkalmazását jelenti, amely tovább finomítja az RTD

egyes részleteit, így a kapott nagyfelbontású, jó minőségű kép akár más algoritmusokhoz is alkalmazható (ld. 5. ábra).



5. ábra. RTD (simítással)

4. BPPF ÁLTALÁNOS MEGFOGALMAZÁSA

Az alábbiakban ismertetésre kerül a BPPF felépítése és legfontosabb fogalmai 3D-ra. A 2D-s megközelítés nem kerül ismertetésre, azonban minden ismertetett képlet alkalmazható 2D-re is gond nélkül, amennyiben a 3. dimenziót mindenütt figyelmen kívül hagyjuk benne. Bár hasonló középvonal-detektáló algoritmusok léteznek [16], azonban ezek eltérő matematikai feltételekkel közelítik meg a feladatot, és nem tartalmaznak kiegészítő algoritmusokat az eredmények további javítására, illetve a szűrés nem szabályozható akár futásidőben. Az alábbiakban a BPPF-hez szükséges további definíciók következnek.

Közbenső Topológiai Szerkezet (ITD - Intermediate Topology Design): Amennyiben bármilyen szűrő (sikeresen) alkalmazásra került az RTD-re, akkor az egy ITD lesz. Más néven ez lesz az alap voxelmező (mivel minden cella 0 vagy 1 értéket tárol benne).

Voxel cella: Az RTD vagy ITD egyetlen cellája. Egy voxel jelölése $[l, m, n]$, azaz ez az l -dik cella az x irányban, valamint az m -dik cella az y irányban illetve az n -dik cella az z irányban.

Végleges Topológiai szerkezet (TDR - Topology Design Results): A szűrési folyamat végeredménye, ahol minden egyes voxel csak és kizárólagosan két szomszédos voxelrel rendelkezik, amennyiben az nem egy *evidens csomópontot* képvisel.

Érték operátor: Egyetlen cella értékét mutatja meg: $\hat{f}[l, m, n]$. Üres cellák esetén ez $\hat{f}[l, m, n]=0$, míg tömör cellák esetén $\hat{f}[l, m, n]=1$ értéket ad vissza a TDR vagy ITD egyetlen cellájára.

Általános szűrő: Bármely $r_x \times r_y \times r_z$ méretű téglalap alakú terület.

Szimmetrikus szűrő: Bármely általános szűrő egyben szimmetrikus szűrő is, ha $r_x = r_y = r_z$ teljesül.

Szűrő cella: Egy szűrő egyetlen celláját azonosítja: $\langle i, j, k \rangle$, ha $1 \leq i \leq r_x$ és $1 \leq j \leq r_y$, $1 \leq k \leq r_z$.

Érték operátor (szűrő esetén): Egyetlen szűrő cella értékét mutatja meg: $\hat{f}\langle i, j, k \rangle$. Az implementáció során egy három-értékű reprezentáció került megvalósításra, ahol egy általános szűrő bármely celláját üres szűrő cellának nevezzük, amennyiben $\hat{f}\langle i, j, k \rangle = 0$, tömör szűrő cellának, amennyiben

$\hat{f}\langle i, j, k \rangle = 1$ és detektor szűrő cellának, ha $\hat{f}\langle i, j, k \rangle = -1$.

Egyfókuszú szűrő: Bármely általános szűrő, amelyre teljesül, hogy $\hat{f}\langle i_1, j_1, k_1 \rangle = \hat{f}\langle i_2, j_2, k_2 \rangle = -1$ akkor és csakis akkor, ha $i_1 = i_2$, $j_1 = j_2$, és $k_1 = k_2$ azaz egyetlen detektor szűrő cellát tartalmaz.

Aktív szűrő: Bármely szűrő aktív szűrő a $[l, m, n]$ pozíciónál, ha $\hat{f}[l+i, m+j, n+k] = 0$ akkor és csakis akkor igaz, ha $\hat{f}\langle i, j, k \rangle = 0$, $1 \leq i \leq r_x$, $1 \leq j \leq r_y$, $1 \leq k \leq r_z$. Az aktív szűrőket az aktiválási operátor 1 értékkel jelzi: $\hat{A}_{\text{filter}}[l, m, n] = 1$ (egyébként 0 értéket ad vissza). Amennyiben az aktiválási operátor feltétele teljesül, akkor a szűrő hatása az alap voxelmezőre $\hat{f}[l+i, m+j, n+k] = 0$ lesz bármely szűrőcellára, ahol $\hat{f}\langle i, j, k \rangle = -1$ teljesül.

Szomszédossági operátor: Bármely két szűrő cella szomszédos akkor és csakis akkor, ha van egy közös lapjuk. Ez gyakran lesz közvetlen kapcsolatként is megnevezve. Ezt az állapotot a szomszédossági operátor 1-es értékkel fogja jelezni: $\hat{N}\langle i_1, j_1, k_1 \rangle \langle i_2, j_2, k_2 \rangle = 1$ (egyébként 0 értéket ad vissza).

Kapcsolódási operátor: Bármely két cella kapcsolatban áll egymással egy úton keresztül, ha olyan megfelelő indexpárokból álló sorozat létezik, melyben minden indexpár által reprezentált cella nem üres cella, és az egymás utáni indexek szomszédos cellákat jelölnek. A kapcsolódást a kapcsolódási operátor 1-es értékkel fogja jelezni: $\hat{C}\langle i_1, j_1, k_1 \rangle \langle i_2, j_2, k_2 \rangle = 1$ (egyébként 0 értéket ad vissza).

Érvényességi operátor: Az érvényességi operátor 1-es értéke fogja jelezni $\hat{V}[\text{filtername}] = 1$ (egyébként 0 értéket ad vissza) annak a szükséges és elégséges feltételét, hogy ne csökkentjük a csomópontok és rudak számát a topológiában. Ennek megfelelően csak azok a szűrők megengedettek, amelyek nem tudnak letörölni egyetlen olyan pixelt sem, amelyek lehetnének az egyszerűsített szerkezet vázvonalaának részei (azaz a detektáló szűrő cella nem lehet a szűrő szélén, illetve csak olyan pixelek törölhetőek, amelyek tömör pixelek olyan csoportjait kötik össze, melyek a detektáló szűrő cellát nem tartalmazó úton is kapcsolódnak egymáshoz.

Ezek a feltételek azonban nem elégségek ahhoz, hogy az algoritmus ne hozzon létre lokális hibákat, hurkokat, azaz szükséges definiálni az ehhez szükséges feltételeket is.

Konzisztens ITD: Egy olyan ITD, amelyben nem léteznek olyan élek vagy csúcok, amelyek csak két olyan voxel cellához tartoznának, amelyek nem szomszédos cellák. Ezt az állapotot a konzisztens érvényességi operátor $\hat{V}^c[\text{filtername}] = 1$ értékkel jelzi. Azokat a szűrőket, amelyek kielégítik ezt a feltételt, konzisztens szűrőknek fogjuk nevezni.

Bár a szerkezet immár konzisztens marad végig, de a csomópontok száma még mindig nőhet. Ennek elkerülése végett bevezetésre kerül az inverz szerkezet fogalma. Amikor a szerkezeten a szűrést hajtjuk végre,

valójában egy másik – rejtett – szerkezet is létezik, amely a mi szerkezetünk inverze (azaz az üres cellákból áll: $\hat{f}(i, j, k) = 0$). Ha megvizsgáljuk ezt a szerkezetet, nyilvánvalóvá válik, hogy az inverz szerkezet topológiáját is sértetlenül kell hagynunk, akárcsak a konzisztenciáját. Azokat a szűrőket, amelyek kielégítik azt a feltételt, hogy az inverzük is konzisztens marad, inverzen konzisztens szűrőknek nevezzük, és ezt az állapotot az inverzen konzisztens érvényességi operátor: $\check{V}^{IC}[\text{filtername}] = 1$ jelöli.

Emellett belátható, hogy ha törölünk egy elemet a szerkezetből, akkor egy elemet hozzáadunk annak inverzéhez. Amennyiben ez az új elem két, korábban egymással nem kapcsolódó részét köti össze az inverz szerkezetnek, akkor abban egy új rúd jött létre, azaz a topológia sérült. Ez utóbbi feltételt kielégítő szűrőket fogjuk inverzen érvényes szűrőknek nevezni, melyeknek ki kell elégíteniük az inverz érvényességi operátort: $\check{V}^I[\text{filtername}] = 1$. Matematikailag megfogalmazva $\check{V}^I[\text{filtername}] = 0$ bármely olyan szűrőre, amely két egymáshoz nem kapcsolódó üres régiót összekötne az aktiválás után.

Ha megpróbáljuk meghatározni az összes lehetséges érvényes detektáló szűrőt, akkor egy erősen korlátozott tagszámú csoportot kapunk – amelyek forgatással vagy tükrözéssel nem transzformálhatóak egymásba-, ezt a csoportot fogjuk bitminta-primitívnek nevezni. 2D esetén 9 primitív elegendő a szűrés elvégzéséhez, 3D esetében azonban jóval nagyobb számú létezik, ezért ebben az esetben bitminta-primitív csoportokat definiálunk, melyeket különböző tulajdonságaik alapján azonosíthatunk (pl. tömör cellák száma, stb.). Ezeket a csoportokat adhatjuk meg a programnak megfelelő szekvencia-operátorok segítségével, melyek azt határozzák meg, hogyan és milyen sorrendben kerülnek alkalmazásra az egyes szűrők (pl. az alábbi megvalósításban \check{Z} , \check{B} , \check{F} , \check{M} , \check{S} , \check{D} operátorok).

5. POSZT-PROCESSZÁLÁS

A poszt-processzálás feladata nem más, mint a legkisebb olyan TCM (lásd később) megalkotása, mely megfelelően le tudja írni a szerkezet topológiáját. Bár a szerkezet 'csontváza' sikeresen detektálva van, de ennek ellenére az eredmények ebben a formában még nem használhatóak. Az evidens csomópontok azonnal felismerhetőek, de azok a végleges csomópontok, amelyek szög alatt csatlakozó rudakat kötnek össze, még nem, illetve a kötések típusa sem. Az alábbiakban röviden ismertetésre kerülnek az algoritmus egyes részei.

a, *Topológiai Kapcsolatok Mátrixának előállítása (a továbbiakban TCM - Topology Connectivity Matrix)*: Egy olyan mátrix, amely a csomópontok számát, és azok közötti kapcsolatokat (rudak) határozzák meg. Amennyiben a csomópontok számát n -nel jelöljük,

akkor ez egy $n \times n$ méretű mátrix. Amennyiben az i -dik csomópont kapcsolódik a j -dik csomóponthoz, akkor ez fordítva is igaz, azaz $t_{ij} = t_{ji} = 1$, tehát a mátrix szimmetrikus: $\mathbf{T} = \mathbf{T}^T$.

Egyenes középvonalú tartók esetén t_{ij} nem nulla értéke jelzi a kapcsolatot, egyébként pedig ez az érték határozza meg a gerenda típusát.

Erősen ajánlott számítástechnikai okokból egy 'sparse' mátrixban tárolni az adatokat, mivel ez a mátrix egy ritka mátrix. Az egyes csomópontok pozícióját a \mathbf{p} –vel jelölt pozíció vektor fogja tárolni. Egyetlen csomópont pozíciója a \mathbf{p}_i helyen található, és az egyes komponenseket pedig $p_{i,x}$, $p_{i,y}$ jelöli.

Az előállítás során jellemzően $Step_{mov} = (0.4 - 0.7) \cdot Ref_{mesh} \cdot r_{min}$ számú lépésenként a voxelekból álló csontváz alapján létrehozunk egy nagyfelbontású, nagy elemszámú TCM-et, későbbi feldolgozás céljából.

b, *Gömbhal operátor számítása*: A gömbhal operátor elnevezés egy egyszerű hasonlatból származik. A szerkezet minden egyes pontjába gömbhalakat helyezünk el, majd azok akkorára fúvódnak fel, amíg a szerkezet falához nem érnek. A gömbhal operátor értéke (ld. 6. ábra) tulajdonképpen egy adott pontba beírható legnagyobb olyan gömb térfogatát jelenti, melynek felszíne nem metszi a szerkezet határvonalát.



6. ábra. Gömbhal operátor (nagyobb érték sötétebb)

c, *Lokális csomóponti pozíció optimalizálás (LPPO - Local point position optimization)*: Ezen optimalizálás alapötlete, hogy a BPPF eredményeként lehetséges, hogy a TCM csomópontjai nem optimális helyzetben (értsd nem pontosan a középvonalon) helyezkednek el, de közel vannak hozzá. Ebben az esetben egy kis korrekció elvégzésével egy sokkal pontosabb megoldást érhetünk el. Az optimális pozíciót a gömbhal operátor magasabb értékei jelzik. Az LPPO folyamat a csomópontok közvetlen környezetét fogja átvizsgálni olyan pozíciók után kutatva, ahol a gömbhal operátor értéke magasabb, azaz közelebb található a középvonalhoz. Amennyiben azonban több csomópont is a skalármező egyik maximumának közelében található, akkor előfordulhat, hogy az összes csomópont lépésről lépésre a maximumhoz közelítene, így hibás eredményt hozva létre. Ennek elkerülésére bevezethető egy további paraméter, α_{max} , azaz a tiltott szögtartomány. Így egy optimalizási feltétellel tesszük azt is, hogy egyik csomópont sem mozoghat olyan irányokba, ami közel van egy másik, létező kapcsolat

irányához, azaz megtiltunk minden olyan mozgást, amely egy már létező kötés irányában történne.

Maximáljuk:

$$\hat{P} [p_{i,x} + d_x, p_{i,y} + d_y, p_{i,z} + d_z] \rightarrow \max$$

Úgy, hogy $\theta_j \leq \alpha_{\max}$, ahol

$$\theta_j = \arccos \frac{(d_x \mathbf{e}_x + d_y \mathbf{e}_y + d_z \mathbf{e}_z) \cdot (\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j)}{|d_x \mathbf{e}_x + d_y \mathbf{e}_y + d_z \mathbf{e}_z| \cdot |\mathbf{p}_i - \mathbf{p}_j|}, \text{ ha } t_{ij} = 1.$$

(a lehetséges mozgás iránya és a csomópontot egy másik csomóponttal összekötő irány által bezárt szög) ahol,

$$0 \leq d_x, d_y, d_z \leq D_{\max}$$

Az új pozíció pedig $\mathbf{p}_i^{\text{new}} = \mathbf{p}_i^{\text{old}} + d_x \mathbf{e}_x + d_y \mathbf{e}_y + d_z \mathbf{e}_z$.

Általában $D_{\max} = (0.8-1.1) \cdot Ref_{\text{mesh}}$ érték egy jó választás a folyamathoz. A javasolt paraméterek a szögekre $\alpha_{\max} = 6^\circ$ az evidens csomópontokra, és $\alpha_{\max} = 12^\circ$ az átmeneti csomópontokra. A teljes optimalizációs folyamatot addig ismétljük, amíg a pozíciók nem konvergálnak.

d, Szerkezeti elemek detektálása: Az algoritmus legutolsó része a konkrét szerkezeti elemek detektálása, mivel ahhoz, hogy egy szerkezetet pontosan detektálhassunk, szükséges információkkal rendelkezünk annak céljáról, méreteiről, és gyártástechnológiájáról egyaránt.

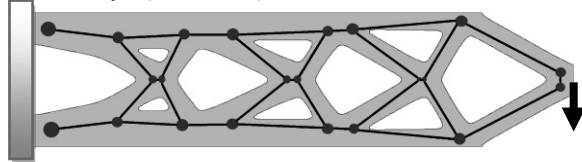
A szoftver egy adatbázisban tárolhatja a különféle rudakra és kötésekre vonatkozó feltételeket, és a tervező egyszerűen kiválaszthatja, mely szerkezeti elemekkel (egyenes vagy ívelt) szeretne dolgozni a poszt-processzálás folyamán. Az eredmények bemutatása során egy egyszerű, de meglepően hatékony eljárás került implementálásra egyenes rudak detektálására.

6. EREDMÉNYEK

Az alábbiakban bemutatásra kerül néhány optimalizációs feladat eredménye az algoritmus segítségével feldolgozva. A topológiák BESO [12,13,14], SIMP [3,10], illetve QSQF [17] algoritmus segítségével kerültek előállításra.

6.1 Egyik végén befalazott, másik végén hajlított rácsos tartó – 2D

Az alábbiakban a cikk folyamán már többször is bemutatott példán kerül ismertetésre az algoritmus végeredménye (ld. 7. ábra).



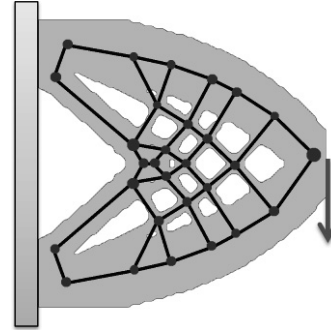
7. ábra. Rácsos tartó

A nagyobb pontok a megfogás helyét, a kisebbek az evidens csomópontokat, míg a sötét vonalak a rudakat

jelölik. A háttérben halvány szürkével még látható az eredeti szerkezet.

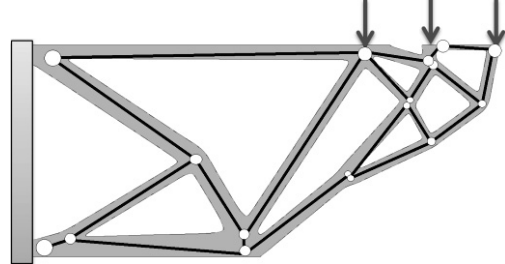
6.2 Egyik végén befalazott, másik végén hajlított rácsos tartó, eltérő méretarányokkal – 2D

Az alábbiakban az előzőhöz hasonló, azonban eltérő méretarányokkal rendelkező, és nagyobb térfogatarányú példa kerül bemutatásra (ld. 8. ábra).



8. ábra. Rácsos tartó

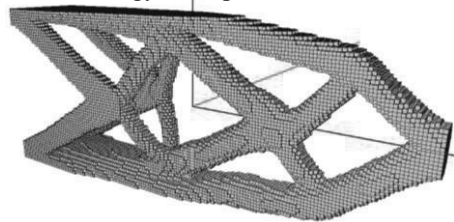
6.3 Egyik végén befalazott, három helyen terhelt rácsos tartó – 2D



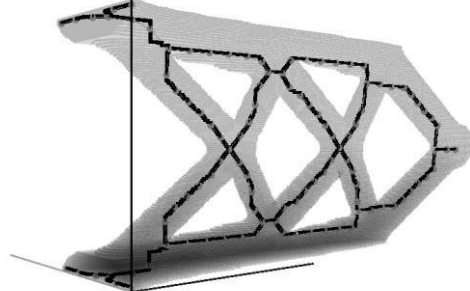
9. ábra. Rácsos tartó.

6.4 Egyik végén befalazott, másik végén hajlított rácsos tartó – 3D

Az alábbiakban egy 3D-s példa kerül bemutatásra.



10. ábra. TD (150x30x60).



11. ábra. Detektált középvonal (eltérő feladat).

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben javasolt eljárás nem csak gyors és megbízható, de viszonylag egyszerűen implementálható is, a tesztek során az eredeti *TD* méretétől függően 1-60 másodperc alatt elkészült a számítással (2D) egy Intel® Core i5™ 760 processzor egyetlen magján (3.2 GHz). Az algoritmus nagyon könnyen párhuzamosítható mind a CPU-n, mint a GPU-n a nagyszámú primitívnek hála.

A fejlesztés következő szakasza a méretoptimalási modul, az *LPPO* egy továbbfejlesztett változatának létrehozása, valamint végül, de nem utolsó sorban egy olyan adatbázis létrehozására fog irányulni, amely sok, mérnöki szempontból is jelentőséggel bíró kötés- és rúdtípus kritériumait fogja tartalmazni. Bár az alábbi munkában a *BPPF* kifejezetten a középvonalak detektálására került alkalmazásra, de a képességeinek és a lehetőségek széles tárházának hála (pl. szűrők, szűrő méret, *LPPO* paraméterek, stb.) az eljárás nagy valószínűséggel kiterjeszhető nem csak középvonal, de például lemezek, felületek, és egyéb mérnöki szempontból fontos „feature” csoportok detektálásra is, vagy akár a képfelismerés területeire is.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg, valamint az Országos Tudományos Kutatási Alap OTKA T 75678 támogatásával.

9. IRODALOM

[1] Liu, Z. Gao, Q., Zhang, P., Xuan, M. and Wu, Y.: Topology optimization of fluid channels with flow rate equality constraints. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Volume 44, Number 1, 31-37. 2011.

[2] Rozvany, G.I.N.: Domain augmentation and reduction in structural topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Volume 44, Number 4, 141-158. 2011.

[3] Bendsoe, M. P., Sigmund, O.: *Topology Optimization – Theory, Methods and Applications*. Chapter 4, 16-68. Springer, 1995.

[4] Bendsoe, M. P., Ben-Tal, A., and Zowe, J.: Optimization methods for truss geometry and topology design. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Volume 7, Number 3, 141-158. 1994.

[5] Nursel Öztürk, Ali R. Yildiz, Necmettin Kaya, Ferruh Öztürk: Neuro-Genetic Design Optimization Framework to Support the Integrated Robust Design

Optimization Process in CE. *Concurrent Engineering*, Volume 14, Number 1, 5-16, March 2006.

[6] Yildiz, A.R., Öztürk, N., Kaya, N., Öztürk, F.: Integrated optimal topology design and shape optimization using neural networks. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Volume 25, Issue 4, 251-260, 2003.

[7] William Robert Blattman: *Generating CAD Parametric Features based on Topology Optimizations*. Department of Mechanical Engineering, Brigham Young University, MSc Thesis. 2008.

[8] Ulrich Bauer, Konrad Polthier: Detection of Planar Regions in Volume Data for Topology Optimization. *Advances in Geometric Modeling and Processing*, 119-126, 2008.

[9] Farkas, J., Jármay, K.: *Design and optimization of metal structures*. 328 p. ISBN: 978-1-904275-29-9. Horwood Publishers, Chichester, UK, 2008.

[10] Sigmund, O.: A 99 line topology optimization code written in Matlab. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. Volume 21, Number 2, 120-127. 2001.

[11] Zhou, M., Rozvany, G.I.N.: The COC algorithm, part II: Topological, geometry and generalized shape optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 89. 1991.

[12] Zhou, M., Rozvany, G. I., N.: On the validity of ESO type methods in topology optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Volume 21, Number 1, 80-83, 2001.

[13] Querin, O.M., Steven G.P., Xie, Y. M.: Evolutionary structural optimisation (ESO) using a bidirectional algorithm. *Engineering Computations*, Volume 15, Number 8, 1031-1048. 1998.

[14] Huang, X., Xie, Y. M.: *Evolutionary Topology Optimization of continuum Structures – Methods and Applications*. Wiley, 2010.

[15] Sigmund, O., Petersson, J.: Numerical instabilities in topology optimization: A survey on procedures dealing with checkerboards, mesh independencies, and local minima. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, Volume 16, Number 1, 68-75. 1998.

[16] Louisa Lam, Seong-Whan Lee, Ching Y. Suen: Thinning Methodologies – A Comprehensive Survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Volume 14, Number 9, 869-885, September 1992.

[17] Daróczy, L., Jármay K.: New method for topology optimization of truss structures. *GÉP folyóirat, LXII. évfolyam, I. Kötet*, 29-34. Miskolc, 2011. (in Hungarian)

ÉGÉSI LEVEGŐT ELŐMELEGÍTŐ HŐCSERÉLŐ FEJLESZTÉSE KANDALLÓHOZ

DEVELOPMENT OF HEAT EXCHANGER FOR DOMESTIC FIREPLACE TO PREHEAT AIR FOR BURNING

Dúl Róbert*, Dr. Palotás Árpád Bence*,
Dr. Jármai Károly**, Dr. Barkóczy Péter***

ABSTRACT

In this paper authors describe the methodology used for finding an optimum solution for a welded steel heat exchanger mounted on a domestic fireplace. The heat exchanger is used to preheat the primary and secondary air necessary for burning wood logs in the fireplace. The optimization process is combined with Computational Fluid Dynamics simulation to calculate values of design variables and the aim function.

1. BEVEZETÉS

A fatüzelésű kandalló manapság reneszánszát éli. Egyrészt azért, mert a földgáz árának folyamatos növekedése - amely tendencia tartósan ígérkezik - készteti az embereket arra, hogy alternatív fűtési módokat keressenek, másrészt a kandalló, a benne égő tűz látványa, a fa ropogása egy olyan érzelmi hatást is kelt a felhasználóban, amely más fűtési eljárásokkal nem utánozható.

A feladatunk az volt, hogy egy 8 kW teljesítményű, fatüzelésű, hegesztett acél szerkezetű kandalló hatásfokát növeljük meg a kandalló kilépő füstcsonkjára helyezhető hőcsereelő segítségével.

A kandalló füstgáz csonkjára szerelhető „hőcsereelő” már létezik, amennyiben a Ø150 mm-es füstcsövet több kisebb átmérőjű csőre bontó, majd újra összevezető eszközt hőcsereelőnek tekintjük, azonban az általunk fejlesztett berendezés feladata az, hogy a primer és szekunder égési levegőt is előmelegítve növeljük a kandalló hatásfokát. A fejlesztési folyamathoz áramlástan szimulációt (CFD) használtunk.

* Miskolci Egyetem Tüzeléstan és Hőenergia Intézeti Tanszék

** Miskolci Egyetem Anyagmozgatási és Logisztikai Tanszék

*** Miskolci Egyetem Anyagtudományi Intézet

2. FATÜZELÉSŰ KANDALLÓK HATÁSFOKA

A „Szilárd tüzelőanyag fűtésű háztartási tűzhelyek” méretezésére, gyártására, azok kivételére, a biztonságra és teljesítőképességre (hatásfok és kibocsátás) vonatkozó utasításokat az EN 13240:2005 számú Európai Szabvány határozza meg [1].

A szabvány szerinti hatásfok mérési módszer rövid összefoglalása a következő:

- A kandallót felállítják a mérlegpódiumra, amely nagy pontossággal (± 2 g hibával) méri a leégés után a tűztérben maradt salak és hamu tömegét. A mérleget a mérés megkezdése előtt nullázzák.
- A mérést a szabványban meghatározott mennyiségű és minőségű tüzelőanyaggal akkor kezdik meg, amikor a tűztérben a korábban végrehajtott égetési ciklusok eredményeként már van ún. alapparázs.
- A tüzelőanyag mennyiségét (B_{fi}) a szabványban meghatározott módon, az alábbi képlettel kell kiszámítani:

$$B_{fi} = 360000 \cdot P_n \cdot \frac{t_b}{H_u \eta} \quad (1)$$

ahol:

H_u : a vizsgálati tüzelőanyag fűtőértéke, amely a szabványos (a felhasználás előtt két évvel kivágott, száraz helyen tárolt) 11-12%-os nedvességtartalmú bükkfa esetén 15969 kJ/kg.

η : az EN 13240:2005 szabvány szerint a minimális hatásfok (50%), vagy egy magasabb, a gyártó által megadott érték %-ban, amely a mi esetünkben 80% (korábbi mérések és a kandalló gyártójának tapasztalata alapján 80% ennek a kandalló típus hatásfoka).

P_n : a névleges hőteljesítmény kW-ban, amely a mi esetünkben 8 kW.

t_b : minimális leégési időtartam, amely a mi esetünkben 0.75 óra, vagy más, a gyártó által megadott égési időtartam órában. A mérési

ciklus végrehajtása során a szabvány a minimális égési időtartamtól legfeljebb $\pm 15\%$ -os eltérést enged és ilyenkor összehasonlító számítással kell meghatározni a 0.75 órára vonatkozó teljesítményt.

Az így kiszámított érték $B_{fi}=1,68$ kg, amely nem tartalmazza a hamuként visszamaradt, azaz el nem égett tüzelőanyag mennyiségét. Ennek értéke a tapasztalatok, a kandalló gyártója által végzett korábbi mérések alapján a tüzelőanyag mennyiség 13-14% közötti értéke. Ennek értelmében tehát ahhoz, hogy a tüztérből 45 perc alatt 8 kW hőteljesítményt nyerjünk ki, 1,9 kg szabványos bükkfát kell elégetni.

Fontos és szintén a szabvány által előírt vizsgálati peremfeltétel, hogy az égetés során a teljes rendszerben, tehát a tüztérben és minden hozzá kapcsolódó berendezésben együttesen jelen lévő nyomást ± 2 Pa megengedett eltérés mellett 12 Pa értéken kell tartani. E nyomás tartja működésben az égést, e nyomáskülönbség hatására lép a tüztérbe az égési levegő, és a füstgáz ennek következtében távozik a tüztérből a kéményen keresztül.

- A hatásfok meghatározása szintén a fent említett szabvány alapján történik a következő képlet szerint.

$$\eta = 100 - (q_a + q_b + q_c) \quad (2)$$

ahol:

q_a : a füstgázokkal eltávozó hő mennyiségének és a tüzelőanyag H_u alsó fűtőértékének hányadosa %-ban,

q_b : a távozó füstgáz látens hőjének és a tüzelőanyag H_u alsó fűtőértékének hányadosa %-ban,

q_c : a salakhullásban lévő éghető, de el nem égett alkotórészek általi veszteség és a tüzelőanyag H_u alsó fűtőértékének hányadosa %-ban.

A számításhoz a q_a értékét a tüztér szabványos mérési ciklusában mért füstgáz hőmérséklet adatok alapján, a q_b értékét a füstgáz összetételének analizálása alapján határozhatjuk meg, míg fatüzelés esetén a q_c értékét a szabvány által 0,5%-ban rögzítettnek vehetjük.

A (2) alapján tehát látszik, hogy a hatásfok meghatározás a tüztérből távozó veszteségek megmérésére és a 100%-ból történő kivonásra vezethető vissza. A q_a értékben meghatározott veszteség a füstgáz hőmérsékletével, a q_b a füstgáz kémiai összetételével kapcsolatos, a q_c értékét pedig a szabvány eleve egy fix értéként engedi számítani, amelyet a gyártók ennek megfelelően használnak a készülék hatásfokának meghatározásakor.

E munka keretei között a q_a , azaz a füstgáz hőmérsékletével hasznosulatlanul távozó veszteség csökkentése a célunk, amelyet egy olyan hőcserélő

rendszerbe állításával hajtunk végre, amely a tüztérlet már elhagyó füstgázban tárolt hőenergiát hasznosítja.

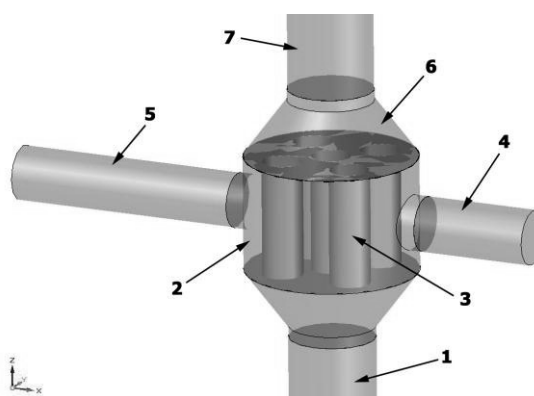
3. HŐCSERÉLŐ ALAPGEOMETRIA KIALAKÍTÁSA

A hőcserélő geometriájának kialakítása során több verziót is készítettünk annak érdekében, hogy eldönthető legyen, e sebesség és hőmérséklet tartományban milyen kialakítás felel meg a legjobban a céljainknak. E cikkben az előzetes vizsgálatok eredményei alapján kiválasztott keresztáramú csöves hőcserélő konstrukciót mutatjuk be.

A hőcserélő konstrukció mindegyik esetben egy külső lemez dobból és egy cserélhető hőcserélő betétből áll. A modell tartalmazta továbbá a hőcserélőre és onnan elvezető füstgáz és levegő csöveket is az 1. ábra szerint. A geometria részelemei a következők:

- 1: kandallóhoz csatlakozó füstgáz vezeték
- 2: hőcserélő dob
- 3: hőcserélő betét
- 4: hőcserélőbe az égési levegőt vezető cső
- 5: hőcserélőből az égési levegőt elvezető cső
- 6: kúpos csatlakozó elem
- 7: kéményhez csatlakozó füstgáz vezeték

A kandallóhoz csatlakozó csővezeték belső átmérője 150 mm, amely megegyezik a 8 kW hőteljesítményű kandalló füstgáz csonkjának méretével. A hőcserélő dob átmérője 300 mm. A dobhoz csatlakozó égési levegő vezeték belső átmérője 95 mm, ami megegyezik a 8 kW hőteljesítményű kandalló égési levegő csatlakozójának méretével. A kúpos csatlakozó elem nagyobbik átmérője 300 mm, míg a kisebbik 150 mm, a magassága pedig 100 mm. A dobot és a hozzá kapcsolódó csöveket az alábbi ábrán – a könnyebb értelmezhetőség érdekében – áttetsző kék megjelenítéssel mutatjuk be.



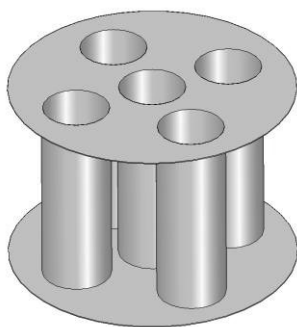
1. ábra Hőcserélő alaptípus és a geometria részei

4. KERESZTÁRAMÚ CSÖVES HŐCSERÉLŐ

A keresztáramú csöves hőcserélő betét koncepciójának lényege, hogy a függőlegesen felfelé áramló füstgázt több függőleges csőjében legkedvezőbb esetben azonos mennyiségekre osztjuk szét. Így megnövelve a hőátadó felületet, az égési levegőt a csövek körül – legkedvezőbb esetben egyenletesen elosztva – vezetjük a kilépő keresztmetszet irányába.

E hőcserélő konstrukció előnye, hogy a hőátadó felületet jelentős mértékben meg tudjuk növelni a csövek számának növelésével.

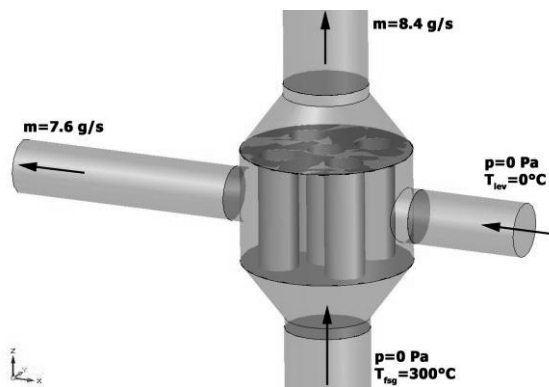
A hátránya ugyanakkor, hogy a csövek számának és hosszának növelésével, illetve a csövek belső átmérőjének csökkentésével nő a füstgáz áramlással szembeni ellenállása. Egy ilyen hőcserélő betétet a 2. ábra mutat be.



2. ábra $N=5$ darab 70 mm átmérőjű csövet tartalmazó betét

5. A CFD SZIMULÁCIÓ PEREMFELTÉTELEINEK MEGHATÁROZÁSA

A CFD szimuláció peremfeltételeinek értékeit egyrészt az EN 13240:2005 szabványban előírt képletek és égésméleti számítások alapján, illetve mérési adatokból állítottuk elő. A 3. ábra a peremfeltételek értékeit és megadásuk helyét mutatja be.



3. ábra Peremfeltételek a CFD szimulációban

A füstgáz oldali peremfeltételek esetén a beömlő keresztmetszeten $p=0$ Pa relatív nyomást adtunk meg, azaz azt feltételeztük, hogy a talajszinten, ahol a kandalló és a hőcserélő elhelyezkedik, atmoszférikus nyomás uralkodik. A beömlő keresztmetszeten lép be a kandallóból érkező $T_{fg}=300$ °C hőmérsékletű füstgáz.

Az $m_{fg}=8.4$ g/s tömegáram használata a szimulációban egymaga fejezi ki több, a kandalló működésével kapcsolatos paraméter meglétét. Ez a tömegáram kifejezi a szabványos mérési ciklusban folyamatosan meglévő $p=-12$ Pa nyomás által a szabványos tömegű tüzelőanyagból felszabaduló és a rendszert a kéményen keresztül elhagyó gázok mennyiségét. Továbbá a tömegáramnak ez az értéke felel meg a szabvány által előírt mérési időtartamna.

A levegő oldali peremfeltételeket hasonló rendszer alapján adtuk meg a modellen. A beömlő keresztmetszeten a talajszinten érvényes relatív nyomás értéket $p=0$ Pa formájában és a rendszerbe lépő levegő hőmérsékletét.

6. AZ OPTIMÁLÁSI FELADAT MEGFOGALMAZÁSA

Az előzetes vizsgálataink eredményeiből felismerhető volt, hogy a keresztáramú csöves hőcserélő esetén a vizsgált paraméterekkel – kilépő füstgáz és levegő hőmérséklet, levegő és füstgáz oldali nyomásesés – szemben támasztott követelmények egymással ellentétesek. Tehát lehetőségünk volt arra, hogy e kritériumok alapján megkeressünk egy olyan optimális megoldást, ahol a célunk a füstgáz kilépő hőmérséklet (T_{fg}) minimumának, a levegő kilépő hőmérséklet (T_{lev}) maximumának, illetve a nyomásesések (Δp_{lev} és Δp_{fg}) minimumának elérése.

Az optimáláshoz felhasznált célfüggvény a következő:

$$F(D, H, d, N, \Gamma) = a \frac{K_{kts}}{T_{lev}} + b \frac{\Delta p_{lev}}{T_{lev}} + c \frac{T_{fg}}{T_{lev}} + d \frac{\Delta p_{fg}}{T_{lev}}$$

ahol a, b, c, d a vizsgált paraméterek fontosságát adó súlyok a következők szerint:

| Paraméter | T_{fg} | Δp_{lev} | Δp_{fg} | K_{kts} |
|-------------|----------|------------------|-----------------|-----------|
| Súly faktor | 0,5 | 0,3 | 0,15 | 0.05 |

Optimálási eljárásként a Downhill Simplex (vagy más néven amőba) módszert (Nelder és Mead publikálták 1965-ben) használtuk, amely egy olyan egy-célfüggvényes, minimumkereső optimálási eljárás, amely valós vektorok n-dimenziós (n a célfüggvény változóinak száma) terét vizsgálja [2].

Az eljárás az n-dimenziós tér vizsgálatához n+1 kiindulási pontot igényel, ennek következtében a

hőcserélő esetében az öt keresett, a hőcserélő működését leíró változó (dimenzió) miatt (levegő kilépő hőmérséklet: T_{lev} , füstgáz kilépő hőmérséklet: T_{fsg} , levegő oldali nyomásesés: Δp_{lev} , füstgáz oldali nyomásesés: Δp_{fsg} , a hőcserélő anyagköltsége, amely a tömeggel jellemezhető: K_{kts}) az optimalítás elindításához hat kiindulási szimuláció lefuttatására volt szükség. E kiindulási hőcserélő konfigurációkat és eredményeiket a célfüggvény adott konstrukcióra vonatkozó értékével a következő táblázat tartalmazza.

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------------------|-------|-------|------|------|-------|------|
| D [mm] | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 | 300 |
| H [mm] | 200 | 200 | 200 | 110 | 300 | 200 |
| d [mm] | 50 | 70 | 40 | 50 | 50 | 50 |
| N [db] | 12 | 5 | 20 | 12 | 12 | 12 |
| Elrend. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| T_{lev} [°C] | 63,5 | 46,3 | 81 | 49,9 | 74,8 | 61,4 |
| T_{fsg} [°C] | 249,5 | 264,3 | 235 | 260 | 242,5 | 249 |
| Δp_{lev} [Pa] | 0,94 | 0,44 | 0,99 | 1,18 | 3,1 | 0,88 |
| Δp_{fsg} [Pa] | 3,28 | 2,7 | 2,99 | 2,64 | 4 | 2,91 |
| K_{kts} [kg] | 3,7 | 2,5 | 4,72 | 2,37 | 5,24 | 3,73 |
| Célfgv | 1,979 | 2,868 | 1,46 | 2,62 | 1,644 | 2,04 |

1. Táblázat Hőcserélő betét méretek és kiindulási adatok

7. AZ OPTIMÁLÁS EREDMÉNYE

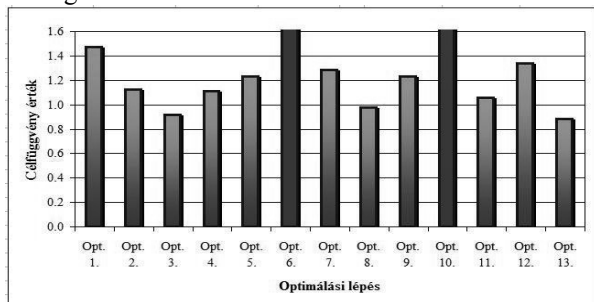
A Downhill-Simplex módszer előnye mellett, hogy kevés számú alapadatot igényel kiindulásként az, hogy meglehetősen határozottan tör az optimum felé. Ebből az következik, hogy a feladat megoldása során kevés iterációs lépés végrehajtására volt szükség. Ez a tulajdonság kiemelt fontosságú, hiszen minden egyes iteráció az optimáló eljárással egy numerikus áramlástani szimuláció végrehajtását (peremfeltételek megadása, háló építés és több száz iterációs lépés lefuttatása a CFD szoftverben a konvergencia megoldásig) jelentette. A 4. ábra az egymást követő optimalizációs lépések eredményeit mutatja be a célfüggvény értékek segítségével.

Az ábrából látható, hogy ebben az optimalizációs eljárásban 13 lépést hajtottunk végre. A célfüggvény grafikon értékei hullámzóak, bizonyos lépéseknél csökkennek, majd növekednek.

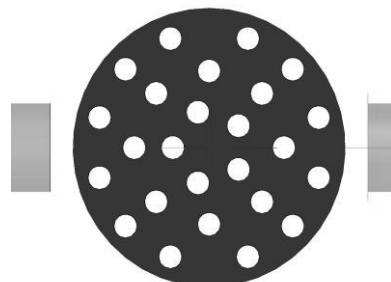
Ennek okai, hogy az optimalizást megvalósító algoritmus nagyon szigorú konvergencia kritériumokkal rendelkezett, tehát alapvetően mi, mint a szoftver felhasználói döntöttük el, hogy melyik lépésnél fejezzük be az eljárást. A 13 lépés alatt a célfüggvény értéke összesen három alkalommal közelítette meg a 13. lépés

végén elért minimumot, amelynek célfüggvény értéke 0.886.

A célfüggvény értékének emelkedései majd csökkenései az „amőba” algoritmus útját jelölik az ötdimenziós térben. Előfordult, hogy egyes változatokban az előzőhöz képest jelentősen megnövelte a hőcserélőben lévő csövek hosszát, amely ugyan alacsonyabb füstgáz kilépő hőmérséklethez vezetett, de mind a füstgáz, mind a levegő oldali nyomásvesztéség annyira megnőtt, hogy végül a célfüggvény értéke nagyobb lett, mint az azt megelőző lépésben. Az 5. ábra a legalacsonyabb célfüggvény értékű hőcserélő betét (13. optimalizációs lépés) cső elrendezését mutatja be, amely elrendezéshez $H=492$ mm-es csőhossz tartozik. A betétre jobb oldalról érkezik a 0 °C hőmérsékletű égési levegő.



4. ábra Optimalizációs lépések célfüggvény eredményei



5. ábra A 13. optimalizációs lépésként kiszámított változat cső elrendezése

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás kezdetben az OTKA 75689 program támogatásával készült, majd a TÁMOP-4.2.1.B-10/2KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap finanszírozásával folytatódott.

9. IRODALOM

- [1] EN 13240:2005 Szilárd tüzelőanyag fűtési háztartási tűzhelyek; Európai Szabvány
- [2] Thomas Weise: Global Optimization Algorithms – Theory and Application; 95., 283. oldal, 2009.06.26

CSŐSZELVÉNYŰ RÁCSOS TARTÓ TÉRFOGAT- ÉS KÖLTSÉG MINIMÁLÁSA ELMOZDULÁS-KORLÁT ESETÉN

VOLUME AND COST MINIMIZATION OF A TUBULAR TRUSS WITH DISPLACEMENT CONSTRAINT

Dr. Farkas József, Dr. Jármai Károly***

ABSTRACT

The minimum volume and cost of a simply supported planar truss with N-type bracing is optimized. The lower chord of the truss is horizontal, but the symmetric upper chord parts are non-parallel and their inclination angle as well as the cross-sectional area of CHS (circular hollow section) rods are optimized. For the calculation of required cross-sectional area of compression struts closed formulae are used as a good approximation of Eurocode 3 buckling curve. A special method is developed for the minimum volume design considering the deflection constraint. In the case of a strong displacement constraint the cross-sectional areas required for the allowed deflection are larger than those required for stress and buckling constraints. The cost function includes the cost of material, cutting and grinding of CHS strut ends, assembly, welding and painting. Special mathematical methods are used to find the optima in the case of a numerical problem.

1. BEVEZETÉS

Rácsos tartókat alkalmazunk számos teherhordó szerkezetnél, mint például tetőknél, hidaknál, tengeri fűrotornyoknál, tornyoknál, stb. A jelen tanulmány célja az, hogy megmutassa az optimális méretezés menetét erős elmozdulási feltétel esetén. Feszültség-korlátozási feltételek esetén a húzott rudak folyáshatárra, nyomott rudak pedig kihajlásra méretezendők. Abban az esetben, ha szigorú az elmozdulási feltétel, akkor a szükséges keresztmetszet-terület nagyobb, mint ami szükséges feszültség-korlátozási feltétel esetén.

Az optimális tervezési folyamat során a rácsos tartóelemek keresztmetszet-területeit, valamint a rácsos tartó geometriai jellemzőit tekintjük változónak, melyek minimálisra csökkentik a célfüggvény értékét és megfelelnek a tervezési és gyártási feltételeknek. Célfüggvény a szerkezet térfogata (súly), vagy költsége lehet, a méretezési feltételek pedig a feszültségi, az elmozdulási, valamint a gyártást könnyebbé tevő feltételek (hegesztés). Arra az esetre, ha aktív az elmozdulás feltétel, egy speciális számítás került kifejlesztésre a szükséges keresztmetszet-területek és a rácsos tartó geometriája meghatározására.

* professzor emeritusz, DSc, Miskolci Egyetem, GEIK, ALT

** egyetemi tanár, DSc, Miskolci Egyetem, GEIK, ALT

Esetünkben a felső öv szöge (ismeretlenek h_9 és h_{13} 1. ábra) optimált. Egy másik probléma a rudak csoportosítása azonos keresztmetszet-terület szerint. A rudak tervezése különböző keresztmetszet-területre a gyártásnál nehézségeket okoz, de a teljesen azonos keresztmetszet-terület gazdaságtalan lenne. Így a gazdaságosság attól függ, hány rúd-csoportot választunk. A mi esetünkben négy csoport használata tűnik jónak.

A szerkezet térfogatának, vagy költségének minimálásához a rudak keresztmetszet-területeinek minimálására van szükség. A keresztmetszet-terület nyomott rúdnál nem lehet közvetlenül kiszámítani az Eurocode 3 kihajlási képleteiből. Ezért a Japán Útfelügyelet közelítő előírását használjuk. A feszültségi és a kihajlási feltételek számításánál biztonsági tényezővel megnövelt erőkkel számolunk, míg a lehajlás számításánál az erő biztonsági tényező nélküli. Azért, hogy összehasonlítható optimumokat kapjunk, a szükséges keresztmetszet-területet nem kerekítjük a járatos szelvényre és a leggazdaságosabb $\delta = D/t = 50$ karcsúsági (átmérő/vastagság) arányt használjuk a CHS körcső-szelvényeknél.

Korlátozást kell figyelembe venni a CHS rúdelemek közötti szögre (minimum 30°), mint gyártási feltételt. Egy másik gyártási feltétel, hogy az övrudak átmérője legyen nagyobb, mint az oszlop- és rácsrudak átmérője. Az önsúly hatását ez az összehasonlító tanulmány elhanyagolja.

2. A SZAKTERÜLET IRODALOMKUTATÁSA

Annak érdekében, hogy bemutassuk a szakirodalomban a rácsos tartók optimális méretezését, néhány cikket az 1. táblázat foglal össze.

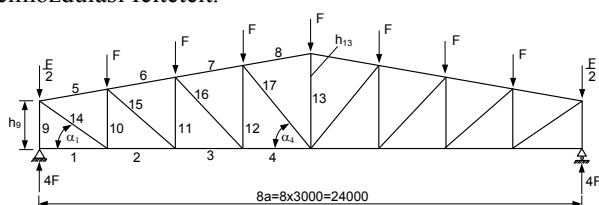
Megjegyzések: (1) A rácsos tartók nyomott elemeit kihajlásra kell méretezni. Az Euler-formula használata nem ad biztonságos tervezést, mivel nem veszi figyelembe a kezdeti alakpontatlanságot és a maradó feszültség hatását. Ezért a kihajlási képletként vagy az Eurocode 3 vagy más korszerű tervezési előírás képleteit kell alkalmazni. (2) A vizsgált keresztmetszet típusát meg kell adni, mivel igazoltuk [11], hogy a keresztmetszeti alak az optimumot jelentősen befolyásolja.

1. táblázat. Irodalmi áttekintés rácsos tartók optimalásáról. Rövidítések: AISC American Institute of Steel Construction, CHS körcső-szelvény, AASHTO American Assoc. of State and Highway Transportation Officials, EC3 Eurocode 3 [1], W – Amerikai hengerelt I-szelvény, PSO particle swarm optimizer, ACO ant colony strategy, HS harmony search, MINLP mixed-integer nonlinear programming, alum – aluminium

| Szerző(k) | Példák | Matematikai módszer | Anyag | Kihajlás számítás | Kereszt-metszet | Feltétel |
|----------------|---|-------------------------|-------------|-------------------|-----------------|---|
| Gil [2] | nem párhuzamos övek | konjugált gradiens | acél | EC3 | | feszültségi és geometriai |
| Tong [3] | 10-, 25-rudas | kombinatorikus | alum. | | | feszültségi és frekvencia |
| Makris [4] | 3-,10-,25-,60-és 132-rudas | nyúlási energia sűrűség | alum. | Nincs kihajlás | | alakváltozás |
| Hasancebi [5] | 224-rúd 3D gúla, kéttámaszú | szimulált hűtés | acél | AISC | CHS, W-szelvény | elrendezés--optimalás |
| Kripakaran [6] | 10-,18-,21-rudas | új algoritmus | acél, alum. | AASHTO, Euler | CHS | minimális költség |
| Lamberti [7] | 18-rudas konzolos, 25-rudas 3D, 45-,72-és 200-rudas | szimulált hűtés | acél, alum. | Euler | | feszültség, csomóponti elmozdulás |
| Silih [8] | nem párhuzamos övek | MINLP | acél | EC3 | CHS | minimális tömeg, vagy költség |
| Kaveh [9] | 10-,25-,120-200-, és 244-rudas távvezeték oszlop | PSO, ACO,HS | acél, alum. | AISC | | feszültség, csomóponti elmozdulás |
| Jármai [10] | Szabadon felfekvő, párhuzamos övű, 5, 8 osztásos | Leap-frog, dynamic-Q | acél | EC3 | CHS | optimális magasság, erőhatás, min. térfogat |

3. MINIMÁLIS TÉRFOGATÚ RÁCSOS TARTÓ OPTIMÁLIS MÉRETEZÉSE NEM PÁRHUZAMOS ÖVEKKEL

Viszonylag egyszerű képletekkel határozható meg a rácsos tartó minimális térfogata, mely kielégíti az elmozdulási feltételt.



1. ábra. Kéttámaszú nem párhuzamos övű rácsos tartó

A rácsos tartó rúdjai n azonos keresztmetszet-területű (A_i) csoportra vannak osztva, így

$$A_i = \mu_i A, \quad i = 1 \dots n, \quad (1)$$

ahol a μ_i szorzók, és az elmozdulási feltétel

$$w = \frac{1}{EA} \sum_i \frac{S_i s_i L_i}{\mu_i} \leq w_0, \quad (2)$$

ahol E a rugalmassági modulus, S_i a rúderő, s_i a rúderő az egységnyi, a rácsos tartó közepén ható külső erő esetén, L_i a rúd hossza, w_0 a megengedett lehajlás.

A (2) képletből kapjuk

$$A \geq \frac{1}{E w_0} \sum_i \frac{S_i s_i L_i}{\mu_i}. \quad (3)$$

A szerkezet térfogata

$$V = \sum_i A_i L_i = \frac{1}{E w_0} \sum_i \mu_i L_i \sum_i \frac{S_i s_i L_i}{\mu_i} = \frac{v_1 v_2}{E w_0} \quad (4)$$

ahol v_i paraméterek

$$v_1 = \sum_i \mu_i L_i, \quad v_2 = \sum_i \frac{S_i s_i L_i}{\mu_i}. \quad (5)$$

A minimális térfogatra való tervezésnél a rácsos tartó geometriáját keressük, amely

$$V_1 = v_1 v_2. \quad (6)$$

Abban az esetben, ha az 1. ábrán látható rácsos tartó feszítávja állandó, akkor a nem párhuzamos felső övet a változó magasságok, h_9 és h_{13} határozzák meg. A rácsos tartóra függőleges statikus F erők hatnak a felső csomópontokban. Az elmozdulás az alsó övrúd közepén lévő csomópontra van előírva. Feltételezzük, hogy a rácsos tartó csomópontjai meg vannak fogva a keresztirányú alakváltozás szempontjából. Az optimált változók a magasság h_9 és h_{13} , valamint a rudak keresztmetszet-területei (A és μ_i).

A számítások azt mutatják, hogy ha szigorú az elmozdulás-korlátozás, akkor a szükséges rúd keresztmetszet-területek olyan nagyok, hogy a húzásnál a feszültségi, a nyomásnál pedig a kihajlási feltételek teljesülnek. Ennek ellenére ezeket a méretezési feltételeket ellenőrizni kell.

A csőszerkezet hegesztett csomópontjainak gyárthatósága érdekében az övrúd és a rácsrúd közötti minimális szöget 30^0 -ra vesszük (1. ábra)

$$\tan \alpha_1 = \frac{h_9}{a} \geq \tan 30^0 \quad (7)$$

ahol a az osztástávolság, ahonnan

$$h_9 \geq a \tan 30^0 = 1732 \text{ mm}, \quad (8)$$

$$\text{és } \tan \alpha_4 \leq 60^0 = \frac{\pi}{3}. \quad (9)$$

A mi esetünkben ezek a korlátok mindig aktívak.

A rúderők és hosszúságuk (S_i , s_i , L_i) a h_9 függvényében vannak kifejezve és a dőlésszög a felső övhöz képest α .

$$\tan \alpha = \frac{h_{13} - h_9}{4a}, \cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{(\tan \alpha)^2 + 1}}, \sin \alpha = \sqrt{1 - (\cos \alpha)^2} \quad (10)$$

2. táblázat Az alsó övrudak jellemzői

| i | S_i | s_i | L_i |
|-----|----------------|---------------|-------|
| 1 | 0 | 0 | A |
| 2 | $3.5Fa/h_{10}$ | $0.5a/h_{10}$ | A |
| 3 | $6Fa/h_{11}$ | a/h_{11} | A |
| 4 | $7.5Fa/h_{12}$ | $1.5a/h_{12}$ | A |

3. táblázat A felső övrudak jellemzői

| i | S_i | s_i | L_i |
|-----|------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| 5 | $\frac{3.5Fa}{h_{10} \cos \alpha}$ | $\frac{0.5a}{h_{10} \cos \alpha}$ | $\frac{a}{\cos \alpha}$ |
| 6 | $\frac{6Fa}{h_{11} \cos \alpha}$ | $\frac{a}{h_{11} \cos \alpha}$ | $\frac{a}{\cos \alpha}$ |
| 7 | $\frac{7.5Fa}{h_{12} \cos \alpha}$ | $\frac{1.5a}{h_{12} \cos \alpha}$ | $\frac{a}{\cos \alpha}$ |
| 8 | $\frac{8Fa}{h_{13} \cos \alpha}$ | $\frac{2a}{h_{13} \cos \alpha}$ | $\frac{a}{\cos \alpha}$ |

4. táblázat Az oszloprudak jellemzői

| i | S_i | s_i | L_i |
|-----|---------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| 9 | $4F$ | 0.5 | h_9 |
| 10 | $-3.5F + S_5 \sin \alpha$ | $-0.5 + s_5 \sin \alpha$ | $h_{10} = h_9 + a \tan \alpha$ |
| 11 | $-2.5F + S_6 \sin \alpha$ | $-0.5 + s_6 \sin \alpha$ | $h_{11} = h_9 + 2a \tan \alpha$ |
| 12 | $-1.5F + S_7 \sin \alpha$ | $-0.5 + s_7 \sin \alpha$ | $h_{12} = h_9 + 3a \tan \alpha$ |
| 13 | $-F + 2S_8 \sin \alpha$ | $2s_8 \sin \alpha$ | h_{13} |

5. táblázat A rácsrudak jellemzői

| i | S_i | s_i | L_i |
|-----|--|---|-------------------------|
| 14 | $S_3 L_{14} \cos \alpha / a$ | $s_3 L_{14} \cos \alpha / a$ | $\sqrt{h_9^2 + a^2}$ |
| 15 | $(2.5F - S_6 \sin \alpha) L_{15} / h_{10}$ | $(0.5 - s_6 \sin \alpha) L_{15} / h_{10}$ | $\sqrt{h_{10}^2 + a^2}$ |
| 16 | $(1.5F - S_7 \sin \alpha) L_{16} / h_{11}$ | $(0.5 - s_7 \sin \alpha) L_{16} / h_{11}$ | $\sqrt{h_{11}^2 + a^2}$ |
| 17 | $(0.5F - S_8 \sin \alpha) L_{17} / h_{12}$ | $(0.5 - s_8 \sin \alpha) L_{17} / h_{12}$ | $\sqrt{h_{12}^2 + a^2}$ |

A rudak négy csoportba oszthatók, melyek azonos keresztmetszetűek: alsó öv (1,2,3,4), felső öv (5,6,7,8), oszlop-rudak (9,10,11,12,13) és rácsrudak (14,15,16,17).

A gyártás könnyítése érdekében az alsó és felső övrudak azonos keresztmetszetűek ($\mu_1 = \mu_2 = 1$) és a

keresett értékek μ_3 (szorzó az oszlopokra) és μ_4 (szorzó a rácsrudakra), amelyek kisebbek mint μ_1 .

A $V_1 = v_1 v_2$ összetevőit minimálni kell a következők szerint,

$$v_1 = 8(a + L_7) + 2\mu_3 \sum_{i=9}^{12} h_i + \mu_3 h_{13} + 2\mu_4 \sum_{i=14}^{17} L_i \quad (11)$$

$$v_2 = 2a \sum_{i=2}^4 S_i s_i + 2L_7 \sum_{i=5}^8 S_i s_i + \frac{2}{\mu_3} \sum_{i=9}^{12} S_i s_i h_i + \frac{S_{13} s_{13} h_{13}}{\mu_3} + \frac{2}{\mu_4} \sum_{i=14}^{17} S_i s_i L_i \quad (12)$$

Az optimális értékek h_9 , h_{13} , μ_3 and μ_4

$$A_1 = A_2 = \frac{v_{2opt}}{E W_{adm}}, A_3 = \mu_{3opt} A_1, A_4 = \mu_{4opt} A_1 \quad (13)$$

A minimális szerkezeti térfogat

$$V_{min} = v_1 A_1. \quad (14)$$

Körcső szelvényre (CHS D átmérőjű és t vastagságú)

$$A = \pi D t = \pi D^2 / \delta, \delta = D / t \quad (15)$$

ahonnan

$$D = \sqrt{\frac{A \delta}{\pi}}, t = \frac{D}{\delta}. \quad (16)$$

A tervezésnél a δ maximális értékét kell használni, de legfeljebb 50 lehet [12]. A rendelkezésre álló CHS profilok esetén [13] δ 10-50 között változik. Annak érdekében, hogy reális optimumot kapjunk, $\delta = 50$ értéket alkalmazunk.

4. A NYOMOTT RUDAK ELLENŐRZÉSE KIHAJLÁSRA

A kihajlás ellenőrzésére a Japán Road Association (JRA) [14] közelítő képleteit alkalmazzuk az Eurocode3 (b) görbéje helyett. Ebben az esetben zárt képlettel határozhatók meg a szükséges keresztmetszeti méretek.

$$N / A \leq \chi f_y, \quad (17)$$

$$\chi = 1 \quad \text{ha } 0 \leq \bar{\lambda} \leq 0.2, \quad (18a)$$

$$\chi = 1.109 - 0.545 \bar{\lambda} \quad \text{ha } 0.2 \leq \bar{\lambda} \leq 1, \quad (18b)$$

$$\chi = \frac{1}{0.773 + \bar{\lambda}^2} \quad \text{ha } \bar{\lambda} \geq 1, \quad (18c)$$

ahol f_y a folyáshatár, N a nyomóerő, χ a kihajlási tényező. Bevezetve a következő paramétert

$$\vartheta = 100D / L \quad (19)$$

és használva a $\bar{\lambda} = c / \vartheta$ összefüggést, a zárt képlet a következő: $0.2 \vartheta \leq c \leq \vartheta$ esetén

$$\vartheta = 0.24572c \left[1 + \sqrt{1 + \frac{14.93475v}{c^2}} \right] \quad (20a)$$

és $\vartheta \leq c$ -re

$$\vartheta = \left\{ 0.3865v \left[1 + \sqrt{1 + \frac{6.69424c^2}{v}} \right] \right\}^{1/2} \quad (20b)$$

a CHS szelvényekre

$$c = \frac{100K \sqrt{8}}{\lambda_E}, v = \frac{10^4 S}{L^2} \cdot \frac{\delta}{\pi f_y}, \quad (21)$$

ahol $\delta = D/t = 50$

$$D = \frac{9L}{100} \quad (22)$$

Abban az esetben, ha nagyon hosszú merevítő rudak vannak kis nyomóerővel, akkor a rúd karcsúságának korlátozása meghatározó. A karcsúság korlátozása

$$\lambda = K_R L / r \leq \lambda_{\max}, \quad (23)$$

A szükséges inercia-sugár

$$r \geq K_R L / \lambda_{\max}. \quad (24)$$

A BS 5400 [15] szabvány szerint $\lambda_{\max} = 180$.

K_R a rudak kihajlási fél-hullámhossza, $K_R = 0.9$ oszlopok és $K_R = 0,75$ rácsrudak esetén [16].

A következő feltételt kell kielégítenie minden nyomott rúdnak

$$A_i \geq \frac{\pi D_i}{\delta} \quad (25)$$

ahol A_i az optimális keresztmetszet-terület az elmozdulási feltétel esetén és D_i a szükséges átmérő a kihajlási feltétel esetén.

5. A KÖLTSÉGFÜGGVÉNY

A költségfüggvény tartalmazza az anyagköltséget, a vágási és köszörülési költséget a CHS rudak végén, az összeszerelési, hegesztési és festési költséget.

Az anyagköltség a következő módon számítható:

$$K_M = k_M \rho V_2, \quad (26)$$

ahol az átlagos fajlagos anyagköltség $k_M = 1,0$ \$/kg értékű, $\rho = 7.85 \times 10^{-6}$ kg/mm³ acélsűrűség. V_2 a tényleges szerkezeti térfogat (lásd (35) képlet).

A vágási és köszörülési költségeket a CHS rúdelem végén Glijnis [17] javaslata szerint lehet kiszámítani.

$$K_{CG} (\$) = k_F \Theta_{CG} \frac{2.5\pi D}{(350 - 2t) 0.3 \sin \alpha} \quad (27)$$

ahol $k_F = 1,0$ \$/perc a specifikus gyártási költség, $\Theta_{CG} = 3$ tényező, ami a munka összetettségét fejezi ki, 350 mm/perc a vágási sebesség, 0,3 a hatékonyság tényező, D átmérőjű és t vastagságú szelvényeknél mm-ben, α a dőlésszög a rácsrúd és az övrúd között.

A mi esetünkben az oszlop-rudaknál

$$K_{CG} = \Theta_{CG} 2.5\pi 9D_3 \frac{1 + \frac{1}{\cos \alpha}}{(350 - 2t_3) 0.3}. \quad (28)$$

A rácsrudak az alsó övrudak végeinél

$$K_{CG1} = \Theta_{CG} 2.5\pi 2D_4 \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{\cos \alpha_i}}{(350 - 2t_4) 0.3}, \quad (29)$$

ahol

$$\tan \alpha_1 = h_3 / a, \quad \tan \alpha_2 = h_{10} / a, \quad \tan \alpha_3 = h_{11} / a, \quad \tan \alpha_4 = h_{12} / a \quad (30)$$

A rácsrudak a felső övrudak végén

$$K_{CG2} = \Theta_{CG} 2.5\pi 2D_4 \frac{\sum_{i=1}^4 \frac{1}{\cos \beta_i}}{(350 - 2t_4) 0.3}, \quad (31)$$

ahol $\beta_i = 90^\circ - \alpha - \alpha_i$, $i=1,2,3,4$. (32)

Az általános képlet a hegesztési költségek meghatározására [17,18,19].

$$K_w = k_w \left(C_1 \Theta \sqrt{\kappa \rho V} + 1.3 \sum_i C_{wi} a_{wi}^n C_{pi} L_{wi} \right) \quad (33)$$

ahol k_w [\$/min] a hegesztési költségtényező, C_1 a szerelési tényező, általában $C_1 = 1$ min/kg^{0.5}, Θ az összeszerelés bonyolultsági tényezője. Az első tag adja meg az összeszerelés idejét, κ az összeszerelendő szerkezeti részek száma, ρV az összeszerelt szerkezet tömege. A második tag a hegesztési idő, C_w és n állandók jellemzik az adott hegesztési technológiát és a hegesztett kötés típusát.

C_{pi} a hegesztési helyzet tényezője (vízszintes 1, függőleges 2, fejfeletti 3), L_w a varrat hossza, az 1,3-as szorzó figyelembe veszi a járulékos hegesztési időket (salakolás, sorjázás, elektróda csere, stb.)

Esetünkben $k_w = 1,0$ \$/perc, $\Theta = 3$. Az összeszerelés és hegesztés költségei SMAW eljárás segítségével (bevont elektródás ívhegesztés) sarokvarratokra oszlop-rudaknál

$$K_w = k_w \left[\Theta \sqrt{21 \rho V_2} + 1.3 \times 0.7889 \times 10^{-3} \times 9 \pi D_3 \left(1 + \frac{1}{\cos \alpha} \right) t_3^2 \right] \quad (34)$$

$$V_2 = 8aA_1 + 8L_7 A_2 + 2A_3 \sum_{i=9}^{12} h_i + A_3 h_{13} + 2A_4 \sum_{i=14}^{17} L_i. \quad (35)$$

A rácsrudak hegesztése az alsó öv végénél

$$K_{w1} = 1.3 \times 0.7889 \times 10^{-3} \times 2 \pi D_4 t_4^2 \sum_{i=1}^4 \frac{1}{\cos \alpha_i}. \quad (36)$$

A rácsrudak hegesztése a felső öv végénél

$$K_{w1} = 1.3 \times 0.7889 \times 10^{-3} \times 2 \pi D_4 t_4^2 \sum_{i=1}^4 \frac{1}{\cos \beta_i}. \quad (37)$$

A festési költség

$$K_p = k_p S_p, \quad k_p = 28.8 \times 10^{-6} \text{ $/mm}^2. \quad (38)$$

A befestendő felület

$$S_p = 8a\pi D_1 + 8L_7 \pi D_2 + 2\pi D_3 \sum_{i=9}^{12} h_i + \pi D_3 h_{13} + 2\pi D_4 \sum_{i=14}^{17} L_i. \quad (39)$$

Az összköltség

$$K = K_M + K_{CG} + K_{CG1} + K_{CG2} + K_w + K_{w1} + K_{w2} + K_p \quad (40)$$

6. SZÁMPÉLDA

Az alakváltozás számításához szükséges erő (biztonsági tényező nélkül) $F = 120000$ N, a feszültség és a kihajlás számításához $F_0 = 1.5F = 180000$ N (biztonsági tényező 1.5). Az acél folyáshatára $f_y = 355$ MPa, rugalmassági modulusz $E = 2.1 \times 10^5$ MPa, feszítáv $L = 24$ m, megengedett lehajlás a tartó közepén $w_0 = 32$ mm = $L/750$.

7. AZ OPTIMÁLÁS FOLYAMATA

Keressük h_9 , h_{13} , μ_3 és μ_4 optimális értékeit V_{\min} vagy K_{\min} -hez, amelyek teljesítik a következő feltételeket: lehajlási, minimális szög α_i (8 képlet), maximális szög

α_4 (9 képlet), valamint a feszültségi és a kihajlási feltételeket.

A változók mérettartománya a következő: $1732 < h_9 < 5000$ mm, $4000 < h_{13} < 8000$ mm és $h_9 < h_{13}$, $0.5 < \mu_3 < 1$, $0.5 < \mu_4 < 1$.

Minimális térfogatra való méretezés esetén a (13) és (14) képletek adják meg az eredményt és (25) képletnek teljesülnie kell. Minimális költségű tervezés esetén a (40) képletet kell minimálnunk, melyhez szükségesek a (11), (12), (13), (16) és a (35) képletek.

8. AZ OPTIMÁLÁS EREDMÉNYEI

A gyártási feltételek (7 és 8 képlet) meghatározzák a két ismeretlen h_9 és h_{13} optimális értékét a következő módon: egy adott h_9 értéke esetén ha h_{13} értéke kisebb, mint h_{13opt} az nagyobb v_1v_2 értékeket ad, ha nagyobb, akkor nem teljesíti a gyártási feltételt (8 képlet). A 6. táblázat mutatja a maximális h_{13} értékét a h_9 függvényében.

6. táblázat. A maximális h_{13} értékei a h_9 függvényében. Értékek mm-ben

| h_9 | 1750 | 1850 | 1950 | 2000 | 2100 | 2200 | 2300 |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|
| h_{13opt} | 6340 | 6310 | 6280 | 6260 | 6220 | 6190 | 6160 |

Ezenkívül a számítások azt mutatják, hogy a legjobb érték μ_3 -ra és μ_4 -re a 0,6, mivel a 0,5 érték olyan keresztmetszeteket ad, amelyek nem teljesítik a kihajlási feltételt. Így a fennmaradó ismeretlen h_9 optimálható a Mathcad program segítségével. A 7. táblázat a térfogat és a költség értékeit adja meg a h_9 függvényében. Az optimális h_9 minimálja v_1v_2 -t (teljesíti a lehajlás korlátozást), valamint a V és K értékét.

7. táblázat. Térfogat és költség h_9 függvényében. h mm-ben. Az optimum félkövér betűkkel van jelölve.

| h_9 | h_{13} | $v_1v_2 \times 10^{-15}$ | $V \times 10^{-8} \text{ mm}^3$ | K \$ |
|-------------|-------------|--------------------------|---------------------------------|-------------|
| 1750 | 6390 | 2.331 | 3.469 | 7854 |
| 1850 | 6310 | 2.324 | 3.459 | 7830 |
| 1950 | 6280 | 2.321 | 3.454 | 7825 |
| 2000 | 6260 | 2.322 | 3.456 | 7829 |
| 2100 | 6220 | 2.327 | 3.463 | 7843 |

A 7. táblázat azt mutatja, hogy a következő optimum adódik: $\mu_3 = \mu_4 = 0,6$, $h_{9opt} = 1950$ mm, $h_{13opt} = 6280$ mm, $v_1v_{2min} = 2.321 \times 10^{-15}$, $V_{min} = 3.454 \times 10^8 \text{ mm}^3$, $K_{min} = 7825$ \$, $A_1 = A_2 = 3708$, $A_3 = A_4 = 2225 \text{ mm}^2$. A 7. táblázat azt mutatja, hogy az érzékenysége V -nek és K -nak kicsi.

A következő keresztmetszeti területek szükségesek a feszültségi és a kihajlási feltételek miatt: $A_1 = A_2 = 2195$, $A_3 = 2084$, $A_4 = 2094 \text{ mm}^2$. Ha az elmozdulási feltétel szigorú, akkor a keresztmetszeti területek nagyobbak, mint ami szükséges feszültségi és kihajlási feltétel esetén.

Ezen túlmenően a számítást elvégeztük $\mu_3 = 0,7$ és $\mu_4 = 0,5$ értékekre is.

Eredmények: $h_9 = 1950$ mm: $A_1 = A_2 = 3728$, $A_3 = 2610$, $A_4 = 1864 \text{ mm}^2$. $V = 3.462 \times 10^8 \text{ mm}^3$, $K = 7818$ \$.

Mivel $A_4 = 2094 \text{ mm}^2$ szükséges a kihajlás miatt, μ_4 értéke $\mu_4 = 0,5$ túl kicsi és $\mu_4 = 0,6$ -ot kell használni.

8. táblázat. Számítási eredmények $\mu_3 = 0,7$ és $\mu_4 = 0,5$ esetén. Az optimális méretek félkövér betűkkel jelöltek.

| h_9 | h_{13} | $v_1v_2 \times 10^{-15}$ |
|-------------|-------------|--------------------------|
| 1850 | 6310 | 2.329 |
| 1950 | 6280 | 2.326 |
| 2000 | 6260 | 2.328 |

Összehasonlításképpen az optimális méretek párhuzamos övek esetén: $h_{9opt} = h_{13opt} = 5000$ mm, $V_{min} = 5.852 \times 10^8 \text{ mm}^3$. $K_{min} = 11350$ \$. Látható, hogy a rácsos tartó nem párhuzamos övekkel sokkal gazdaságosabb, mint párhuzamos övekkel.

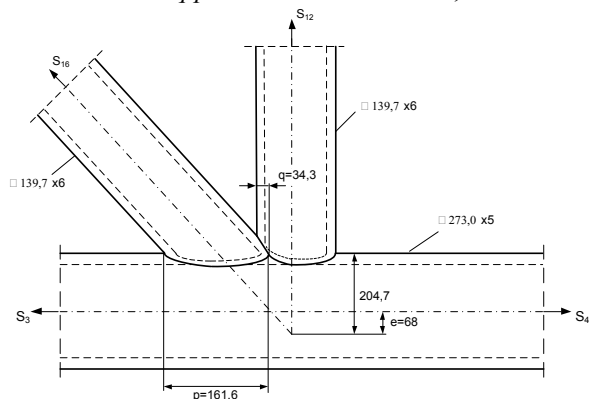
9. A RÁCSOS TARTÓ CSOMÓPONTJÁNAK ELLENŐRZÉSE

Az optimalás után az optimális keresztmetszeteket módosítani kell a gyártott profilok (EN 10291-2 [20]) szerint és a csomópontok szilárdságát ellenőrizni kell az új IIW előírások [21] szerint. Ennek illusztrálására a rácsos tartó optimált csomópontja a 2. ábrán látható.

A kapcsolat rüderői a következők: $S_3 = 787,4$ kN (húzás), $S_{12} = 11,1$ kN (húzás), $S_{15} = 233,4$ kN (húzás), melyek meghatározók a rácsrudakra, a 16 rúdra, amelynek $S_{16} = 13820$ N (nyomás).

A rendelkezésre álló CHS profilok az optimált szerkezetenél a következők: övrudak: $\varnothing 273.0 \times 5$ mm, oszlop-rudak és rácsrudak: $\varnothing 139.7 \times 6$ mm.

2. ábrának megfelelően a csomópont átlapoló K-kötés, az excentricitása $e = 0.25 \times 273 = 68$ mm, az átlapolás mértéke $O_v = 100q/p = 100 \times 34.3 / 161.6 = 21,2\%$.



2. ábra Átlapoló rácsos tartó csomópontja

(a) Az átlapoló rácsrúd ellenőrzése feszültségre

$$N^* = f_y t_i L_{b,eff}, \quad L_{b,eff} = \frac{\pi}{4} (2d_i + d_{ei} + d_{e.ov} - 4t_i),$$

$$d_{ei} = \frac{12}{d_0 / t_0} \frac{t_0}{t_i} d_i \leq d_i, \quad d_{e.ov} = \frac{12}{d_j / t_j} \frac{t_j}{t_i} d_i \leq d_i$$

Indexek: az átlapoló rácsrúd i , az átlapoló rúd j .

A mi esetünkben:

$$d_0 = 273, d_i = d_j = 139.7, t_i = t_j = 6, t_0 = 5$$

$$d_{ei} = 25.6, d_{eov} = 72, L_{b,eff} = 277.2.$$

$$N^* = 355 \times 6 \times 277.2 = 5900533 > 233400 \text{ N, megfelel.}$$

(b) Az övrúdelem ellenőrzése feszültségre

$$\left(\frac{N_0}{N_{pl,0}} \right)^{1.7} \leq 1, N_{pl,0} \geq N_0, N_{pl,0} = A f_y,$$

$$N_{pl,0} = 3781 \times 355 = 1342255 > 787400 \text{ N, megfelel.}$$

(c) A rácsrúd ellenőrzése nyírásra

$$N_i \cos \theta_i + N_j \cos \theta_j \leq N_s^*$$

$$N_s^* = \frac{\pi}{4} \left(0.58 f_{ui} \frac{100 - O_v}{100} \frac{2d_i + d_{ei}}{\sin \theta_i} t_i + 0.58 f_{ui} \frac{2d_j + d_{ej}}{\sin \theta_j} t_j \right)$$

Esetünkben

$$O_v = 21.2, f_{ui} = 510, d_{ei} = d_{ej} = 25.6, d_i = d_j = 139.7, t_i = t_j = 6,$$

$$S_{15} \cos \theta_j = 116700 < N_s^* = 833513 \text{ N, megfelel.}$$

10. ÖSSZEFOGLALÁS

Az optimálási probléma a következő: megtalálni az optimális geometriát és a rudak keresztmetszeti területeit, amelyek minimálják a szerkezet térfogatát vagy költségét egy kéttámaszú rácsos csőszerkezet, nem-párhuzamos övek és szigorú lehajlási feltétel esetén.

Speciális számítási módszer szolgál a probléma megoldására. Az elmozdulási feltétel mellett a rudak ellenőrizve vannak feszültség és kihajlás szempontjából. Az eredmények azt mutatják, hogy abban az esetben, ha szigorú elmozdulás feltétel van, a keresztmetszeti területek nagyobbak, mint amik feszültség és kihajlás esetén szükségesek.

A gyártási (hegesztési) feltételek, melyek minimálják a rudak közötti szöveget (30°), szintén aktívak. A kihajlás számítását az Eurocode 3 képleteit közelítő Japán Road Association képleteivel végezzük, amely lehetővé teszi a szükséges keresztmetszeti terület explicit kifejezését.

Speciális képletek szükségesek a költségek kiszámításához. A célfüggvény tartalmazza az anyag, a vágás és köszörülés költségeit a csőelemeknél (CHS), az összeszerelés, a hegesztés és a festés költségét. Az eredmények azt mutatják, hogy ebben az esetben a szerkezet térfogat és költség minimuma azonos.

Ellenőriztük a csomópont szilárdságát, ami mutatja, hogy az öv- és rácsrudaknál a rendelkezésre álló CHS profilok megfelelnek a követelményeknek.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás az OTKA 75689 program támogatásával készült. A kutatás a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

IRODALOM

- [1] EN 1993-1-1: (2005) Eurocode 3: *Design of steel structures*. Part 1.1. General rules and rules for buildings. European Committee for Standardization (CEN).
- [2] Gil L., Andreu A. (2001) Shape and cross-section optimization of a truss structure. *Computers and Structures* Vol. 79, pp. 681-689.
- [3] Tong W.H., Liu G.R. (2001) An optimization procedure for truss structures with discrete variables and dynamic constraints. *Computers and Structures* Vol. 79, pp. 155-162.
- [4] Makris P.A., Provatidis Ch.G. (2002) Weight minimization of displacement-constrained truss structures using a strain energy criterion. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* Vol. 191, pp. 2159-2177.
- [5] Hasancebi O., Erbatur F. (2002) Layout optimization of trusses using simulated annealing. *Advances in Engineering Software* Vol. 33, pp. 681-696.
- [6] Kripakaran P., Gupta A., Baugh J.W.jr. (2007) A novel optimization approach for minimum cost design of trusses. *Computers and Structures*, Vol. 85, pp. 1782-1794.
- [7] Lamberti L. (2008) An efficient simulated annealing algorithm for design optimization of truss structures. *Computers and Structures* Vol. 86, pp. 1936-1953.
- [8] Šilih S., Kravanja S. (2008) Topology, shape and standard sizing optimization of trusses using MINLP optimization approach. In: *Design, Fabrication and Economy of Welded Structures*. Internat. Conf. Proc. 2008. Miskolc, Hungary. Jármai, K., Farkas, J. (eds). Chichester, Horwood Publ. pp. 143-150.
- [9] Kaveh A., Talatahari S. (2009) Particle swarm optimizer, ant colony strategy and harmony search scheme hybridized for optimization of truss structures. *Computers and Structures* Vol. 87, pp. 267-283.
- [10] Jármai K., Snyman J.A., Farkas J. (2004) Application of novel constrained optimization algorithms to the minimum volume design of planar CHS trusses with parallel chords. *Engineering Optimization*, Vol. 36, No. 4, pp. 457-471.
- [11] Farkas J., Jármai K. (1997) *Analysis and optimum design of metal structures*. Balkema, Rotterdam-Brookfield.
- [12] Wardenier J., Kurobane Y. et al. (1991) *Design guide for circular hollow section joints under predominantly static loading*. Köln, TÜV Rheinland.
- [13] EN 10210-2: (2006) *Hot finished structural hollow sections*. European Committee for Standardization (CEN).
- [14] Hasegawa A., H., Abo et al. (1985) Optimum cross-sectional shapes of steel compression members with local buckling. *Proc. JSCE Structural Engineering/ Earthquake Engineering*, Vol. 2, pp. 121-129.
- [15] BS 5400 (1983) *Steel, concrete and composite bridges*. Part 3: Code of practice for design of steel bridges. British Standard Institution, London.
- [16] Rondal J., Würker K-G. et al. (1992) *Structural stability of hollow sections*. Köln, TÜV Rheinland.
- [17] Farkas J., Jármai K. (2003) *Economic design of metal structures*. Rotterdam, Millpress.
- [18] Farkas J., Jármai K. (1997) *Analysis and optimum design of metal structures*. Balkema, Rotterdam-Brookfield.
- [19] Farkas J., Jármai K. (2008) *Design and optimization of metal structures*. Chichester, UK, Horwood Publishing.
- [20] EN 10219-2: (2006) *Cold formed circular hollow section profiles*. European Committee for Standardization (CEN).
- [21] Static design procedure for welded hollow section joints. IIW Document XV-1329-09. International Institute of Welding, 2009.

Egyirányú nyomással terhelt cellalemez tervezése költségminimumra

Minimum cost design of a cellular plate under unidirectional compression

Dr. Jármai Károly*, Dr. Farkas József**

ABSTRACT

Cellular plates consist of two cover plates and stiffeners between them. Half I-beams employed as stiffeners for fabrication purposes. The cells are very rigid, due to their high torsional rigidity. In case of unidirectional compression overall buckling constraint comes from the Huber equation. The classical critical stress should be considered with the initial imperfection and the residual stresses. The cost function consists of material and welding costs. The unknowns of optimization are the thickness of the two cover plates, the stiffener height and the number of stiffeners in both directions. Two optimization methods have been used, the PSO, Particle swarm optimization and the IOSO, response surface methods.

BEVEZETÉS

A cellaszerkezetű lemezek két fedőlemezből és a közéjük hegesztett bordarácsból állnak. Ha a két fedőlemez közti távolság (magasság) egy méternél kisebb, akkor legalább az egyik fedőlemezt meg kell szakítani, hogy kívülről is hegeszthető legyen. Az egy méternél nagyobb magasságú cellalemezeket főleg kettős hajófenekelnél lehet alkalmazni.

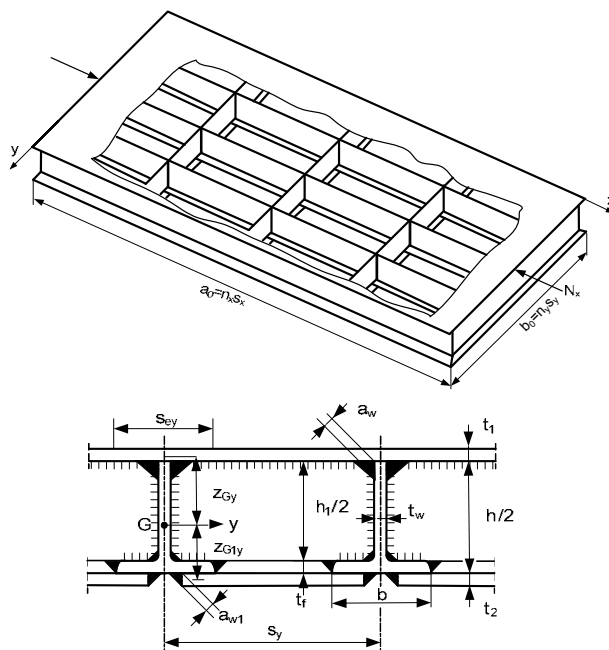
A cellalemezek a cellák nagy csavarási merevsége miatt sokkal szilárdabbak, mint az egy oldalt nyitott szelvényű bordákkal hegesztettek. Másik előnyük, hogy a varratok szimmetriája miatt kicsi a varratsugorodásból keletkező vetemedésük. Kimutatható, hogy izotrópként számíthatók, vagyis a keletkező feszültségek és alakváltozások az izotróp lemezekre ismert képletekkel határozhatók meg [1].

Előnyeik miatt sokfajta szerkezetben alkalmazhatók, például födémekben, tartálytetőkben, hidakban, gépszerkezetekben. Speciális cellalemez típus alkalmazható hajófödémekben [2]. Ezeknél bordákként négyzetes vékonyfalú csöveket használtunk, a fedőlemezeket mindkét oldalon ívpont-hegesztéssel rögzítettük.

Az egyik legjobban kivitelezhető gyártási módszert tárgyaljuk, amely szerint bordákként félbevágott hengerelt I szelvényeket alkalmazunk, melyek gerinclemezét a folytonos felső fedőlemeze hegesztjük,

az alsó fedőlemezszerkezetet pedig kívülről sarokvarratokkal erősítjük a bordák övlemezéhez (1. ábra).

Főként hegesztett szerkezetekre előnyösen alkalmazható költség-számítási módszert fejlesztettünk ki [2,3,4]. Ezzel az adott szerkezet típus gazdaságossága jól jellemezhető és a különböző szerkezet típusok gazdaságossága jól összehasonlítható. A minimálendő költségfüggvény tartalmazza az anyag-, összeállítási, és hegesztési költségeket és a gyártási sorrendnek megfelelően van megfogalmazva.



1. ábra. Két irányban bordázott cellalemez térbeli képe és keresztmetszete

A CELLALEMEZEK ALAPVETŐ KÉPLETEI

Az ortotrop lemezek $w(x,y)$ lehajlásaira vonatkozó Huber egyenlet N_x egyirányú nyomás esetére

$$B_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2H \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + B_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (1)$$

$$\text{ahol } H = B_{xy} + B_{yx} + \frac{\nu}{2}(B_x + B_y) \quad (2)$$

* egyetemi tanár, DSc. Miskolci Egyetem, GEIK, ALT

** professzor emeritus, DSc, Miskolci Egyetem, GEIK, ALT

az ortotrop lemez csavarási merevsége, $\nu = 0.3$ a Poisson szám.

A megfelelő hajlítási és csavarási merevségek

$$B_x = \frac{E_1 I_y}{a_y}; B_y = \frac{E_1 I_x}{a_x}; E_1 = \frac{E}{1-\nu^2} \quad (3)$$

$E = 2.1 \times 10^5$ MPa a rugalmassági modulus.

Cellalemezekre G nyírási modulussal

$$B_{xy} = \frac{GI_y}{a_y}; B_{yx} = \frac{GI_x}{a_x}; G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

$$H = B_{xy} + B_{yx} + \frac{\nu}{2}(B_x + B_y) = \frac{E_1}{2} \left(\frac{I_y}{a_y} + \frac{I_x}{a_x} \right)$$

Az (1) egyenlet megoldása

$$N_E = \frac{\pi^2}{b_0^2} \left[B_x \left(\frac{b_0}{a_0} \right)^2 + 2H + B_y \left(\frac{a_0}{b_0} \right)^2 \right] \quad (5)$$

A TELJES CELLALEMEZRE VONATKOZÓ KIHAJLÁSÁRA FELTÉTEL

A kihajlási feltétel

$$\frac{N_x}{n_y A_{ey}} \leq \sigma_{cr} = \frac{f_y}{\sqrt{1+\lambda^2}}, \quad \lambda = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_E}}, \sigma_E = \frac{N_E S_y}{A_{ey}} \quad (6)$$

A σ_E klasszikus kritikus feszültséget a fenti módon csökkenteni kell, mert az nem tartalmazza a kezdeti alakpontatlanság és hegesztési maradó feszültségek hatását. Ezt a csökkentési módot a Det Norske Veritas (DNV) tervezési irányelvei alkalmazzák [5]. f_y a folyási határ.

A CELLALEMEZ GEOMETRIAI JELLEMZŐI

A fedőlemezek helyi horpadását együttdolgozó lemezszélességgel vesszük figyelembe (1. ábra, s_{ey}). Az egy bordával számított hasznos keresztmetszeti területek a cellalemez mindkét (x, y) irányában

$$A_{ey} = \frac{h_1 t_w}{2} + bt_f + s_{ey1} t_1 + s_{ey2} t_2 \quad (7)$$

$$A_{ex} = \frac{h_1 t_w}{2} + bt_f + s_{ex1} t_1 + s_{ex2} t_2 \quad (8)$$

$$h_1 = h - 2t_f \quad (9)$$

$$s_y = \frac{b_0}{n_y}, s_x = \frac{a_0}{n_x} \quad (10)$$

ahol n_y és n_x az y és x irányú bordaosztások száma.

Az együttdolgozó fedőlemez-szélességeket az Eurocode 3 Part 1-5 [6] szerint számítjuk

$$s_{ey1} = \rho_{y1} s_y, s_{ey2} = \rho_{y2} s_y, s_{ex1} = \rho_{x1} s_x, s_{ex2} = \rho_{x2} s_x \quad (11)$$

ahol

$$\rho_{y1} = \frac{\lambda_{py1} - 0.22}{\lambda_{py1}^2} \quad \text{ha} \quad \lambda_{py1} = \frac{s_y}{56.8 \epsilon t_1} \geq 0.673, \quad (12a)$$

$$\rho_{y1} = 1 \quad \text{ha} \quad \lambda_{py1} < 0.673 \quad \epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (12b)$$

A többi ρ képlete hasonló.

A súlyponti tengely-távolságok

$$z_{Gy} = \frac{1}{A_{ey}} \left[\frac{h_1 t_w}{2} \left(\frac{h_1}{4} + \frac{t_1}{2} \right) + bt_f \left(\frac{h_1 + t_f + t_1}{2} \right) + s_{ey2} t_2 \left(\frac{h_1 + t_f + t_1 + t_2}{2} \right) \right] \quad (13a)$$

$$z_{Gx} = \frac{1}{A_{ex}} \left[\frac{h_1 t_w}{2} \left(\frac{h_1}{4} + \frac{t_1}{2} \right) + bt_f \left(\frac{h_1 + t_f + t_1}{2} \right) + s_{ex2} t_2 \left(\frac{h_1 + t_f + t_1 + t_2}{2} \right) \right] \quad (13b)$$

és az ezekre vonatkozó másodrendű nyomatékok

$$I_y = s_{ey1} t_1 z_{Gy}^2 + \frac{h_1^3 t_w}{96} + \frac{h_1 t_w}{2} \left(\frac{h_1}{4} + \frac{t_1}{2} - z_{Gy} \right)^2 + I_{y1}$$

$$I_{y1} = bt_f \left(\frac{h_1 + t_f + t_1}{2} - z_{Gy} \right)^2 + s_{ey2} t_2 \left(\frac{h_1 + t_f + t_1 + t_2}{2} - z_{Gy} \right)^2 \quad (14)$$

$$I_x = s_{ex1} t_1 z_{Gx}^2 + \frac{h_1^3 t_w}{96} + \frac{h_1 t_w}{2} \left(\frac{h_1}{4} + \frac{t_1}{2} - z_{Gx} \right)^2 + I_{x1}$$

$$I_{x1} = bt_f \left(\frac{h_1 + t_f + t_1}{2} - z_{Gx} \right)^2 + s_{ex2} t_2 \left(\frac{h_1 + t_f + t_1 + t_2}{2} - z_{Gx} \right)^2 \quad (15)$$

GYÁRTÁSI FELTÉTEL

A gyártási feltétel azt fejezi ki, hogy a bordák övei között minimum 300 mm távolságnak kell lennie. Ez biztosítja, hogy a bordák gerinclemezeit megfelelő hozzáféréssel lehessen a fedőlemezhez hegeszteni.

$$s_{y,x} - b \geq 300 \text{ mm} \quad (16)$$

A KÖLTSÉGFÜGGVÉNY

Az alábbiakban az anyagköltséget (K_M) és hegesztési költséget (K_W) számítjuk.

$$K_M = k_M \rho V \quad (17)$$

ahol $k_M = 1.0$ \$/kg, $\rho = 7.85 \times 10^{-6}$ kg/mm³, V a térfogat.

A hegesztési költség általános képlete [2,3,4]

$$K_w = k_w \left(C_1 \Theta \sqrt{\kappa \rho V} + 1.3 \sum_i C_{wi} a_{wi}^n C_{pi} L_{wi} \right) \quad (18)$$

ahol k_w [\$ / min] a hegesztési költségtényező, C_1 összeállítási költségtényező, egységnyinek vesszük $C_1 = 1$ min/kg^{0.5}, Θ az összeállítás bonyolultságát figyelembe vevő tényező. Az első tag az összeállítási időt számítja, κ az összeszerelendő szerkezeti elemek száma, ρV az összeszerelt egység tömege, a második tag a hegesztési időt számítja, C_w és n a varrat alakjától és a hegesztési módszertől függő állandók, C_p a hegesztési helyzetét jellemző tényező (vályúhelyzetre 1, függőlegesre 2, felettire 3).

L_w a varrathossz, az 1.3 szorzó a járulékos hegesztési időket veszi figyelembe (gyökfaragás, varrat salaktalanítás, elektród-csere).

A hegesztési költségeket a gyártási sorrendnek megfelelően fogalmazzuk meg.

(a) A felső fedőlemez hegesztése SAW tompavarratokkal (Submerged Arc Welding = fedett ívű hegesztés). A varrathossz $L_{w1} = 3(a_0 + b_0)$, a szerkezet tömeg $V_1 = a_0 b_0 t_1$, $\Theta_1 = 2$, az elemek száma $\kappa_1 = 16$. $k_w = 1.0$ \$/min.

$$\text{Ha } t_1 \geq 15 \text{ mm } C_w a_w^n = 0.1346 \times 10^{-3} t_1^2 \quad (19a)$$

$$\text{ha } t_1 < 15 \text{ mm } C_w a_w^n = 0.1033 \times 10^{-3} t_1^{1.94} \quad (19b)$$

$$K_{w1} = k_w \left(\Theta_1 \sqrt{\kappa_1 \rho V_1} + 1.3 C_w a_w^n L_{w1} \right). \quad (20)$$

(b) A hosszbordák gerinclemezeinek hegesztése a felső fedőlemezhez kettős SAW sarokvarratokkal $L_{w2} = 2a_0(n_y + 1)$, $\kappa_2 = n_y + 2$, $V_2 = V_1 + a_0(b t_f + h_1 t_w / 2)(n_y + 1)$, $a_w = 0.4 t_w$, $\Theta_2 = 3$.

$$K_{w2} = k_w \left(\Theta_2 \sqrt{\kappa_2 \rho V_2} + 1.3 \times 0.2349 \times 10^{-3} a_w^2 L_{w2} \right). \quad (22)$$

(c) A keresztirányú bordák hegesztése a felső fedőlemezhez és a hosszbordákhoz, a gerinceket kettős sarokvarratokkal (GMAW-C = CO₂-védőgáz hegesztés), az öveket tompavarratokkal.

$$V_3 = V_2 + b_0(b t_f + h_1 t_w / 2)(n_x + 1), \quad \kappa_3 = 1 + n_y(n_x + 1), \\ L_{w3} = (n_x + 1)(2b_0 + n_y(h_1 + b)) \quad (23)$$

$$K_{w3} = k_w \left(\Theta_2 \sqrt{\kappa_3 \rho V_3} + 1.3 \times 0.3394 \times 10^{-3} a_w^2 L_{w3} + 1.3 C_{wf} t_f^n L_{wf} \right) \quad (24)$$

$$\text{Ha } t_f \geq 15 \text{ mm } C_{wf} t_f^n = 0.1496 \times 10^{-3} t_f^{1.9029}, \quad (25a)$$

$$\text{ha } t_f < 15 \text{ mm } C_{wf} t_f^n = 0.1939 \times 10^{-3} t_f^2. \quad (25b)$$

$$L_{wf} = 2b n_y(n_x + 1) \quad (26)$$

(d) Az alsó fedőlemez-elemek hegesztése a bordák öveihez SAW sarokvarratokkal

$$V_4 = V_3 + a_0 b_0 t_2, \quad \kappa_4 = 1 + n_x n_y, \quad L_{w4} = 2(a_0 n_y + b_0 n_x), \quad a_{w1} = 0.7 t_2, \quad (27)$$

$$K_{w4} = k_w \left(\Theta_1 \sqrt{\kappa_4 \rho V_4} + 1.3 \times 0.2349 \times 10^{-3} a_{w1}^2 L_{w4} \right). \quad (28)$$

A teljes költség

$$K = K_M + K_{w1} + K_{w2} + K_{w3} + K_{w4}. \quad (29)$$

SZÁMADATOK, VÁLTOZÓK

$b_0 = 8$ m, $a_0 = 24$ m, $N_x = 3 \times 10^7$ [N], $f_y = 355$ MPa. Az optimalizálandó változók: $x_1 = t_1$ felső fedőlemez-vastagság, $x_2 = t_2$ alsó fedőlemez-vastagság, $x_3 = h$ az I szelvényű bordák magassága, $x_4 = n_x$ az x irányú borda-osztások száma, $x_5 = n_y$ az y irányú borda-osztások száma.

A RÉSZECSEKCSOPORT MÓDSZER

A Részecskecsoport Módszer (Particle Swarm Optimization PSO) az evolúciós módszerek egy viszonylag új osztálya, mely alkalmas lehet az

optimális megoldás x^* megkeresésére általános optimalizálási feladatnál. Az eredeti PSO algoritmus, melyet Kennedy és Eberhardt javasolt 1995-ben [7], a nagy csoportokban élő élőlények szociális viselkedésén, egymásra-hatásán alapszik. A PSO különösen csapatviselkedéseket szimulál, amelyek legjobban madárcsapat, halraj, méhraj esetén érzékelhetőek.

Ahhoz, hogy végrehajtsunk egy optimalizálást a többdimenziós térben, a PSO irány vektorokat és sebességeket ad meg minden elemnek (részecskének) a csoportban az ő konkrét pozíciójában. Minden részecske ezután „mozog”, vagy „repül” a vizsgálati térben a részecske megadott sebességével, melyet módosíthat irányában és nagyságában a többi részecske a környezetében. Ezek a helyi hatások a szomszédos részecskéknél terjednek aztán végig a teljes csoporton és ezáltal kerül a csoport kedvezőbb helyzetbe, közelebb a probléma megoldásához. A határok, melyeken belül a részecskék hatni tudnak a többire az a „fitness”, a megfelelés mértéke, mely azt mutatja, hogy az adott részecske mennyire jó, a többi részecske „jóságához” képest. Az evolúciós elv „survival of the fittest” (természetes kiválasztódás) játszik szerepet csakúgy, mint a részecskék szociális viselkedése a „kövesd a helyi vezetőt” hatása, a kiemelkedő minta hatása.

Továbbá az egyes egyedek tanulnak másoktól, különösen a legjobbtól közülük. Minden egyed a csoportban egy elem a többdimenziós térben a pozíciójával és a sebességével. Ezen egyedek repülnek a hipertérben és emlékeznek a korábbi legjobb pozíciójukra. A rajban lévő egyedek kommunikálnak egymás között és igazítják a pozíciójukat és sebességüket a jobb pozíciókhoz.

Új sebességek és részecske pozíciók meghatározása:

Minden $i=1,2,\dots,M$:

$$\mathbf{v}_i^{k+1} := \mathbf{v}_i^k + c_1 r_1 (\mathbf{p}_i^b - \mathbf{x}_i^k) + c_2 r_2 (\mathbf{g}^b - \mathbf{x}_i^k) \quad (30)$$

$$\mathbf{x}_i^{k+1} := \mathbf{x}_i^k + \mathbf{v}_i^{k+1} \quad (31)$$

ahol r_1 és r_2 egymástól függetlenül generált véletlen számok az $[0,1]$ intervallumon, és c_1 , c_2 megfelelően választott paraméterek. $F_i^b = F(\mathbf{x}_i^k)$ és $\mathbf{p}_i^b = \mathbf{x}_i^k$ {a legjobb pont az i pályagörbén}

$F(\mathbf{x}_i^k) \leq F^g$ akkor legyen $F^g = F(\mathbf{x}_i^k)$ és $\mathbf{g}^b = \mathbf{x}_i^k$ {legjobb globális pont}

A módszer nem igényel deriváltakat és képes a célfüggvény globális optimumát meghatározni. A méretezési feltételek a büntetőfüggvények módszerével kezelhetők. Egy operátor, az „őrült madár” újra bevezetésre került a dinamikusan változó maximális sebességek és inercia bevezetése mellett [8].

A folytonos optimalizálási módszert alkalmazva adaptív módon, a tervezési változók diszkrét jellegét figyelembe véve kapjuk meg a szerkezet optimális méreteit.

PSO alkalmazásra került számos szerkezetoptimalizációs feladatnál, mint például két-irányban bordázott merevített lemezek költségoptimalizációja, merevített héjak optimalizációja, szélturbina torony optimalizációja, bordázott héjak optimalizációja, tűzvédelmi számításokra.

AZ IOSO TECHNOLÓGIA FŐBB JELLEMZŐI

Az IOSO eljárás a válaszfelszín-technológián alapul. Ezért különbözik stratégiája jelentősen az optimalizációs jól ismert más megközelítéseitől. Nagyon hatékony és az alap algoritmus széles alkalmazhatóságú. Fő előnye, hogy az IOSO Technology nagyon összetett optimalizációs feladatokat is képes megoldani [9].

Az IOSO módszer válaszfelszín-módszerek és evolúciós szimulációs elvek alapján egy feltételes optimalizációs algoritmus. IOSO mindegyik iterációja két lépésből áll. Az első lépés a célfüggvény közelítésének a létrehozása. Mindegyik iteráció ebben a lépésben a kezdeti közelítés dekompozícióját jelenti egy egyszerű közelítésfüggvény rendszerbe. A végső válaszfüggvény egy többszintes grafikon.

A második lépés ennek a közelítő-függvénynek az optimalizációja. Ez a közelítés számításba veszi a szerkezetönjavításait és a válaszfelszín közelítési paramétereit. Ennek a megközelítésnek a megkülönböztető jegye a rendkívül alacsony számú vizsgált pont, hogy iniciálja az algoritmust, (30-50 pont az optimalizációs problémánál a majdnem 100-zal rendelkező változószám esetén).

A kapott válaszfüggvényt használja a többszintes optimalizációs eljárásaiban a szimuláció szint adaptív változtatásával, mind az egy, mind a többszintes analízis során. Az IOSO mindegyik iteráció alatt a válaszfüggvény optimalizálását végrehajtják az aktuális keresőterületen belül [10].

Ezt a lépést követi a vizsgált pontból a matematikai modell meghívása. Az információ, ami a célfüggvény viselkedésére vonatkozik a szélsőérték közelében, tárolásra kerül és a válaszfüggvény erre a keresőterületre lesz pontosabbá.

Így mindegyik iteráció alatt a közelítő-függvények sorozatát építi be az optimalizációs feltételbe. Ezek a függvények különböznek egymástól mind a szerkezet, mind az érvényességi kör vonatkozásában. Az adott közelítő-függvények következő optimalizációja lehetővé teszi számunkra, hogy meghatározzuk az optimalizált változók egy készlet vektorát, amit arra használnak, hogy javuljon a közelítés az egyes iterációk során.

EREDMÉNYEK

Az 1. táblázat mutatja a diszkrét optimumok értékeit a PSO és az IOSO módszerek alkalmazásával. A merevítők száma x irányban relatíve kicsi. A számítások azt mutatják, hogy mindkét eljárás nagyon hatékony az optimum megkeresésében.

1. táblázat A cellalemez optimális méretei mm-ben, költsége USD-ben

| Módszer | $x_1=t_1$ | $x_2=t_2$ | $x_3=h$ | $x_4=n_x$ | $x_5=n_y$ |
|---------|-----------|-----------|--------------|-----------|-----------|
| | [mm] | [mm] | [mm] | | |
| PSO | 6 | 5 | 533.1 | 2 | 12 |
| PSO | 8 | 5 | 454.6 | 2 | 13 |
| IOSO | 11 | 4 | 454.6 | 2 | 11 |
| IOSO | 8 | 4 | 454.6 | 2 | 14 |

| Módszer | Költség [USD] | Iterációszám | Egyedek száma |
|---------|-----------------|--------------|---------------|
| PSO | 46043.97 | | 50 |
| PSO | 44849.55 | | 500 |
| IOSO | 45867.42 | 211 | |
| IOSO | 43769.13 | 522 | |

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás az OTKA 75689 program támogatásával készült. A kutatás a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

IRODALOM

- [1] Farkas, J., Jármai, K. (2006) Optimum design and cost comparison of a welded plate stiffened on one side and a cellular plate both loaded by uniaxial compression. *Welding in the World*, 2006; 50: No.3-4, 45-51.
- [2] Farkas, J., Jármai, K. (2003) *Economic design of metal structures*. Millpress, Rotterdam
- [3] Farkas, J., Jármai, K. (1997) *Analysis and optimum design of metal structures*. Balkema, Rotterdam-Brookfield
- [4] Farkas, J., Jármai, K. (2008) Design and optimization of metal structures. Horwood, Chichester, UK
- [5] Det Norske Veritas (DNV) (1995) *Buckling strength analysis*, Classification Notes No.30.1. Høvik, Norway.
- [6] Eurocode 3 (2006) Design of steel structures. Part 1-5: Plated structural elements.
- [7] Kennedy, J. & Eberhart, R.C. (1995) Particle swarm optimization. *Proc. IEEE Int'l Conf. on Neural Networks*, IV, 1942-1948. IEEE service center, Piscataway, NJ, 1995. 1942-1948
- [8] Fourie, P.C. & Groenwold, A.A. (2000) Particle swarm in size and shape optimisation, *International Workshop on Multidisciplinary Design Optimization*, 7-10, Aug. 2000, Pretoria, South Africa, Proceedings 97-106.
- [9] Egorov, I.N. (1998) Indirect Optimization Method on the Basis of Self-Organization, *Proceedings of Optimization Techniques and Applications (ICOTA'98)*, 2, 683-691, Curtin University of Technology, Perth, Australia.
- [10] Egorov, I.N. and Kretinin, G.V. (1992) Multicriterion Stochastic Optimization of Axial Compressor, *Proceedings of ASME COGEN-TURBO-VI*, Houston, Texas

GENETIKUS PROGRAMOZÁS ÉS TABU KERESÉS ÖSSZEHASONLÍTÁSA MŰSZAKI FELÜGYELETI ÉS KARBANTARTÓ RENDSZEREK OPTIMÁLÁSI FELADATAINÁL

COMPARISON OF GENETIC PROGRAMMING AND TABU SEARCH AT THE OPTIMIZATION OF TECHNICAL INSPECTION AND MAINTENANCE SYSTEMS

Kota László*

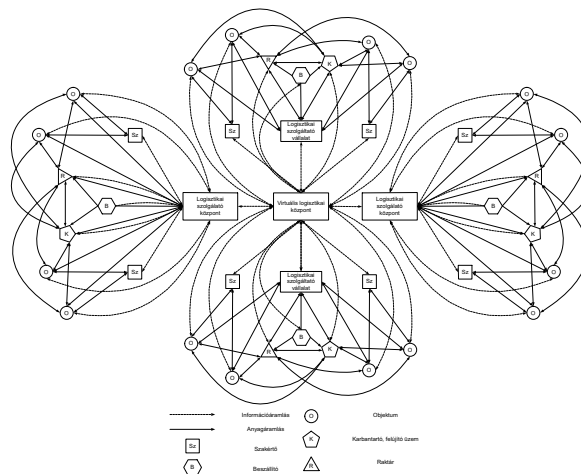
ABSTRACT

This paper describes a comparison between the previously developed and already published single phase genetic programming algorithm for the fixed destination multi-depot multiple traveling salesman problem with multiple tours (mmTSP) and the generalized taboo search algorithm. This optimization problem is widely appears in the field of logistics mostly in connection with maintenance network and therefore applying this research in the field of logistics it can results a high savings in these systems. This article shows the advantage of the developed genetic programming algorithm through numerous tests.

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a szolgáltatások területén kiemelt jelentőségűek a műszaki felügyeleti és karbantartási rendszerek, mivel ezek a termelési, vagy szolgáltatási terület - ezek közül kiemelt fontosságúak a lakosságot közvetlen érintőek – biztonságát, megbízhatóságát biztosítják, ilyen területek például, kommunális szolgáltatások, víz, szennyvíz, gáz, villamos energia, távfűtés, üzemanyag ellátás, telekommunikációs szolgáltatások, vagy akár a felvonók és kötélpályák. Ezek megbízható, balesetmentes és gazdaságos üzemeltetése megköveteli az időszakos műszaki ellenőrzéseket, karbantartásokat. Felülvizsgálatuk, karbantartásuk pedig az esetek túlnyomó többségében speciális, vizsgához kötött szaktudást igényel. Ilyenek lehetnek például az emelőgépek egy sajátos változatai a felvonók, amelyek vizsgálata, karbantartása életvédelmi szempontból is igen fontos, így ezt a területet kormányrendelet szabályozza Hasonlóan kezelhetőek a különböző szolgáltató hálózatok, például villamos energia-, gáz-, hő-, vízellátás biztosítására szolgáló

olyan objektumok, biztonsági berendezések, irányító alközpontok, ellenőrző egységek, kritikus hálózati elemek, amelyek időszakos felülvizsgálata, helyszíni ellenőrzése, karbantartása szükséges.



1. ábra Hálózatszerűen működő, regionális decentrumokkal rendelkező műszaki felügyeleti és karbantartási rendszer általános struktúrája

Az ilyen tevékenységek végrehajtásánál a következő feladatok jelentkeznek:

- egy-egy személynek kell évente egy vagy több alkalommal a helyszínre kiszállni és a tevékenységet ellátni,
- a tevékenység ellátáshoz alkatrészek, szerszámok, gépek egyéb eszközök helyszínrre való ki- és visszaszállítására is szükséges lehet,
- az is belátható, hogy a tevékenységet ellátó személyek vagy szakértőknek a kiszolgált terület objektumaihoz közel lakjanak, mert így képesek kis időráfordítással, költséghatékonyan tevékenykedni,
- a szükséges anyagok, alkatrészek, eszközök, gépek a rendszer különböző pontjaiban telepített

* tudományos segédmunkatárs, Miskolci Egyetem, ALT

raktárakban találhatóak, ezekből történik ki- ill. visszaszállításuk,

- illetve előfordulhatnak a helyszínen nem javítható szerkezeti elemek, amelyeket kiszerelem után a karbantartó üzemekben újítják fel.

Mivel az ilyen rendszerek kiterjedhetnek akár egy városra, országra vagy akár földrészekre, az optimális működtetésük jelentős logisztikai probléma, amelyet hálózatszerűen, virtuális logisztikai központ irányításával működő rendszerek látnak el.

Mivel napjainkban igen sok új optimalizációs módszert dolgoznak ki, főleg biológiai elveken alapulva, ilyenek például a részecskeraj algoritmus [1], vagy a nemrégiben kidolgozott harmónia kereső algoritmus [2], vagy a tabu keresés, amelynek általános algoritmusalkalmas a szomszédsági információkkal nem rendelkező rendszerek optimalizálására is [3].

Jelen cikkben nem foglalkozom a rendszer matematikai leírásával, hiszen az már publikálásra került [4][5].

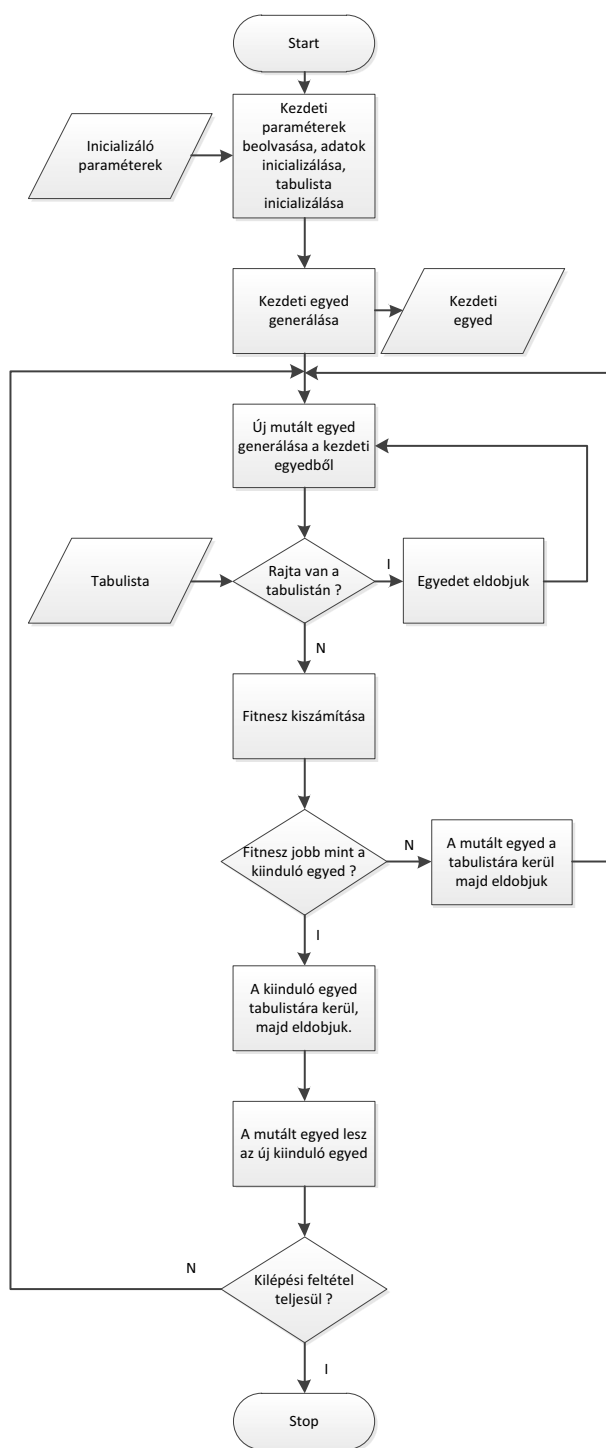
2. TABU KERESÉS

A tabu keresés egy új, széles körben - főleg kombinatorikus optimalizálásra használt - probléma független metaheurisztikus kereső eljárás.

A tabu keresés egyelemű populációt használ, a kereső operátor a genetikus algoritmuséhoz hasonlóan a mutáció, azonban itt nincs sem öröklődés, sem keresztezés. A tabu keresés során egy tabu listát tartunk fenn, amely a legutóbb megvizsgált néhány megoldásból áll. A tabu keresés egyes változatai ebből a tabulistából többet is alkalmaznak, mintegy

A tabu lista mérete az algoritmus paramétere. Az új populáció, azaz az új aktuális megoldás kiválasztásához először megnézzük, hogy a mutációval létrehozott új elem szerepel-e a tabu listában. Ha igen, akkor nem fogadjuk el egyébként, pedig ha nem rosszabb, mint a régi megoldás, akkor elfogadjuk. A régi megoldás a tabu listára kerül, és a tabu lista legrégebbi eleme törlődik [3].

A tabu keresés ezen általánosan megfogalmazott algoritmus (1. ábra) egy általános kereső módszer, a módszer futtatásakor ugyanazokat az operátorokat és büntetőfüggvényeket használtam, mint a genetikus programozási algoritmusnál. A tabu keresés algoritmusát teszteltem mind a négy a disszertációban szereplő feladattal. A tabulista hossza mind a négy esetben 500 volt, míg a genetikus programozási algoritmusnál az első három problémánál populációméret 500, 50 véletlen generált egyed mellett, míg az utolsó problémánál a populációméret 10, 1 véletlenszerűen generált egyeddel.



2. ábra A tabu keresés algoritmus

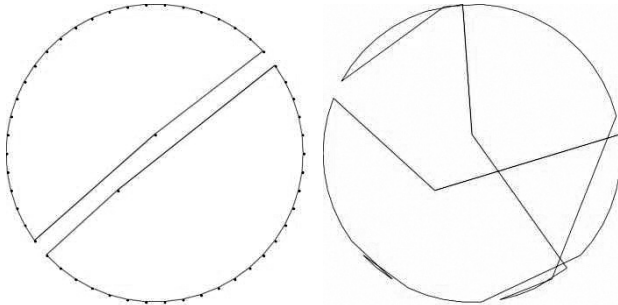
3. ÖSSZEHASONLÍTÁS

3.1 Egyszerű két szakértős tesztfeladat vizsgálata

Az első tesztfeladat kisméretű probléma két szakértővel, 50 objektummal, objektumonként 1 vizsgálattal.

| Algoritmus | Célfüggvény | Relatív eltérés | Megoldási idő | Büntetések | Iteráció szám |
|------------|-------------|-----------------|---------------|------------|---------------|
| GP | 4008,85 | 100,00% | 0:13:06 | 0 | 9100 |
| T | 5491,27 | 73,00% | 0:13:22 | 0 | 15000 |

1. táblázat Tabu keresés és genetikus programozási algoritmus összehasonlítása az első tesztfeladat esetén



a.) Genetikus programozási algoritmus

b.) Tabu keresési algoritmus

3. ábra Futási eredmények

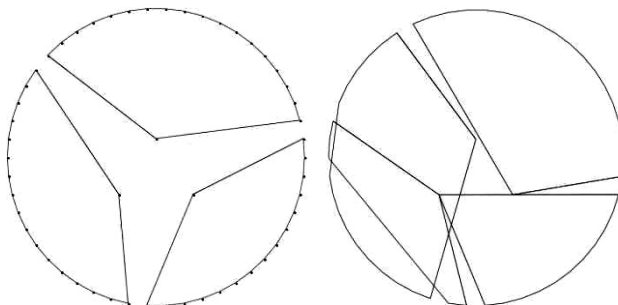
A kapott eredményekből látható, hogy a genetikus programozási algoritmushoz képest a tabu keresés algoritmus rosszabb eredményt ad ugyanannyi futási idő (mintegy 13 perc) alatt, a tabu keresés a célfüggvény értékét 73 százalékra közelíti meg.

3.2 Egyszerű három szakértős tesztfeladat vizsgálata

A második tesztfeladat kisméretű probléma három szakértővel, 50 objektummal, objektumonként 1 vizsgálattal

| Alg. | Célf. | Relatív eltérés | Megoldási idő | Bünt. | Iteráció |
|------|-----------|-----------------|---------------|-------|----------|
| GP | 4483,96 | 100,00% | 0:24:35 | 0 | 16434 |
| T | 159581,79 | 2,81% | 0:28:57 | 3 | 30000 |

2. táblázat Tabu keresés és genetikus programozási algoritmus összehasonlítása a második tesztfeladat esetén



a.) Genetikus programozási algoritmus

b.) Tabu keresési algoritmus

4. ábra Futási eredmények

A kapott látható, hogy a genetikus programozási algoritmushoz képest a tabu keresés algoritmus rosszabb eredményt ad, habár ennél a problémánál a tabukeresés algoritmus mintegy 4 perccel tovább futott. Ennél a problémánál a tabu keresés megoldása jelentősen rosszabb, mint a genetikus programozási feladat megoldása, a célfüggvény értékét csak mintegy 2,81 százalékra közelíti meg. Az itt tapasztalt nagy relatív eltérés miatt a tabukeresési algoritmust többször is lefuttattam, minden alkalommal más értékkel inicializálva a véletlenszám generátort (3. táblázat). Az eredmények az első futtatáskor kapott eredmények körül szórtak, így az első futtatásra kapott eredmény helyesnek tekinthető.

| Futtatás | Célfüggvény |
|----------|-------------|
| 1 | 159532,87 |
| 2 | 158366,67 |
| 3 | 159189,03 |
| 4 | 158633,57 |
| 5 | 157738,56 |
| 6 | 160244,28 |

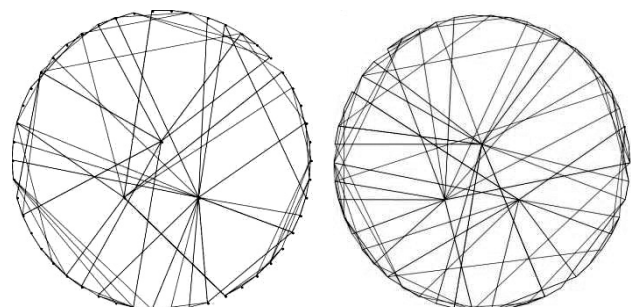
3. táblázat Tabu keresési algoritmus futtatásai

3.2 Több vizsgálatos három szakértős tesztfeladat

A harmadik tesztfeladat közepes méretű probléma három szakértővel, objektumonként 2-4 vizsgálattal. A genetikus programozási algoritmus 200000 iterációig futott a tabukeresési algoritmus 650000 iterációig, a genetikus programozási algoritmussal azonos ideig.

| Alg. | Célf. | Relatív eltérés | Megoldási idő | Bünt. | Iteráció |
|------|-----------|-----------------|---------------|-------|----------|
| GP | 217534,75 | 100,00% | 9:01:12 | 11 | 200000 |
| T | 495470,75 | 43,90% | 9:02:10 | 14 | 650000 |

4. táblázat Tabu keresés és genetikus programozási algoritmus összehasonlítása a harmadik tesztfeladat esetén



a.) Genetikus programozási algoritmus

b.) Tabu keresési algoritmus

5. ábra Futási eredmények

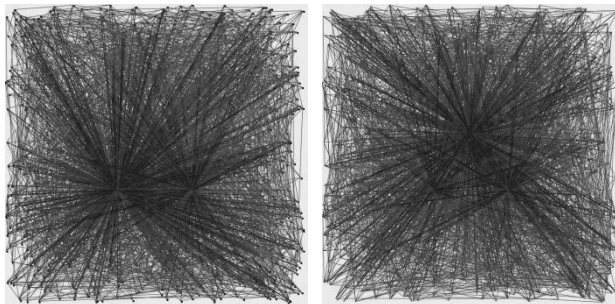
A kapott eredményekből látható, hogy a genetikus programozási algoritmushoz képest a tabu keresés algoritmus a rosszabb eredményt ad ugyanannyi futásidő (mintegy 9 perc) alatt, a tabu keresés a célfüggvény értékét 43,9 százalékra közelíti meg.

3.2 Összetett sok objektumos, sok vizsgálatos feladat

A negyedik tesztfeladat nagyméretű méretű probléma három szakértővel, 1000 objektummal objektumonként 2-4 vizsgálatot. A genetikus programozási algoritmus 5500 iterációig futott a tabukeresési algoritmus 29000 iterációig, a genetikus programozási algoritmussal gyakorlatilag azonos ideig.

| Alg. | Célf. | Relatív eltérés | Megoldási idő | Bünt. | Iteráció |
|------|-------------|-----------------|---------------|-------|----------|
| GP | 138245712,9 | 100,00% | 0:57:05 | 631 | 5500 |
| T | 138781405,3 | 99,61% | 0:57:46 | 645 | 29000 |

5. táblázat Tabu keresés és genetikus programozási algoritmus összehasonlítása a második tesztfeladat esetén



a.) Genetikus programozási algoritmus

b.) Tabu keresési algoritmus

6. ábra Futási eredmények

A kapott eredményekből látható, hogy a genetikus programozási algoritmushoz képest a tabu keresés algoritmus a rosszabb eredményt ad. Ennél a problémánál viszont a tabu keresés megoldása nem tér el jelentősen a genetikus programozási feladat megoldásától, a célfüggvény értékét 99,61 százalékra megközelíti.

4. ÖSSZEGZÉS

A tabu keresés nem adott jobb eredményt a kidolgozott genetikus programozási algoritmusnál egyik esetben sem, habár az utolsó esetben nagyméretben megközelítette a genetikus programozási megoldás eredményét, a 2. példában pedig csak a megoldás töredékét szolgáltatva azonos időn belül. Ebben az esetben felmerült a véletlen lokális optimumba futás

lehetősége. Azonban a további lefuttatott tesztek (3. táblázat) azt mutatták, hogy ez nem csak a véletlen szórás eredménye.

A tabu keresés egyik előnye, hogy nem számítja ki főlegesen egyes már megvizsgált elemek eredményét – amelyeket a tabulistán megtalál -, ez ebben az esetben azonban ez sokszor hátrányává válik, hiszen az operátorok által előállított elemek szétszórtsága igen magas. Míg általános függvényszerű megoldás keresésekor könnyen megvalósítható a szomszédság fogalma, ami az egy lépéssel elérhető újabb megoldás, itt ezen elemek halmaza nagyobb problémáknál, gyakorlatilag olyan magas hogy a meghatározásuk nem megvalósítható. Hiszen itt az egy lépésben elérhető elemek halmaza a hat operátor összes paraméter kombinációjával előállítható megoldások halmaza, amely a problémamérettel emelkedik. Így a tabulista elemein kevés találat születik, gyakorlatban egy közepes méretű problémát megvizsgálva a tabulistán nem volt egyetlen találat sem. Viszont a tabulistán való keresés, az egyedek összehasonlítása, főleg nagyméretű egyedeknél, valamint az egyedek elhelyezése a tabulistára (memóriafooglalás, egyed átmásolása) olyan sok időt vehet igénybe, amely összemérhető az elem fitnessfüggvényének kiszámításával.

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg

6. IRODALOM

- [1.] FARKAS J, JÁRMAI K.: Design and optimization of metal structures, Horwood Publishing Limited 2008, ISBN 978-1-904275-29-9
- [2.] BÁNYAI T.: Optimisation of multi level supply chain of automatised production systems with harmony search algorithm, Proceedings of the II. European conference on logistics, pp.: 65-71., ISBN 978-83-61118-67-1
- [3.] JELASITY M.: Mesterséges Intelligencia 1 fejezet, ed.: Futó Iván, Aula Kiadó 1999
- [4.] KOTA L., JÁRMAI K.: Műszaki felügyeleti és karbantartó rendszerek optimalálása, GÉP LXII: évfolyam, 2011/7-8, I. Kötet, pp.: 75-78, ISSN: 0016-8572
- [5.] KOTA L.: Optimisation of Large Scale Maintenance Networks with Evolutionary Programming, DAAAM International Scientific Book 2011 ISBN 978-3-901509-84-1, ISSN 1726-9687

KOMPOZIT SZENDVICSSZERKEZET OPTIMÁLIS TERVEZÉSE

OPTIMAL DESIGN OF A COMPOSITE SANDWICH STRUCTURE

Dr. Kovács György*

ABSTRACT

This study shows the optimization method of a new complex structural model [laminated carbon fiber reinforced plastic (CFRP) deck plates with polystyrene foam (EPS) inner layer]. The structure was designed for both minimal cost and minimal weight taking into consideration 6 design constraints.

1. BEVEZETÉS

A kompozitok több szempontból fontos anyagok a mérnöki gyakorlatban, a műszaki célú szerkezeti anyagok legkorszerűbb családját képezik. A tulajdonságok olyan széles skálájával rendelkeznek, melyek más anyagokkal elérhetetlenek, mint például a nagy szilárdság, kis sűrűség, korrózióval és vegyi anyagokkal szembeni ellenállás, kedvező hajlítási merevség, jó rezgéscsillapítás, esztétikus megjelenés.

A kompozitokat – ezen tulajdonságaiknak köszönhetően – jelenleg is számos iparágban (űrkutató, hadiipar, járműipar, építőipar, gépipar, vegyipar, egészségügy) alkalmazzák.

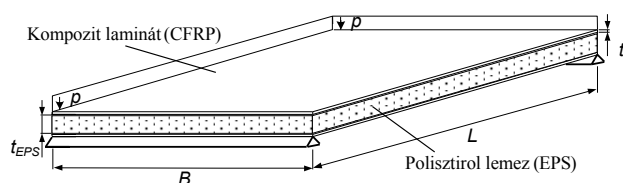
Számos szakirodalom foglalkozik a szendvicsszerkezetek vizsgálatával, tervezésével és alkalmazásával, mint például [1, 3, 4, 5, 6, 7, 8].

Gyakorlati alkalmazások esetében elvárás, hogy a szerkezet a gazdaságossági és mechanikai előírások mellett jó hőszigetelő tulajdonsággal is rendelkezzen, például a vízi-, légi szállító járművek, vagy épületelemek esetében. A cikkben vizsgált új szerkezeti modell ezen esetekre kíván egy alternatívát nyújtani.

2. AZ ÚJ KOMPOZIT SZENDVICSSZERKEZET

A vizsgált szerkezet (1. ábra) 2 CFRP (Carbon Fibre Reinforced Plastic – karbonszálerősítéses műanyag) fedőlemezről és köztük egy polisztirol hőszigetelő rétegből (EPS) áll. A szerkezeti elemek ragasztással kerülnek összeállításra.

Ezen típusú szendvicsszerkezet számos mérnöki teherrel szembeálló szerkezetben (pl. hajófülkék, repülőgép oldalfal, épület aljzat és födém, stb.) alkalmazható.



1. ábra. A szendvicsszerkezet modellje

A CFRP fedőlemezek (laminátok) laminált karbonszál-erősítéses műanyag réteges szerkezetek. Az egyes kompozit rétegek karbonszál térfogat aránya 61%, az epoxi mátrix térfogat aránya pedig 39%.

A szigetelőként kiválasztott középső réteg lépésálló EPS polisztirol lemez, mely jó hőszigetelő tulajdonságú és igen nagy terhelhetőségű anyag, továbbá jó vízszigetelő is.

Az optimalás célja egy $L = 2250$ mm hosszúságú, $B = 2000$ mm szélességű, $p = 3,5 \cdot 10^{-3}$ N/mm² felületen megoszló terhelésű szendvicsszerkezet optimális szerkezeti méreteinek meghatározása.

A fedőlemezek összeállítása során felhasznált előimpregnált CFRP rétegek anyagi jellemzői az alábbiak: az egyes rétegek vastagsága $t^* = 0,2$ mm, a rugalmassági modulus hosszirányban $E_x = E_c = 120$ GPa, keresztirányban pedig $E_y = 9$ GPa. A CFRP réteg fajlagos tömege $\rho_c = 180$ g/m², Poisson tényezői $\nu_{xy} = 0,25$ és $\nu_{yx} = 0,019$.

| | EPS 30 | EPS 70 | EPS 100 | EPS 150 | EPS 200 |
|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $\rho_{EPS} \left[\frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \right]$ | 10 $\cdot 10^{-9}$ | 15 $\cdot 10^{-9}$ | 20 $\cdot 10^{-9}$ | 25 $\cdot 10^{-9}$ | 30 $\cdot 10^{-9}$ |
| E_{EPS} [MPa] | 0,3 | 0,7 | 1 | 1,5 | 2 |
| $K_{EPS} \left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right]$ | 0,048 | 0,04 | 0,036 | 0,034 | 0,033 |
| $k_{EPS} \left[\frac{\text{EUR}}{\text{mm}^3} \right]$ | 3,53 $\cdot 10^{-8}$ | 3,97 $\cdot 10^{-8}$ | 5,27 $\cdot 10^{-8}$ | 7,67 $\cdot 10^{-8}$ | 9,33 $\cdot 10^{-8}$ |

1. táblázat. Különböző típusú EPS lemezek jellemzői

* egyetemi docens, Miskolci Egyetem Anyagmozgatási és Logisztikai Tanszék

A különféle, az optimális tervezés során vizsgált EPS polisztirol lemezek jellemzőit az 1. táblázat tartalmazza, ahol ρ_{EPS} a sűrűséget, E_{EPS} a rugalmassági moduluszt, K_{EPS} a hővezetési tényezőit, k_{EPS} a fajlagos anyagköltséget jelenti.

3. CÉLFÜGGVÉNYEK ÉS MÉRETEZÉSI FELTÉTELEK

A dolgozat célja az új szendvicsszerkezet optimálási módszerének kidolgozása. A kidolgozott célfüggvények költség- és tömeg-célfüggvények. A számítás során a teljes szerkezet középlehajlására, a kompozit lemezben ébredő maximális feszültségre, a polisztirol rétegben keletkező maximális feszültségre, a szerkezet sajátfrekvenciájára, a szerkezet hőszigetelési előírásaira vonatkozó méretezési feltételek, valamint a fedőlemez rétegszámára (n) és a polisztirol szigetelő réteg vastagságára (t_{EPS}) vonatkozó méretkorlátozási feltételek lettek figyelembe véve.

Az egycélűfüggvényes optimalás során a szisztematikus kereséses módszere került alkalmazásra, mely valamennyi lehetséges szerkezetkialakítási variációt megvizsgál. Az optimalás számításai a MathCad szoftverrel készültek.

3.1. Költségfüggvény, mint célfüggvény

Általában a leggyakoribb követelmény a szerkezettel szemben, hogy gazdaságos legyen, vagyis törekedni kell a költségminimumra. A költségfüggvény a vizsgált kompozit szendvicsszerkezet esetén az anyag és a gyártási költségek összegeként írható fel [2]:

$$K = K_{CFRP} + K_{EPS} + K_{hőkezelés} + K_{gyártás} \\ K (\text{€}) = 2 (n \cdot 31,047) + k_{EPS} (B L t_{EPS}) + \\ + 2 n \frac{525}{528} + k_f [n \cdot 14_{\min} + 230_{\min}] \quad (1)$$

ahol n a CFRP rétegek számát jelenti, k_{EPS} a polisztirol réteg fajlagos anyagköltsége, t_{EPS} a szigetelő réteg vastagsága, k_f a fajlagos gyártási költség ($k_f=0,6$ €/min), min pedig a percben kifejezett gyártási folyamatok ideje.

A szerkezet anyagköltségének jelentős részét a kompozit fedőlemezek teszik ki. Esetünkben ez a költség a 31,047 €/réteget jelenti. A hőkezelés költsége a kezelendő fedőlemezek méretétől és a mátrix-gyanta típusától függ. Esetünkben ezen költségkomponens a fedőlemez rétegszám és méret függvényeként számítható. Egy általunk már korábban legyártott 220x1200x2mm méretű CFRP fedőlemez költségét ismerjük, mely alapján a számítási példában szereplő méretű lemez költsége már származtatható az (1) egyenletben látható módon.

A teljes gyártási költség (mint az idő függvénye [min]) a CFRP lemezek gyártásához szükséges idő

($n \cdot 14_{\min} + 110_{\min}$), az EPS lemezek vágási, valamint a szerkezet összeállítási időszükséglete (120_{\min}) idővel számítható.

Az optimalandó paraméterek a CFRP fedőlemezek rétegeinek száma (n), valamint az EPS belső réteg vastagsága (t_{EPS}).

3.2. Szerkezettömeg, mint célfüggvény

A szerkezet teljes tömege a CFRP és az EPS komponensek tömegének összegeként írható fel:

$$m = 2 \rho_c [B L (n t^*)] + \rho_{EPS} [B L t_{EPS}] \quad (2)$$

ahol: t^* az egyes rétegek vastagsága, a fedőlemez sűrűsége $\rho_c=180 \cdot 10^{-9}$ kg/mm³, az alkalmazott polisztirol réteg sűrűsége (ρ_{EPS}) pedig az 1. táblázatban megtalálható.

3.3. Méretezési feltételek

3.3.1. A szerkezet középlehajlása

$$w_{\max} = \frac{5p L^4}{384(E_c I_c + E_{EPS} I_{EPS})} \leq \frac{L}{200} \quad (3)$$

ahol: I_c és I_{EPS} a kompozit lemez és a polisztirol réteg inerciája, E_c és E_{EPS} a CFRP laminát redukált rugalmassági modulusa, valamint az EPS rugalmassági modulusa.

3.3.2. Feszültségi feltétel a kompozit lemezre

A szerkezetre ható terhelésből adódó nyomaték megoszlik a szerkezet CFRP és EPS komponensei között. $X_c M$ a teljes nyomaték kompozit lemezre eső része.

$$\frac{X_c M}{I_c} \cdot \frac{h_{EPS} + nt}{2} \leq \sigma_{Call} \quad (4)$$

ahol: $M = \frac{pL^2}{8}$; $\sigma_{Call} = \frac{\sigma_T}{\gamma_c}$ a megengedett feszültség; $X_c M$ a kompozit lemezre eső nyomaték; σ_T a kompozit laminát szakító szilárdsága; γ_c a biztonsági tényező (=2).

3.3.3. Feszültségi feltétel a polisztirol rétegre

$$\frac{X_{EPS} M}{I_{EPS}} \cdot \frac{t_{EPS}}{2} \leq \sigma_{EPSall} \quad (5)$$

ahol: $X_{EPS} = \frac{E_{EPS} I_{EPS}}{E_{EPS} I_{EPS} + E_c I_c}$; $\sigma_{EPSall} = \frac{\sigma_{EPSmax}}{\gamma_{EPS}}$ a megengedett feszültség; $X_{EPS} M$ az EPS rétegre eső nyomaték; σ_{EPSmax} az EPS nyomószilárdsága; γ_{EPS} a biztonsági tényező (=2).

3.3.4. Sajátfrekvencia feltétel

$$f_1 = \frac{\pi}{2L^2} \sqrt{\frac{10^3 (E_c I_c + E_{EPS} I_{EPS})}{m}} \geq f_0 \quad (6)$$

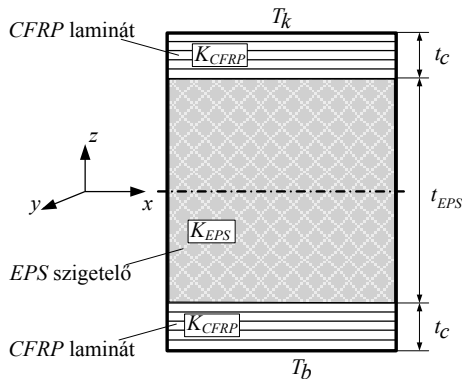
m : tömeg/folyóméter [kg/m]; f_0 : korlátozás a sajátfrekvenciára (50 Hz).

3.3.5. Hőszigetelési feltétel

Számos szerkezet esetében fokozott elvárás, hogy a szerkezet a gazdaságossági és mechanikai előírások mellett hőszigetelő tulajdonsággal is rendelkezzen. A különféle anyagok és szerkezeti elemek hővezetési jellemzőinek számításával számos szakirodalom foglalkozik [9-14].

Feltételezve, hogy a szerkezeten kívüli hőmérséklet (T_k) -20°C (253,15K), a szerkezeten belüli hőmérséklet pedig (T_b) $+15^\circ\text{C}$ (288,15K). A kompozit laminát hővezetési tényezője $K_{CFRP} = 0,86 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$ [15], a vizsgált

különböző típusú EPS rétegek hővezetési tényezői (K_{EPS}) pedig az 1. táblázatban található meg.



2. ábra. A szendvicsszerkezet keresztmetszete

Legyen a szerkezet maximálisan megengedett hőátteresztési értéke egységnyi felületen ($F=1 \text{ m}^2$) 30 W-ban előírva (Q_{meg}), a Fourier-féle egyenlet alapján az alábbi (7) egyenlőtlenség felírható, amennyiben a szerkezeti elemeket homogén szerkezetűnek tételezzük fel:

$$Q_{valós} = F \frac{T_b - T_k}{\frac{t_c}{K_{CFRP}} + \frac{t_{EPS}}{K_{EPS}} + \frac{t_c}{K_{CFRP}}} \leq Q_{meg} \quad [\text{W}] \quad (7)$$

3.3.6. Méretkorlátozási feltételek

$$\begin{aligned} 8 &\leq n \leq 12 \\ 30 &\leq t_{EPS} \leq 80 \end{aligned} \quad [\text{mm}] \quad (8)$$

A fenti méretkorlátozási feltételek gazdaságossági és gyárthatósági szempontok alapján kerültek meghatározásra.

4. AZ EGYCÉLFÜGGVÉNYES OPTIMÁLÁS NUMERIKUS EREDMÉNYEI

4.1. Költség optimalálás

Szendvicsszerkezetek tervezése során a költséghatékonyság az elsődleges tervezési cél tekintettel arra, hogy a kompozit szerkezetek anyagköltsége igen magas. Az 1. táblázat tartalmazza a

vizsgált szerkezet költség optimalálásának eredményeit, mely az (1) egyenlet alapján, valamint a (3-9) méretezési feltételek figyelembe vételével lett elvégezve szisztematikus keresés módszerével. A különböző (8-12 db) rétegszámú kompozit fedőlemezekből, valamint különböző típusú polisztirol szigetelő rétegekből álló szerkezetek teljes költségeit az alábbi 2. táblázat tartalmazza:

| Költség optimalálás: K [€] | | | | | | |
|---------------------------------|--|--|--------|---------|---------|---------|
| Rétegek száma: n [db] | Szigetelő vastagság: t _{EPS} [mm] | Alkalmazott EPS polisztirol szigetelő lemez típusa | | | | |
| | | EPS 30 | EPS 70 | EPS 100 | EPS 150 | EPS 200 |
| 8 rétegű CFRP fedőlemez esetén | 30 | - | - | - | - | - |
| | 40 | - | - | - | - | - |
| | 50 | - | 726,8 | 729,7 | 735,1 | 738,8 |
| | 60 | 727,6 | 728,6 | 732,1 | 738,6 | 743,1 |
| | 80 | 730,6 | 732,2 | 736,8 | 754,5 | 751,5 |
| 10 rétegű CFRP fedőlemez esetén | 30 | - | - | - | - | - |
| | 40 | - | - | - | - | 879,6 |
| | 50 | - | 871,8 | 874,7 | 880,1 | 883,8 |
| | 60 | 872,3 | 873,5 | 877,0 | 883,5 | 888,0 |
| | 80 | 875,4 | 877,2 | 881,8 | 890,4 | 896,4 |
| 12 rétegű CFRP fedőlemez esetén | 30 | - | - | - | - | - |
| | 40 | - | - | - | - | - |
| | 50 | - | 1017,0 | 1020,0 | 1025,0 | 1029,0 |
| | 60 | 1017,0 | 1019,0 | 1022,0 | 1029,0 | 1033,0 |
| | 80 | 1020,0 | 1022,0 | 1027,0 | 1035,0 | 1041,0 |

2. táblázat. A költség optimalálás eredménye

A táblázat azon celláiban, ahol nem szerepel költség adat, ott valamely tervezési feltétel, vagy feltételek nem teljesülnek. Az optimalálás során ezen kritikus feltételek a szerkezet teljes középkehajlásának korlátozására, valamint a szerkezet hőszigetelésére vonatkozó előírások voltak.

Összességként elmondható, hogy a fedőlemez rétegszámának növelésével a szerkezet teljes költsége is nő. Költség szempontjából optimálisnak a 8 rétegű fedőlemez, 50 mm vastag EPS 70 anyagjellemzőjű polisztirol szigetelő réteggel ellátott szendvicsszerkezet adódott.

4.2. Tömeg optimalálás

A vizsgált szerkezet tömeg optimalása a (2) tömeg-célfüggvény alapján, a (3-9) méretezési feltételek figyelembe vételével a szisztematikus keresés módszerével lett elvégezve. A különböző rétegszámú (8-12 db) kompozit fedőlemezekből, valamint különböző típusú polisztirol szigetelő rétegekből álló szerkezetek teljes tömegét a 3. táblázat tartalmazza.

A táblázat azon celláiban, ahol nem szerepel tömeg adat, ott szintén valamely tervezési feltétel, vagy feltételek nem teljesülnek, melyek szintén a szerkezet teljes lehajlásának korlátozására, valamint a szerkezet hőszigetelésére vonatkozó előírások voltak.

| Tömeg optimalás: m [kg] | | | | | | |
|---------------------------------|--------------------------------------|--|--------|---------|---------|---------|
| Rétegek száma: n [db] | Szigetelő vastagsága: t_{EPS} [mm] | Alkalmazott EPS polisztirol szigetelő lemez típusa | | | | |
| | | EPS 30 | EPS 70 | EPS 100 | EPS 150 | EPS 200 |
| 8 rétegű CFRP fedőlemez esetén | 30 | - | - | - | - | - |
| | 40 | - | - | - | - | - |
| | 50 | - | 16,335 | 17,46 | 18,585 | 19,71 |
| | 60 | 15,66 | 17,01 | 18,36 | 19,71 | 21,06 |
| | 80 | 16,56 | 18,36 | 20,16 | 21,96 | 23,76 |
| 10 rétegű CFRP fedőlemez esetén | 30 | - | - | - | - | - |
| | 40 | - | - | - | - | 21,6 |
| | 50 | - | 19,575 | 20,7 | 21,825 | 22,95 |
| | 60 | 18,9 | 20,25 | 21,6 | 22,95 | 24,3 |
| | 80 | 19,8 | 21,6 | 23,4 | 25,2 | 27,0 |
| 12 rétegű CFRP fedőlemez esetén | 30 | - | - | - | - | - |
| | 40 | - | - | - | 23,94 | 24,84 |
| | 50 | - | 22,815 | 23,94 | 25,065 | 26,19 |
| | 60 | 22,14 | 23,49 | 24,84 | 26,19 | 27,54 |
| | 80 | 23,04 | 24,84 | 26,64 | 28,44 | 30,24 |

3. táblázat. A tömeg optimalás eredménye

Látható, hogy a fedőlemez rétegszámának növelésével a szerkezet tömege is nő. Tömeg szempontjából optimálisnak a 8 rétegű fedőlemezes, 60 mm vastag EPS 30 anyagjellemzőjű polisztirol szigetelő réteggel ellátott szendvicsszerkezet adódott.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Egy új szerkezeti modell szerkezet-optimalási módszere került bemutatásra. A szerkezet laminált karbonszál-erősítéses fedőlemezekből és különböző típusú polisztirol szigetelő rétegekből ragasztással lett összeállítva.

A tervezés során az ideális rétegszámú CFRP fedőlemezekből, valamint az ideális típusú és vastagságú EPS belső rétegből összeállított optimális szendvicsszerkezet került meghatározásra, mely szerkezet biztosítja a minimális költséget és/vagy tömeget amellett, hogy teljesíti a megfogalmazott méretezési feltételeket is.

Összefoglalásként elmondható, hogy ezen típusú szendvicsszerkezet számos mérnöki teherviselő szerkezetben (vízi-, közúti-, légi járművek; híd; hajófedém; épület padozat, stb.) alkalmazható, ahol a tömeg megtakarítás és a jó hőszigetelő képesség az elsődleges cél.

A kompozit szerkezetek további előnyös tulajdonságai a rezgéscsillapítás, a hangszigetelő képesség, valamint a korrózióállóság, melyeknek köszönhetően rohamosan terjed a felhasználási körük és mértékük.

KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

A tanulmány a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként - az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében - az Európai Unió

támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg. A kutatást az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramok támogatta az OTKA T 75678 számú projekt keretében.

IRODALOM

- [1] Barbero E. J. (1999) *Introduction to composite materials design*, USA: Taylor & Francis.
- [2] Farkas, J.; Jármái, K. (1997) *Analysis and optimum design of metal structure*, Balkema: Rotterdam-Brookfield.
- [3] Farkas, J.; Jármái, K. (1998) Minimum material cost design of five-layer sandwich beams. *Structural Optimization* 15 No.3-4, pp.: 215-220.
- [4] Farkas, J.; Jármái, K. (2003) Economic design of metal structures. Rotterdam: Millpress
- [5] Jármái, K.; Farkas, J.; Petershagen, H. (1999) Optimum design of welded cellular plates for ship deck panels. *Welding in the World* 43 No.1, pp.: 51-54.
- [6] Noor, A. K.; Burton, W.S.; Bert, C. W. (1996) Computational models for sandwich panels and shells. *Appl. Mech. Rev.* 49 No. 3, pp.: 155-199.
- [7] Vinson, J. R. (2001) Sandwich structures, *Appl. Mech. Rev.* 54 No. 3, pp.: 201-214.
- [8] Zenkert, D. (1995) An introduction to sandwich construction, W Midlands: EMAS Publ.
- [9] Springer, G. S. & Tsai, S. W. (1976) Thermal conductivities of unidirectional materials, *Journal of Composite Materials*, No. 1., pp.: 166.-
- [10] Grove, S. M. (1990) A model of transverse thermal conductivity in unidirectional fibre-reinforced composites, *Composites Science and Technology*, 38, pp.: 199.
- [11] Pilling, M. W., Yates, B., Black, M. A. & Tattersall, P. (1979) The thermal conductivity of carbon fiber-reinforced composites, *Journal of Material Science*, 14, pp.: 1326.
- [12] Kulkarni, M. R. & Brady R. P. (1997) A model of global thermal conductivity in laminated carbon/carbon composites, *Composites Science and Technology*, 57, pp.: 277.
- [13] Charles, J. A. & Wilson, D. W. (1981) A model of passive thermal nondestructive evaluation of composite laminates, *Polymer Composites*, 2, pp.: 105.
- [14] Faltin, H. (1970) *Műszaki hőtan*, Műszaki könyvkiadó, Budapest
- [15] Kovács, Gy. (2011) Thermal properties of composite sandwich structures, MAS XXI. Conference, 8-11 November 2011. Villa Clara Cuba, CD Edition 8 pages, Proceedings on CD file: E:\AutoPlay\Docs\ponencias\c1\c1.051.pdf, ISBN: 978-959-250-693-0

BORDÁZOTT LEMEZEK FÁRADÁS VIZSGÁLATA KÜLÖNBÖZŐ BORDATÍPUSOKRA

FATIGUE DESIGN OF STIFFENED PLATES FOR DIFFERENT SHAPES OF RIBS

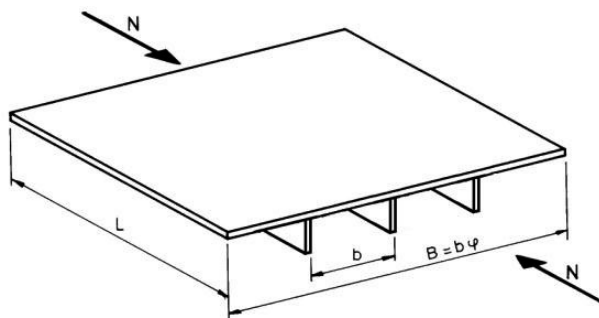
Dr. Virág Zoltán*, Dr. Jármai Károly**

ABSTRACT

In this overview of compressed stiffened plates with various shapes of ribs a special cost analysis has been investigated. Recommendations on fatigue of welded components of the IIW are investigated for the compressed plate. The unknown is the number of stiffeners in the optimization. The trapezoidal stiffeners had the best performance.

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt évtizedekben több olyan dolog megváltozott, mely a hegesztett szerkezetek kialakítására nagy hatással van. Új anyagok és új hegesztési technológiák jelennek meg, illetve terjednek el. Ezért fontos a szerkezetek költség optimalizálása a különböző lehetőségekre [1,2,3,4,5]. A tervezési előírások jelentősen finomodtak. Különösen igaz ez a dinamikus igénybevételre, a fáradásra. A különféle kutató intézetekben, egyetemeken, ipari laboratóriumokban nagyszámú fázasztó kísérletet végezve pontosabban megközelítették a szerkezet viselkedését. Javultak a fázasztó berendezések is, nagyobb ciklusszámú vizsgálatot téve lehetővé. Az új vizsgálati szempontok összekapcsolhatóak az általunk már régóta alkalmazott optimalizálással [6].



1. ábra. A hosszirányban terhelt bordás lemez

* egyetemi adjunktus, Miskolci Egyetem Geotechnikai Berendezések Intézeti Tanszék

** egyetemi tanár, Miskolci Egyetem Anyagmozgatási és Logisztikai Tanszék

2. HEGESZTETT KÖTÉSEK FÁRADÁSÁT BEFOLYÁSOLÓ TÉNYEZŐK

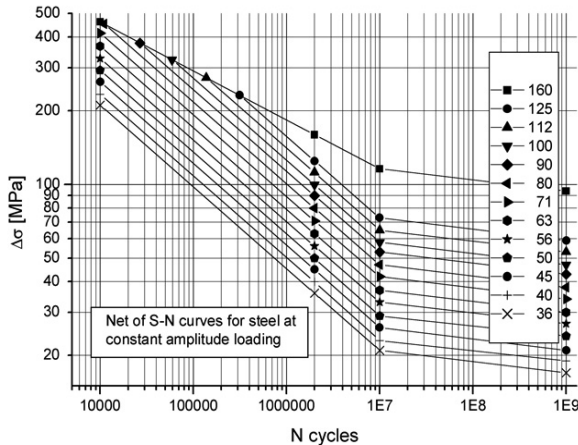
A varratméretezésnél több tényezőt fontos figyelembe venni. Az alkalmazott alapanyag leggyakrabban acél; a legelterjedtebb hegesztési technológia az aktív védőgázos fogyóelektródás hegesztés, de a bevontelektródás kézi ívhegesztés, illetve a fedettívű (és több más) hegesztés is használatos. A hegesztési maradó feszültségek, melyek a bevitt hőtől, a szerkezet és a varrat méreteitől függenek; a kötés típusa, amely a méretezésnél a fáradási kategóriát megadja; a varrat geometria, amely még javítható hegesztési utókezeléssel; a hegesztési hibák, ezen tényezőket célszerű figyelembe venni. A feszültség-tartomány a fáradási élettartamot legjobban befolyásoló tényező; a ciklusszám szintén domináló tényező. A jelenlegi fáradási viselkedési leírások szerint csak $N = 10^8$, vagy 10^9 ciklusszám után lehet a $\Delta\sigma - N$ görbénél a fáradási értéket változatlanul tekinteni; a feszültség-állapot, az esetek nagy részében nemcsak normál feszültség, de nyírófeszültség is adódik.

A fáradási viselkedés jelentősen változik, illetve változhat ezen tényezők változásával.

3. FÁRADÁSI TERVEZÉSI ELŐÍRÁSOK A NEMZETKÖZI HEGESZTÉSI INTÉZET AJÁNLÁSA ALAPJÁN

A széles körben elterjedt Eurocode 3 [7] szabvány mellett a Nemzetközi Hegesztési Intézet (International Institute of Welding) is dolgozott ki ajánlást hegesztett kapcsolatok fáradásának meghatározására [8]. Az ajánlás előnye, hogy felhasználja újabb kutatási eredményeket. 960 MPa folyáshatárig érvényes az Eurocode 690 MPa folyáshatárához képest. A fáradási határokat nemcsak acélra, hanem alumíniumra is

megadja. A fáradási határ 10^9 ciklusszám fölött válik állandóvá (2. ábra).



2. ábra. IIW ajánlás fáradási görbék normál feszültségre [8]

Ha $N \leq 10^7$, akkor

$$\log \Delta \sigma_N = \frac{1}{m} \log \frac{2 \cdot 10^6}{N} + \log \Delta \sigma_C$$

ahol m a görbe meredeksége állandó, $m = 3$, $\Delta \sigma_C$ a fáradási feszültség-tartomány $N=2 \cdot 10^6$ ciklusszám esetén, ez megegyezik a kötés csoportba sorolási számával (36-160 MPa közötti). Ez a vizsgált esetben (GMAW) 100 MPa.

Ha $10^7 \leq N$, akkor

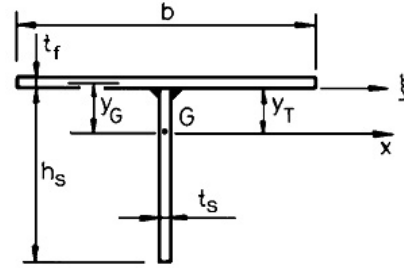
$$\log \Delta \sigma_N = \frac{1}{m} \log \frac{10^7}{N} + \log \Delta \sigma_D$$

ahol a görbe meredeksége kisebb, $m = 5$, $\Delta \sigma_D$ a fáradási feszültség-tartomány $N=10^7$ ciklusszám esetén (meghatározható $\Delta \sigma_C$ értékéből).

4. PÉLDÁK BORDÁZOTT LEMEZEK FÁRADÁSI VIZSGÁLATÁRÁRA

Megadott adatok: az egyoldalt bordázott lemez méretei $B = 5000$ mm, $L = 4000$ mm, a nyomóterhelés $N = 1.2 \cdot 10^7$ [N], a folyáshatár $f_y = 235$ MPa, a rugalmassági modulusok $E = 2.1 \cdot 10^5$ MPa, $G = E/2.6$, a sűrűség $\rho = 7.85 \cdot 10^{-6}$ kg/mm³, a bonyolultsági tényező $\Theta_d = 3$. A számított fáradási ciklusszámok: 10^6 , 10^7 , 10^8 . A vastagságokra konkrét értékeket adtunk meg, a fedőlemez vastagságra (t_f) 40 mm, a borda vastagságra (t_s) 20 mm. A bordaközök száma (φ) 4 és 40 között változhat. A változó: φ .

A vizsgálatok CO₂ védőgázos hegesztésre (GMAW) lettek elvégezve.



3. ábra. A lemezborda geometriája

A lemezborda geometriai jellemzőit (3. ábra) a következőképpen írhatjuk le

$$A_s = h_s t_s$$

ahol a borda helyi horpadását figyelembe véve

$$h_s = 14 t_s \varepsilon, \text{ ahol } \varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$$

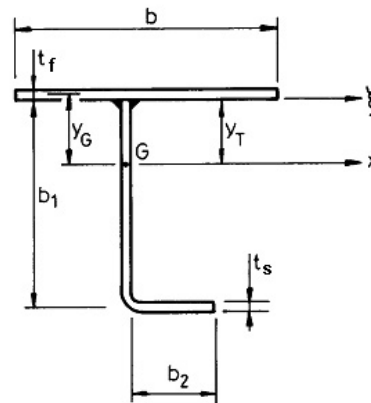
$$y_G = \frac{h_s + t_f}{2} \frac{\delta_s}{1 + \delta_s}, \text{ ahol } \delta_s = \frac{A_s}{b t_f}$$

Az ezekből kapott másodrendű nyomatékok

$$I_x = \frac{b t_f^3}{12} + b t_f y_G^2 + \frac{h_s^3 t_s}{12} + h_s t_s \left(\frac{h_s}{2} - y_G \right)^2$$

$$I_s = h_s^3 \frac{t_s}{3}$$

$$I_T = \frac{h_s t_s^3}{3}$$



4. ábra L bordás lemez geometriája

Az L borda geometriai jellemzőit (4. ábra) a következőképpen írhatjuk le

$$A_s = (b_1 + b_2) t_s$$

ahol a borda helyi horpadását figyelembe véve

$$b_1 = 30 t_s \varepsilon$$

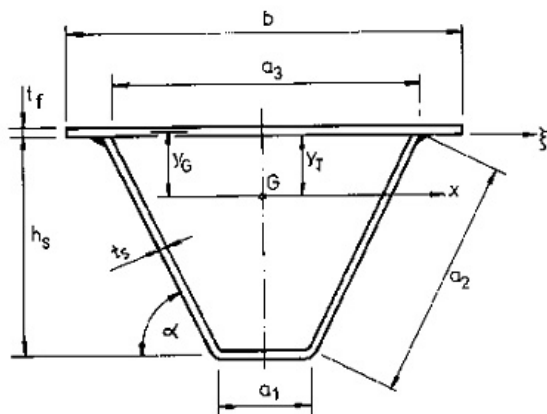
$$b_2 = 12.5 t_s \varepsilon$$

$$y_G = \frac{b_1 t_s \frac{b_1 + t_f}{2} + b_2 t_s \left(b_1 + \frac{t_f}{2} \right)}{b t_f + A_s}$$

$$I_x = \frac{b t_f^3}{12} + b t_f y_G^2 + \frac{b_1^3 t_s}{12} + b_1 t_s \left(\frac{b_1}{2} - y_G \right)^2 + b_2 t_s (b_1 - y_G)^2$$

$$I_s = \frac{b_1^3 t_s}{3} + b_1^2 b_2 t_s$$

$$I_T = \frac{b_1 t_s^3}{3} + \frac{b_2 t_s^3}{3}$$



5. ábra Trapéz bordás lemez geometriája

A trapézborða geometriai jellemzőit (5. ábra) a következőképpen írhatjuk le

$$A_s = (a_1 + 2a_2)t_s$$

Továbbá az $a_1 = 90 \text{ mm}$, $a_3 = 300 \text{ mm}$, így

$$h_s = \sqrt{a_2^2 - 105^2}$$

$$\sin^2 \alpha = 1 - \left(\frac{105}{a_2} \right)^2$$

$$y_G = \frac{a_1 t_s (h_s + t_f / 2) + 2a_2 t_s (h_s + t_f) / 2}{b t_f + A_s}$$

$$I_x = \frac{b t_f^3}{12} + b t_f y_G^2 + a_1 t_s \left(h_s + \frac{t_f}{2} - y_G \right)^2 + \frac{1}{6} a_2^3 t_s \sin^2 \alpha + 2a_2 t_s \left(\frac{h_s + t_f}{2} - y_G \right)^2$$

$$I_s = a_1 h_s^2 t_s + \frac{2}{3} a_2^3 t_s \sin^2 \alpha$$

$$I_T = \frac{4A_p^2}{\sum b_i / t_i}, \text{ ahol } A_p = h_s \frac{a_1 + a_3}{2}$$

A fáradási feltétel az IIW ajánlás alapján lett számítva. A méretezés további feltételei a teljes bordázott lemez horpadása, a fedőlemez horpadása és a bordák elcsavarodó kihajlása Mikami módszerével [9] korábbi tanulmányokban már részletezve lettek [10].

Ez a célfüggvény az anyagfüggvény és az előállítási költség összegeként számolható

$$K = K_m + K_f = k_m \rho V + k_f \sum T_i$$

$$\frac{K}{k_m} = \rho V + \frac{k_f}{k_m} (T_1 + T_2 + T_3) \quad [kg]$$

ahol ρ az alapanyag sűrűség, V a szerkezet térfogata, K_m és K_f valamint k_m és k_f anyag és előállítási költségek és tényezők, T_i előállítási idők a következők szerint:

- összeszerelési és összefűzési idő

$$T_1 = \Theta_d \sqrt{\kappa \rho V}$$

ahol Θ_d a hegesztett szerkezet bonyolultsági tényezője, κ a szerkezet összeszerelendő részeinek száma;

- T_2 hegesztési idő, és T_3 a járulékos idők, mint például elektróda csere. $T_3 \approx 0.3T_2$

$$T_2 + T_3 = 1.3 \sum C_{2i} a_{wi}^n L_{wi}$$

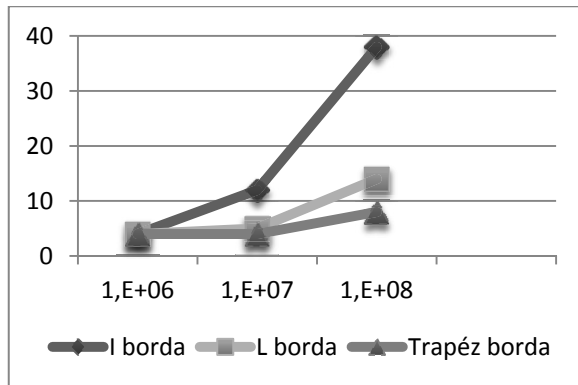
ahol L_{wi} a varrathossz, $C_{2i} a_{wi}^n$ értéke a COSTCOMP [11] software által rajzolt függvényből kapható meg hegesztési eljárásokra, a_w a varratméret (1. táblázat).

| Hegesztési módszer | a_w [mm] | $10^3 C_{2i} a_w^n$ |
|----------------------|---------------|---------------------|
| GMAW-CO ₂ | 0-15 | $0.3258 a_w^2$ |

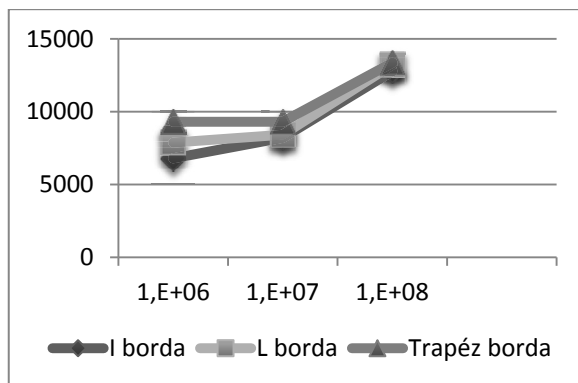
1. táblázat. Hegesztési idő a varrat méret a_w [mm] függvényében hosszirányú sarokvarratra

5. EREDMÉNYEK

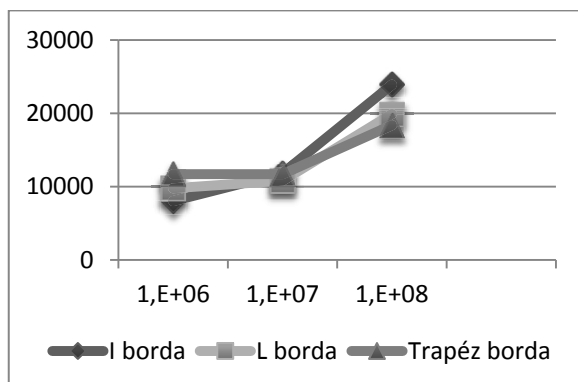
Az eredmények három bordatípusra kerültek meghatározásra, lemez vagy I bordára, L bordára és trapéz bordára. A diagramok a 10^6 - 10^8 fáradási ciklusszám esetén az IIW ajánlása alapján számított értékek alapján mutatják a bordák számának alakulását, illetve az anyagköltség és a gyártási költséggel növelt összköltség változását (6-8. ábra).



6. ábra Bordaszámok változása



7. ábra Anyagköltség változása



8. ábra Összköltség változása 1.5-ös gyártási költség szorzóval

Az eredmények megmutatják, hogy a fáradási ciklusszám nagy hatással van a bordák számára és ezáltal a különböző költségekre. Az eltérő bordatípusok alkalmazásával jelentős megtakarítás érhető el, ha a megfelelő számításokat elvégezzük. Megfigyelhető, hogy a gyengébb lemezborda csak a bordaszám jelentős növelésével tudja a megnövekedett fáradási ciklusszámot elviselni, ami a gyártási költségeket számottevően növeli. Ezért a kisebb a bordaszámú trapéz bordás lemez lesz a legolcsóbb összköltség

tekintetében a nagy ciklusszámmal, míg az alapanyag költség közel azonosnak mondható a három bordatípus esetén. Az így elért költségmegtakarítás teljes költség esetén lemez bordáról áttérve L bordára 16,7%, míg trapézbordára áttérve 23,1%.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A tanulmány/kutató munka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként - az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében - az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg. A kutatást az OTKA támogatta a T 75678 számú projekt keretében.

7. IRODALOM

- [1] JÁRMAI, K., IVÁNYI, M: Gazdaságos fém szerkezetek analízise és tervezése, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 226 o., ISBN 963 420 674 3, 2001.
- [2] Farkas,J., Jármái,K. (2003) *Economic design of metal structures*. Millpress, Rotterdam
- [3] Farkas,J., Jármái,K. (1997) *Analysis and optimum design of metal structures*. Balkema, Rotterdam-Brookfield
- [4] Farkas,J., Jármái,K. (2008) *Design and optimization of metal structures*. Horwood, Chichester, UK
- [5] VIRÁG, Z.: Optimum design of stiffened plates, *Pollack Periodica*, Vol. 1, No. 1, pp. 77-92, HU ISSN 1748-1994, 2006.
- [6] VIRÁG, Z., JÁRMAI, K.: Lemez bordás lemez fáradás vizsgálata és optimalása, *GÉP*, LXII. évfolyam, 2011/9-10. II. kötet 51-54. o., ISSN 0016-8572, 2011.
- [7] EUROCODE 3: MSZ ENV 1993-1-1:1992/A2:2002 *Acélszerkezetek tervezése*, 347 old. Magyar Szabványügyi Testület, Budapest, 2006.
- [8] Recommendations on fatigue of welded components of the IIW, Doc. IIW-1823-07, ex. XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07, 2008.
- [9] MIKAMI, I., NIWA, K. Ultimate compressive strength of orthogonally stiffened steel plates. *J. Structural Engineering ASCE* 122, No.6. 674-682, 1996.
- [10] VIRÁG, Z.: Optimum design of stiffened plates for different loads and shapes of ribs, *Journal of Computational and Applied Mechanics*, Volume 5, Number 1, pp. 165-179, HU ISSN 1586-2070, 2004.
- [11] COSTCOMP Programm zur Berechnung der Schweisskosten. Deutscher Verlag für Schweisstechnik, Düsseldorf, 1990.

KOMPLEX MODELL BEVEZETÉSE POP TARTALMÚ HULLADÉKOK TERMIKUS ÁRTALMATLANÍTÁSI TECHNOLÓGIÁINAK MÉRLEGELÉSÉRE

PRIORITY ORDER FOR THERMIC TREATMENT PROCESSES WITH COMPLEX MODEL BY POPS WASTES

Dr. Mannheim Viktória*

ABSTRACT

The persistent organic pollutants (POPs) wastes take the main place in the group of organic industrial waste and the residues of the POPs waste generated in the processes of the chemical industry. There are green chemistry methods and some other treatment approaches for decreasing the quantity of the organic industrial waste, but currently thermic treatment processes are the most popular alternatives. This paper summarises thermic utilisation processes with a comparison between the different technologies, stressing factors affecting their applicability and operational suitability. With the application of Life Cycle Assessment (LCA) method for technologies, their economic and environmental efficiency can be determined. Their advantages and disadvantages are examined in such a multi-component matrix. The research can set up prognoses and models with LCA analyses and the conscious application of scientific methods, which can offer a prognosis for untested situations.

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a modern mezőgazdasági termelés és a növényvédelmi eljárások hatékonysága elképzelhetetlen növényvédő szerek használata nélkül. A növényvédő szerek gyártása a „vegyipari alapanyag és termékgyártás” vegyipari főágazatban foglal helyet. Az Európai Unióban egyre nagyobb mennyiségben használnak fel növényvédő szereket. Magyarországon az elmúlt 50 évben összesen közel 2,4 millió tonna növényvédő szert használtak fel, amelynek csaknem 20 százaléka olyan hatóanyagot tartalmazó készítmény, amely a természetben tartósan megmaradó, ún. perzisztens szerves szennyező anyagot (angol rövidítéssel POP) tartalmaz.

Előzetes felmérések szerint, a mezőgazdasági üzemek a selejtté vált növényvédő szerek nagyobb részét hosszú ideig tárolják, és csak kisebb hányaduk kerül ártalmatlanításra. A növényvédő szer hulladékok, maradékok, csomagolásaik és a lejárt szavatosságú „elfekvő” peszticidek 2001 óta a környezetben tartósan megmaradó szerves szennyező anyagokról szóló - Magyarországon a 2008. évi V. törvénybe kihirdetett - Stockholmi Egyezmény tárgyát képezik. Veszélyes hulladékként bejelentés-kötelesek és ártalmatlanításukról gondoskodni kell.

2. TECHNOLÓGIAI IRÁNYVONALAK MEGHATÁROZÁSA

A növényvédő szerek gyártásának melléktermékeként dioxinok, furánok és a poliklórozott bifenilek képződnek. A dioxinokat valójában a poliklórozott-dibenzo-p-dioxinok és a poliklórozott-dibenzo-furánok vegyületsorozatjai alkotják. A két vegyületsorozatban 210 egymástól eltérő szerkezetű molekula található, 75-135 arányban. Ezek a molekulák különböző kémiai és fizikai-kémiai tulajdonságokkal rendelkeznek, ezáltal különböznek az élő szervezetekre gyakorolt hatásokban is. A dioxinokkal együtt előforduló poliklórozott-bifenilek (PCB-k) több klórt tartalmazó szerves vegyületek, ahol a klóratomok a két benzolgyűrű összekapcsolódásából létrejött bifenilt alkotnak, amely toxikus, mutagén, reprotoxikus, degradációnak ellenálló tulajdonságokkal rendelkezik. Bioakkumulálódik, sőt biomagnifikációra is képes a tápláléklánc mentén. Megállapítható, hogy a növényvédőszer-gyártás melléktermékeinek, csomagolóeszközeinek és hulladékainak kezelése komoly problémát és környezeti kockázatot rejt, ezért nemcsak a növényvédő szerek gyártási folyamatára vonatkozóan (elsődleges technológiai megoldások), hanem hulladékainak,

* egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Vegyipari Gépek Tanszéke

maradékainak és csomagolóeszközeinek kezelési eljárásait illetően is megoldásokat szükséges keresnünk (másodlagos technológiai megoldások). Azaz a fellépő környezeti terhelések és kockázatok redukálására vonatkozóan két fő irányvonalat célszerű követni:

(1) A növényvédőszer-gyártás folyamatának átalakítása a „zöld kémia” jegyében (tisztább termelés technológia).

(2) Megfelelő technológia kidolgozása és optimalizálása a korábban keletkezett, elfekvő és a jövőben keletkező peszticidek kezelésére és ártalmatlanítására vonatkozóan (csővégi technológia).

Jelen cikk a második kutatási irányvonalhoz, ezen belül is a termikus kezelési eljárásokhoz kapcsolódóan szolgál új információkkal. A veszélyes hulladékok termikus kezelését a jogi szabályozás jelenleg ártalmatlanításnak tekinti az Európai Unióban, és ebből adódóan hazánkban is. A növényvédő szer hulladékok, maradékok, csomagolásaik és az elfekvő peszticidek termikus ártalmatlanítási lehetőségeinek gondos vizsgálata kapcsán elengedhetetlen feladat a rendelkezésre álló valamennyi kezelési technológia alapos és komplex összehasonlítása, elsősorban a környezetterhelési, az energiahatékonysági, valamint a gazdaságossági szempontok együttes figyelembe vételével.

3. TERMIKUS ÁRTALMATLANÍTÁSI TECHNOLÓGIÁK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Környezetterhelési és energiahatékonysági szempontból minden termikus ártalmatlanítási technológia előnye természetesen a lerakók tehermentesítése és az előállított energia hő- vagy villamos energia formájában történő hasznosítása. Az égethető szerves, vegyipari hulladékok termikus kezelése során az elsődleges szempont a hulladékban lévő veszélyes anyagok ártalmatlanítása, amely mellett természetes igény a képződő hőenergia kinyerése és hasznosítása is. A termikus ártalmatlanításra irányuló alternatívák összehasonlítását a 3T szabály (time-turbulence-temperature) függvényében célszerű elvégezni. A növényvédőszer-maradékok és csomagolóeszközeik ártalmatlanításának leggyakoribb módját napjainkban a veszélyes hulladékégetőkben történő *hagyományos égetés* jelenti. A hagyományos égetési eljárásokat illetően összefoglalóan elmondható, hogy az egy MWh előállított energia itt jár a legtöbb üvegházhatású gáz kibocsátásával, amit nagyobb nettó energetikai hatások jellemez. A pöttüzelés fosszilis energiaforrásokkal (olaj/földgáz) történik. A szénhidrogének tökéletes égéséhez szükséges tartózkodási idő meglehetősen rövid, illetve nem kívánatos vegyi reakciók (klórkötések lebomlása sósavvá, fém-kloridok, szulfátok képződése) jellemzik a folyamatot. A reakciók során a

bomlástermékekből veszélyes vegyületek (dioxin- és furán származékok, PCDD, PCDF) keletkezhetnek, ezért a keletkező szilárd és gáz halmazállapotú termékek – nem megfelelő füstgáztisztítás, illetve a füstgáztisztítási maradékok helytelen kezelése esetén – sokszor nagyobb veszélyt jelenthetnek környezetünkre, mint maguk a feladásra kerülő hulladékok. E problémák kezelésére „új” *termikus ártalmatlanítási eljárások* számbavétele, mérlegelése, illetve megfelelő és optimális kiválasztása kínálhat megoldást, az adott technológia szerves kémiai hátterének alapos ismeretében. Az új termikus kezelési technológiákat elsősorban a hagyományos égetéssel érdemes összehasonlítani, bár alapvetően a hagyományos égetési technológiák nyújtotta lehetőségek között sem mindig könnyű egy világos sorrendet felállítani. Elsősorban az különbözteti meg őket a hagyományos égetéstől, hogy a hulladék kezelése oxigénszegény, illetve oxigénmentes környezetben történik. Környezetterhelés és energiahatékonyság szempontjából, a *pirolízis és az elgázosítási technológiák* vizsgálata kapcsán megállapítható az, hogy kevés a nagyüzemi, kipróbált technológia és az igazán megbízható adat, ami gátolja az összehasonlíthatóságot. A pirolízissel és a gázosítással kezelt hulladékok fosszilis tüzelőanyagot váltanak ki. Pirolízisnél – anyagában és energetikai úton is – hasznosítható végtermékek (pirogáz, piroolaj) képződnek, és az oxigénhiány miatt kisebb a nehézfém-kibocsátás. A piroolaj felhasználása azonban emisszióval jár, jelentős mennyiségű pirokokszt képződik, a salakban magas a nehézfém koncentráció, s a füstgáztisztítási maradékanyagok ártalmatlanításáról is gondoskodni kell. Az elgázosítás kapcsán a szintézisgáz kalóriaértéke a földgáz alatti értéket képviseli, így a hasznosító üzem működéséhez szükséges energia alig kevesebb, mint a megtermelt gáz energiatartalma. Az elgázosítás talán kiforrottabb technológia, mint a pirolízis. Egyes szakemberek állításai szerint viszont a hamura és egyéb emisszióra megkövetelt értékek a pirolízist és az elgázosítást integráló technológiákra (P&G technológiák) vonatkozóan könnyebben teljesíthetőek, mint a hagyományos égetésnél. A nagyobb energiahatékonyságú integrált technológiák kW-onként jelentős üvegházhatású gáz megtakarítást idéznek elő. A hulladék előkezelése (apritás, szárítás stb.) jelentős energiaigényt és gyakran külső energiaforrást igényel. Igen elgondolkodtató az ultra magas hőmérsékletű pirolízis hőmérséklet tartománya (1200-2000 °C), ahol a szerves anyagok meglágyulnak, összeolvadnak és szilikátos végtermékek képződnek (környezeti hatásuk semleges, hasznosíthatók). Mivel a szerves ipari hulladékok a hagyományos 300-1600 °C között nem bonthatóak le teljes mértékben (és a véggázok nem lekötött klórszármazékokat tartalmaznak), ennél a hulladékáramnál az ultra magas hőmérsékletű pirolízis

hőmérséklet tartományát célszerűbb tovább szűkíteni. A termikus hulladékkezelés egyik ígéretes és sokoldalú lehetősége, a *plazmaeljárás*, amely technológiáról a hazai hulladékgazdálkodás még meglehetősen kevés információval és szakirodalmi háttérrel rendelkezik. A technológiának tudományos érdekességén túlmenően igen jelentős gyakorlati vonzatai is vannak, hiszen a plazmák alkalmazása jelentősen csökkentheti az adott folyamatok energiaigényét. A plazmatechnológia a szerves vegyipar hulladékaira is alkalmazható, ezen belül a növényvédőszer-maradékokra és csomagolóanyagokra is megoldást kínálhat. A plazmás eljárások mind vegyipari alapanyag (szintézisgáz) előállítására, mind energiatermelésre alkalmasak lehetnek. A felhasznált alapanyag tulajdonságaitól, a villamos energia árártól, környezeti megfontolásoktól és természetesen gazdasági szempontoktól függ, hogy egylépcsős (csak plazmában történő) vagy kétlépcsős (az anyag egy részének lebontása alacsonyabb hőmérsékleten végzett pirolízissel a plazmakezelést megelőzően) eljárást alkalmazunk. Amíg a hagyományos hulladékégetők levegővel (80 százalék nitrogén, azaz az égetés szempontjából ballasztanyag) és nagy gázfelesleggel dolgoznak, addig a plazmatechnológiánál sokkal kisebbek a gázáramok. Mivel a hulladékégetők beruházási és működési költségeinek egyik legnagyobb részét a füstgáz-kezelő rendszer kiépítése, illetve működtetése teszi ki, a fentiek figyelembevételével plazma technológiánál e költségek lényegesen alacsonyabbak lehetnek.

A halogénezett aromás szénhidrogének ártalmatlanítása a hagyományos égetőművekben és klinkerégető kemencékben történő együttégetés mellett, katalitikus dehalogénezéssel is történhet. Klórtartalmú aromások ártalmatlanítása célszerűen katalitikus lebontással valósítható meg, ahol fontos szempont a katalizátor megfelelő stabilitása és élettartama. Szükségszerű lenne e területen olyan katalitikus aktivitással rendelkező anyagokat alkalmazni, amelyek az ártalmatlanítás során értékes és klórmentes vegyületeket eredményeznek.

4. ÚJ MODELL FELÁLLÍTÁSA ÁRTALMATLANÍTÁSI TECHNOLÓGIÁK KOMPLEX VIZSGÁLATÁRA

Életciklus-elemzések (LCA) függvényében lehetőség nyílik az egyes ártalmatlanítási technológiák közötti prioritási sorrend felállítására. A környezetmenedzsment egyik legjobban teret hódító rendszereszközének alkalmazása során számszerűsíthető és megbecsülhető az, hogy egy termék teljes élettartama során (előállítás, annak elosztása, felhasználása át a belőle képződő hulladék ártalmatlanításáig) milyen környezeti terheléseket okoz, illetve milyen és mennyi

természeti erőforrást használ fel (beleértve az energiakiadásokat is). Azaz, az LCA az alkalmazásra kerülő ártalmatlanítási technológiák közötti mérlegelést teszi lehetővé. A környezetterhelés, az energiahatékonyság, illetve a gazdaságossági szempontok alapján felállított komplex modellben mérlegelésre kerülnek az adott termikus technológia előnyei és hátrányai. A három szempont vizsgálata kapcsán azonban egy olyan matematikai módszer kidolgozása célszerű, ami az életciklus-elemzés módszere által vizsgált paraméterek mellett, egyidejűleg az időt és a valószínűséget is figyelembe veszi. Az elméleti matematikai statisztika háttérén (relatív gyakoriság-valószínűség) alapuló MATLAB (Matrix Laboratory) speciális programrendszer keretén belül minden egyes környezeti hatás egy termikus ártalmatlanítási folyamat karakterisztikus változóját jelenthetné egy technológiai sorozat keretén belül. Minden vizsgált technológia eredménye egy meghatározott valószínűségű esemény bekövetkezése, vagy be nem következése. MATLAB környezetben lehetőségünk van egyenletes eloszlású véletlen számok generálására zárt intervallumon. Meg kell vizsgálnunk, hogy az egyenletes eloszlással generált véletlen szám hogyan viszonyul egy valószínűség értékéhez, és ennek megfelelően könnyebb döntést hozunk. Természetesen az intervallum szélső értékeit és a szórásnégyzetet is szükséges meghatározni. A kutatómunkát nagymértékben elősegítő, 2011 novemberében piacra került GaBi 5 LCA-szoftver számos előnnyel rendelkezik korábbi társaihoz képest. Egyszerre kínál a felhasználóknak frissített, a 2011-es évre vonatkozó adatbázist; egyszerűsített és gyorsított életciklus modell felépítést; valamint hatékonyabb, interaktív LCA tanulmánykészítő funkciót. A kidolgozásra került komplex modell egyes vizsgálati szempontjainak főbb kulcskérdései, vizsgálati paraméterei és alkalmazható módszerei az alábbiak lehetnek:

Kulcskérdések:

- Emissziók mértéke
- Környezeti megbízhatóság
- Maradékanyagok kezelése
- Energetikai hasznosság
- Értékes alapanyagok kinyerése, hasznosítása
- Technológián belüli recirkuláció
- Költségek, költséghatékonyság
- Megtérülési idő

Vizsgálati paraméterek:

- Input-output anyag- és energiaáramok
- Emissziók
- Energiakinyerési fok
- Energiahatékonyságot javító és gátló tényezők
- Kinyerés, visszanyerés, hasznosítás mértéke

- Befektetett költségek, fenntartási költségek, egyéb költségek

Alkalmazható módszerek:

- Anyag- és energia mérlegegyenletek, folyamatvázlatok
- Sankey-diagram
- Életciklus-elemzés (Life Cycle Assessment, röviden LCA)
- Gazdasági Input - Output LCA (EIO-LCA)
- Költség-haszonelemzés
- Költség-hatékonyságelemzés
- Életciklus költségek elemzése (Life Cycle Cost és Life-Cycle Cost Analysis, röviden LCC és LCCA)

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen kutatási tanulmány környezetterhelési, energiahatékonysági, illetve gazdaságossági szempontok alapján ismerteti és hasonlítja össze a hagyományos és „új” termikus ártalmatlanítási technológiákat a növényvédő szer hulladékok, maradékok és csomagolásaik kapcsán. A szempontok bevezetése során felsorolásra kerülnek a felmerülő kulcskérdések, a vizsgálatok tárgyai és az alkalmazható módszerek. A szempontok bevezetését és bemutatását követően egy olyan kidolgozott, komplex vizsgálati modell kerül ismertetésre, ami napjainkban a környezetvédelem és a környezetmenedzsment területén teret hódító életciklus-elemzés (Life Cycle Assessment, LCA) által vizsgált környezeti hatások mellett, egyidejűleg az időt és a valószínűséget is figyelembe veszi. A különböző LCA szoftverek matematikai programnyelvekkel történő kombinálásával, egy új és a jövőben eredményesen alkalmazható megoldási-döntési irányvonal adható meg a vegyipari környezetvédelem és ezen belül is a vegyipari hulladékok kezelési kérdéseit illetően. Az elemzésre került termikus kezelési technológiák, mint energetikai hasznosítási eljárások a deponálás előtt foglalnak helyet az ún. integrált hulladékpiramisban, de a vizsgált eljárások nem versenyképesek az integrált hulladékgazdálkodás által jobban preferált anyagában történő hasznosítással. (A

hulladék hasznosításával 3-5-ször annyi energiát takarítunk meg, mint amennyit a termikus kezelési eljárásokkal nyerünk). A vizsgált hulladékaromat illetően azonban a preferáltabb megoldások egyszerűen nem jöhetnek szóba. Az ártalmatlanítást illetően még számos kérdés vár feleletre a jövőben. Bizom benne, hogy a folyamatban lévő TÁMOP- 4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt további kutatási eredményei által sikerül további értékes, összevethető következtetéseket levonni mind környezetvédelmi, mind energiahatékonysági, mind pedig gazdaságossági téren. Magyarország meglehetősen kevés információval és szakirodalmi háttérrel rendelkezik az új termikus kezelési technológiák területén, így a rendelkezésre álló információk további bővítése és az esetleges pilot megvalósítások nagy előrelépést jelenthetnének a hazai hulladékgazdálkodás és a vegyipari környezetvédelem területén.

A kutatói tanulmány a TÁMOP- 4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

6. FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] KÓSI K., VALKÓ, L.: Környezetmenedzsment, Typotex Kiadó, 2006.
- [2] MANNHEIM V.: Szerves vegyipari hulladékok termikus kezelése plazmatechnológiával. *Energiagazdálkodás*. 2010. (51. évf.) 3. sz. p. 21-23.
- [3] MANNHEIM V.: Life Cycle Assessment (LCA) a hulladékgazdálkodásban. *Hulladékgazdálkodási Tanácsadó Kézikönyv*. 9. rész/ IV. sz. melléklet. Dashöfer Kiadó. Budapest, 48. aktualizálás, 2011. november. pp. 187-198.
- [4] MANNHEIM V.: Veszélyes peszticidek kezelése. Növényvédőszer-maradékok és csomagolásaik ártalmatlanítása termikus kezeléssel. I.-II-III. rész. *Zöld Ipar Magazin*. Hulladékgazdálkodás, megújuló energia és környezetvédelem szakmai lapja. 12 (2011) Nr. 3, 4, 11.

Köszönet a lektoroknak

A GÉP jelen számában szereplő cikkek lektoráltak. Ezúton is köszönetet mondunk a lektoroknak a szakmai segítségükért. Dr. Bányai Tamás, Bokros István, Bordás Róbert, Dr. Csernák Gábor, Dr. Döbröczöni Ádám, Dr. Dömötör Ferenc, Dr. Farkas József, Dr. Fáy Árpád, Dr. Gyulai László, Dr. Hornyák Margit, Dr. Kovács Béla, Dr. Kovács György, Dr. Kovács Miklós, Dr. Mikó Balázs, Dr. Molnár András, Dr. Orbán Ferenc, Dr. Rác Pál, Dr. Szabó Ferenc, Dr. Szemmelweisné Dr. Hodvogner Katalin, Dr. Szirbik Sándor, Dr. Varga Gyula

Köszönet a támogatóknak

Ezúton mondunk köszönetet TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt kapcsán a támogatásért, mely az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg a Miskolci Egyetemen. Továbbá a Fireplace Kft., a FUX Zrt., SAVACAD Vegyipari Gépészeti Kft., valamint a Froweld Kft. támogatását szintén nagyon köszönjük.

HŐÁTADÁSI TÉNYEZŐK KÖZVETETT MEGHATÁROZÁSA DUPLIKATÚRÁS KÉSZÜLÉKEK KÖPENYTERÉBEN

INDIRECT DETERMINATION OF THE CONVECTIVE HEAT TRANSFER COEFFICIENTS IN JACKETED REACTOR SHELL CHAMBER

Venczel Gábor*, Dr. Szepesi Gábor**, Dr. Siménfalvi Zoltán***

ABSTRACT

During the heat transfer process the convective heat transfer coefficients can be determined if adequate data are available. In the relevant literature we found empirical equations for the mixture tank with jacket cooling. In this paper we show two methods to calculate the convective heat transfer coefficients.

A rendelkezésre álló adatok alapján azt feltételezzük, hogy a munkatérben a fal mentén kialakuló kevert folyadékszint magassága megegyezik a köpenyben a hűtővíz szintmagasságával. Az adathalmaz tehát az alábbi quasi-stacioner összetartozó adatokat tartalmazza: a köpenytérbe érkező hűtővíz hőmérséklete (t_{Hbe}), a köpenytérből kilépő hűtővíz hőmérséklete (t_{Hki}), a hűtővíz térfogatárama (H) és a munkatér hőmérséklete (t_R).

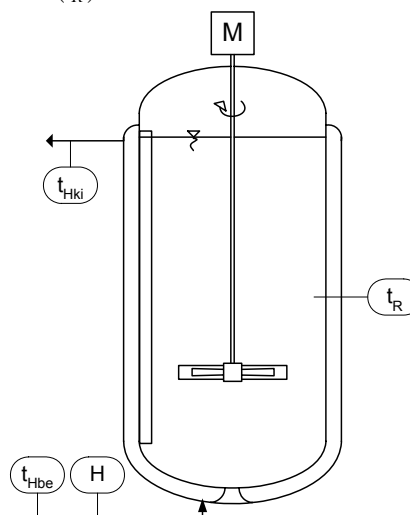
1. BEVEZETÉS

A hőátviteli folyamatok számítása során a hőátadási tényezők kritériális egyenletekből határozhatók meg, amennyiben a szükséges geometriai és műveleti adatok, valamint az anyagtulajdonsági jellemzők rendelkezésre állnak. Az 1. ábrán vázolt duplikatúrás keverős készülék hőátviteli folyamatának a jellemzésére mindössze négy mért adat áll a rendelkezésünkre. A cikkben egy olyan számítási eljárást ismertetünk, amely segítségével a mért üzemi adatokból meghatározhatóak a hőátadási tényezők.

2. A VIZSGÁLT KÉSZÜLÉK JELLEMZÉSE

A munkatérben lejátszódó reakció exoterm folyamat, ezért a reakcióhőt el kell távolítani, hogy a munkatér hőmérséklete az előírt érték legyen. A szabad készülék felületektől eltekintve a berendezésből az energia elvonás a duplikatúrán keresztül valósul meg. A munkatér állandó hőmérséklete a köpenytérbe érkező t_{Hbe} hőmérsékletű hűtővíz mennyiségének szabályozásával biztosított. A szabályozókörök és mérőberendezések regisztrált értékeiből nagy mennyiségű diszkrét mérési adatok képezik az elemzés alapját.

A munkatér homogenitását lapkeverő biztosítja, melynek fordulatszámát a folyamat alatt végig állandó.



1. ábra. A vizsgált készülék modellje

3. HÖELVONÁS A KÉSZÜLÉKBŐL

A készülékből időegység alatt elvont energia (\dot{Q}) (hőáram) az energiaegyenletből számítható. A számítással meghatározható, hűtővízzel elvont energia nemcsak a készülék belső teréből elvont hőt, hanem a környezettel érintkező falon keresztül elvont hőt is tartalmazza. Elvégzett számításaink szerint ez az érték az elvont energia 1-2 %-a, és ezért elhanyagolhatjuk. A

* tanársegéd, Miskolci Egyetem, Vegyipari Gépek Tanszéke

** egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Vegyipari Gépek Tanszéke

*** egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Vegyipari Gépek Tanszéke

felületi hőcserélők alapegységéből a köpeny közepes hőátadó felülete (A_h) és a hőmérsékletesés (Δt_{ln}) ismeretében a hőátviteli tényező (k) meghatározható [3].

A hőátviteli tényező értékét a hőátvitelben szerepet játszó három részfolyamat határozza meg:

- a munkatérben lévő közeg és a köpenyfal közötti hőátadás (α_b),
- a köpenyfal hővezetése $\left(\sum_{i=1}^2 \frac{s_i}{\lambda_i} \right)$,
- a köpenyfal és a hűtővíz közötti hőátadás (α_k).

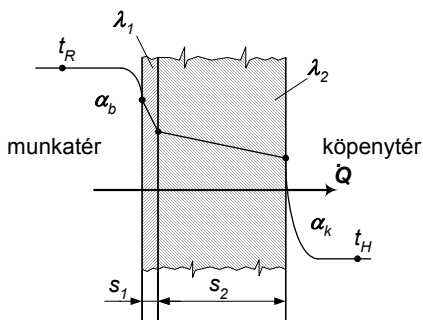
A többretegű hengeres falra vonatkozó (1) egyenletből a készülék hőátviteli tényezője meghatározható:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_b \cdot \frac{A_b}{A_h}} + \sum_{i=1}^2 \frac{s_i}{\lambda_i \cdot \frac{A_i}{A_h}} + \frac{1}{\alpha_k \cdot \frac{A_k}{A_h}}} \quad (1)$$

ahol:

- α_b a munkatérre jellemző hőátadási tényező;
- α_k a köpenytérre jellemző hőátadási tényező;
- s_i a készülékfal i -edik rétegének a vastagsága;
- λ_i a készülékfal i -edik rétegének a hővezetési tényezője;
- A_b a készülék belső hőátadó felülete;
- A_k a készülék külső hőátadó felülete;
- A_i a készülékfal i -edik rétegének közepes hőátadó felülete.

A (1) összefüggésben szereplő, a köpenyfalra vonatkozó értékek állandóak, a munkatéri és a köpenyoldali hőátadási tényezők az üzemeltetési körülményektől függően változóak lehetnek. A 2. ábrán a jellemző hőmérsékletváltozás látható a köpenyben és a környezetben.

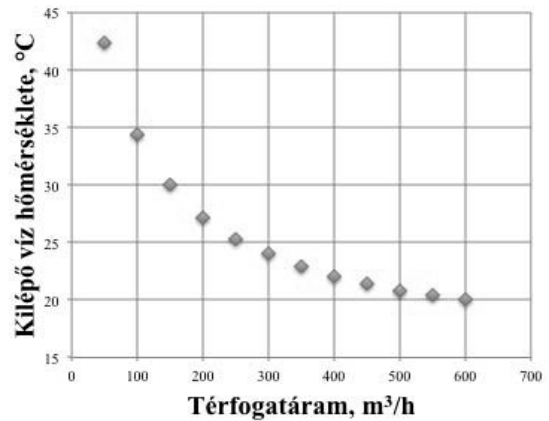


2. ábra. Hőmérsékletváltozás a köpenyben

4. HŐÁTADÁSI TÉNYEZŐK MEGHATÁROZÁSA

Az időegység alatt elvont hő mennyisége természetesen függ a hűtővíz mennyiségétől, ezáltal a hőátviteli tényező értéke is függ tőle [3]. Az (1) összefüggést megvizsgálva ez azt jelenti, hogy a hőátviteli tényező változását a külső hőátadási tényező változása eredményezi.

Nyilvánvaló, hogy a belső hőátadási tényező a folyamat során állandónak tekinthető. A köpenytéri hőátadási tényezőjének meghatározására a szakirodalom igen sok összefüggést közöl. A Reynolds-szám (Re) a hűtővíz térfogatáramának a függvényében számolható.



3. ábra. Kilépő hűtővíz hőmérsékletének változása

Feltételezve, hogy a köpenytérben turbulens áramlás alakul ki, a hőátadási tényező meghatározására a turbulens áramlásra vonatkozó (2) kritériális összefüggést közöljük.

$$Nu = A \cdot Re^B \cdot Pr^C \cdot \left(\frac{\eta}{\eta_{fal}} \right)^D \quad (2)$$

ahol: Nu Nusselt-szám: $Nu = \frac{\alpha_k \cdot d_e}{\lambda}$

Pr Prandtl-szám: $Pr = \frac{c \cdot \eta}{\lambda}$

A, B, C, D állandók.

A hőátviteli tényező meghatározására vonatkozó (1) összefüggés átalakításával nyerhető (3) kifejezést alapul véve következtetés vonható le a hőátadási tényezőkre.

$$\frac{1}{A_h \cdot k} - \sum_{i=1}^2 \frac{s_i}{A_i \cdot \lambda_i} = \frac{1}{A_b \cdot \alpha_b} + \frac{1}{A_k \cdot \alpha_k} \quad (3)$$

A köpenytéri hőátadási tényező a (2) összefüggés alapján a Nusselt-számból számítható. Az anyagjellemzőket állandónak tekintve az α_k a köpenytérbe belépő hűtővíz térfogatáramától függ:

$$\alpha_k = E \cdot \text{Re}^B \quad (4)$$

A (4) összefüggésben az E állandó az anyagi jellemzőkből és a geometriai méretekből adódó érték, a B állandó az köpenytérbe belépő H térfogatáramból adódó sebesség hatványkitevője.

Az α_b belső hőátadási tényező állandónak tekinthető. Bevezetve a

$$y = \frac{1}{A_h \cdot k} - \sum_{i=1}^2 \frac{s_i}{A_i \cdot \lambda_i} \quad (5)$$

$$x = \frac{1}{\text{Re}^B} \quad (6)$$

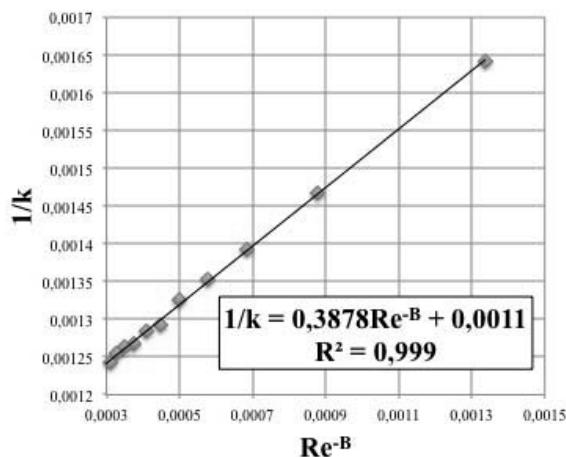
$$a = \frac{1}{A_k \cdot E} \quad (7)$$

$$b = \frac{1}{A_b \cdot \alpha_b} \quad (8)$$

jelöléseket a (4) összefüggés a következő formában írható fel:

$$y = a \cdot x + b \quad (9)$$

A (9) összefüggés lehetőséget teremt arra, hogy ismert, összetartozó y_i és x_i értékek esetén az a és b állandók a regressziós egyenes segítségével meghatározhatók legyenek. A vonatkozó szakirodalom a Reynolds-szám hatványkitevőjére $B = 0,8$ értéket javasol ([4] 103. old.). Esetünkben – téglalap keresztmetszetű áramlási csatornában – a kitevő értéke $B = 0,61$ -re adódott.



4. ábra. Regressziós egyenes

A számítások eredményét a 4. ábrán mutatjuk be. Az ábrán feltüntettük a hőátadási tényező számításához

szükséges állandók regresszióval meghatározott értékeit.

A (3-9) és a meghatározott regressziós egyenes egyenletekből a köpenytéri hőátadási tényező a köpenytérbe belépő térfogatáram függvényében meghatározható. A munkatéri hőátadási tényező b ismeretében számítható a (8) összefüggésből.

5. HŐÁTADÁSI TÉNYEZŐ MEGHATÁROZÁSA KRITÉRIÁLIS EGYENLETEK SEGÍTSÉGÉVEL

A hőátviteli tényező (k) számítása során a hőátadási tényező meghatározása nehézségekbe ütközhet. A problémát az okozza, hogy a hőátadási tényező nem csupán az áramló közeg anyagi tulajdonságaitól, hanem az áramlási viszonyoktól, sebességi állapottól és hőmérséklettől is függ. A vegyipari és áramlástan műszaki gyakorlatban általánossá vált, hogy mérések segítségével, hasonlósági kritériumokból előállított kritériális egyenlettel írjuk le a keresett függvényt. Ezen eljárást felhasználva, a (2)-es egyenlet segítségével közelítő függvényt állítunk fel a köpenytéri hőátadási tényező meghatározására. A keresett függvény:

$$\text{Nu} = A \cdot \text{Re}^B \cdot \text{Pr}^C \quad (10)$$

ahol a keresett paraméterek: A, B, C állandók.

A fenti ismeretlen paraméterek meghatározásához a legkisebb négyzetek módszerét alkalmazhatjuk. Matematikailag megfogalmazva, az alábbi feltételes szélsőérték feladat megoldását keressük:

$$\psi(A, B, C) = \sum_{i=1}^n (\text{Nu}_{m,i} - \text{Nu}_{c,i})^2 \rightarrow \min \quad (11)$$

ahol $\text{Nu}_{c,i} = A \cdot \text{Re}_i^B \cdot \text{Fr}^C$ a keresett paraméterekből számolt Nu-szám, míg a $\text{Nu}_{m,i}$ az i -ik mérési ponthoz tartozó Nu-szám.

A megoldandó algebrai egyenletrendszer:

$$\frac{\partial \psi(A, B, C)}{\partial A} = 0, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \psi(A, B, C)}{\partial B} = 0, \quad (13)$$

$$\frac{\partial \psi(A, B, C)}{\partial C} = 0, \quad (14)$$

A feltételek: $A, B, C \neq 0, A, B, C > 0$.

A differenciálhányadosok (15-17):

$$\frac{\partial \psi}{\partial A} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n (Nu_{m,i} - [A' + B \ln Re_i + C \ln Pr_i]) = 0$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial B} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n (Nu_{m,i} - [A' + B \ln Re_i + C \ln Pr_i]) \cdot \ln Re_i = 0$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial C} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n (Nu_{m,i} - [A' + B \ln Re_i + C \ln Pr_i]) \cdot \ln Pr_i = 0$$

ahol $A' = \ln A$.

A feltételeket vektoros alakban írva:

$$g(X) = [-A \quad -B \quad -C]^T < 0 \quad (18)$$

Formálisan a feltételes szélsőérték feladat:

$$\psi(X) \rightarrow \min, \quad g(X) < 0 \quad (19)$$

A megoldáshoz használható a büntetőfüggvényes technika:

$$\Phi(X, \sigma) = \psi(X) + \sigma \sum_{y=1}^c \{ \max(g_y(X), 0) \}^2 \quad (20)$$

Az eljárás konvergens, ha σ sorozatnak a $\sigma_k = 10^{k-1}$ -et választunk.

A feladat megoldásához Matlab eljárást készítettünk, mely a Nelder-Mead eljárást használja az egyenletrendszer megoldásához. A szélsőérték feladat megoldása szolgáltatja az alábbi kritériális egyenletet a külső hőátadási tényező számításához szükséges Nu-szám meghatározására:

$$Nu = 0,21 \cdot Re^{0,633} \cdot Pr^{0,326} \quad (21)$$

A mért és számított eredmények közötti különbséget az 1. táblázatban foglaltuk össze. A táblázatból látható, hogy a (21) egyenlettel meghatározott Nu és a mért értékek közötti különbség 5%-nál kisebb.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A hőátviteli folyamatok számítása során a hőátadási tényezők kritériális egyenletekből határozhatók meg, amennyiben megfelelő adatok állnak rendelkezésre. Köpenyhűtéssel ellátott keverős készülékekre vonatkozó összefüggések az ide vonatkozó irodalomban megtalálhatóak, amelyek esetünkben pontosításra

szorultak. Bemutattunk egy módszert, amellyel meghatározhatóak a hőátadási tényezők mérési adathalmaz segítségével. Megalkottunk egy olyan kritériális egyenletet, amely alkalmas köpenytéri, téglalap keresztmetszetű áramlási csatorna hőátadási tényezőjének meghatározására.

| Ssz | Re | Nu _m | Nu _c | Hiba |
|-----|---------|-----------------|-----------------|--------|
| 1 | 51 323 | 390,36 | 378,64 | 3,01% |
| 2 | 102 647 | 592,00 | 587,15 | 0,82% |
| 3 | 153 970 | 761,76 | 758,93 | 0,38% |
| 4 | 205 293 | 891,41 | 910,49 | -2,14% |
| 5 | 256 617 | 1014,84 | 1048,60 | -3,33% |
| 6 | 307 940 | 1222,29 | 1176,86 | 3,72% |
| 7 | 359 263 | 1282,33 | 1297,47 | -1,18% |
| 8 | 410 587 | 1449,59 | 1411,89 | 2,60% |
| 9 | 461 910 | 1492,64 | 1521,17 | -1,91% |
| 10 | 513 233 | 1599,56 | 1626,06 | -1,66% |
| 11 | 564 557 | 1747,73 | 1727,17 | 1,18% |
| 12 | 615 880 | 1828,94 | 1824,96 | 0,22% |

1. táblázat. Eredmények

A kutatói tanulmány a TÁMOP- 4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

7. IRODALOM

- [1] E.E. Wilson, A basis of rational design of heat transfer apparatus, ASME Journal of Heat Transfer 37 (1915) 47–70.
- [2] W. Nusselt, Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes, Z. Ver. Dt. Ing. 60 (1916) 541–546.
- [3] VENCZEL G.: Hőelvonás polimerizációs reaktorból. Miskolci Egyetem Doktoranduszok Fóruma, Miskolc, 2003.
- [4] Donald Q. KERN: Process Heat Transfer. New York, McGraw-Hill Book Company, Inc., 1950.
- [5] H.F. Khartabil, R.N. Chistensen, D.E. Richards, A modified Wilson plot technique for determining heat transfer correlations, UK National Conference on Heat Transfer 2 (1998) 1331–1357.
- [6] T.B. Styrylska, A.A. Lechowska, Unified Wilson plot method for determining heat transfer correlations for heat exchangers, ASME Journal of Heat Transfer 125 (2003) 752–756.

CONTENTS

1. Kamondi L.
Innovative mechanical engineering product development 3
Quick and economic solution of the product functions needs large research works and strict quality management. In this paper some most important subjects of development- methodology and function- solution are presented, which can offer the possibility of application and orientation for the developers.
2. Ecsedi I., Baksa A.
Analytical solution of a one-dimensional steady state heat conduction problem 9
A one-dimensional steady state heat conduction problem is formulated and its analytical solution is presented. The considered one-dimensional structural component consists of straight and circular arc bar segments. The heat is generated within the solid as a result of an applied constant voltage difference. The generated heat by the constant voltage heat source is assumed to be dissipated by convection into a medium at a constant temperature.
3. Daróczy L., Jármai K.
Automatization of design of frame and truss structures using topology optimization..... 13
The current article proposes a method to fully automatize the design of truss and frame structures using topology optimization, image interpretation and finally through a sizing problem, and focuses especially on the image interpretation part by introducing a flexible and fast method to extract the cross-section and number of joints, and the number, location and type of connections between them. Finally, some examples are presented in 2D and 3D for the image interpretation.
4. Dúl R., Palotás Á.B., Jármai K., Barkóczy P.
Development of heat exchanger for domestic fireplace to preheat air for burning..... 19
In this paper authors describe the methodology used for finding an optimum solution for a welded steel heat exchanger mounted on a domestic fireplace. The heat exchanger is used to preheat the primary and secondary air necessary for burning wood logs in the fireplace. The optimization process is combined with Computational Fluid Dynamics simulation to calculate values of design variables and the aim function.
5. Farkas J., Jármai K.
Volume and cost minimization of a tubular truss with displacement constraint 23
The minimum volume and cost of a simply supported planar truss with N-type bracing is optimized. The lower chord of the truss is horizontal, but the symmetric upper chord parts are non-parallel and their inclination angle as well as the cross-sectional area of CHS (circular hollow section) rods are optimized.
6. Jármai K., Farkas J.
Minimum cost design of a cellular plate under unidirectional compression..... 29
Cellular plates consist of two cover plates and stiffeners between them. Half I-beams employed as stiffeners for fabrication purposes. The cells are very rigid, due to their high torsional rigidity. In case of unidirectional compression overall buckling constraint comes from the Huber equation. Two optimization methods have been used, the PSO, Particle swarm optimization and the IOSO, response surface methods.
7. Kota L.
Comparison of genetic programming and taboo search at the optimization of technical inspection and maintenance systems 33
This paper describes a comparison between single phase genetic programming algorithm for the fixed destination multi-depot multiple travelling salesman problem with multiple tours (mmTSP) and the generalized taboo search algorithm. This article shows the advantage of the developed genetic programming algorithm through numerous tests.
8. Kovács Gy.
Optimal design of a composite sandwich structure ... 37
This study shows the optimization method of a new complex structural model [laminated carbon fiber reinforced plastic (CFRP) deck plates with polystyrene foam (EPS) inner layer]. The structure was designed for both minimal cost and minimal weight taking into consideration 6 design constraints.
9. Vírág Z., Jármai K.
Fatigue design of stiffened plates for different shapes of ribs 41
In this overview of compressed stiffened plates with various shapes of ribs a special cost analysis has been investigated. Recommendations on fatigue of welded components of the IIW are investigated for the compressed plate. The unknown is the number of stiffeners in the optimization. The trapezoidal stiffeners had the best performance.
10. Mannheim V.
Priority order for thermic treatment processes with complex model by pops wastes..... 45
There are green chemistry methods and some other treatment approaches for decreasing the quantity of the organic industrial waste, but currently thermic treatment processes are the most popular alternatives. This paper summarises thermic utilisation processes with a comparison between the different technologies, stressing factors affecting their applicability and operational suitability.
11. Venczel G., Szepesi G., Siménfalvi Z.
Indirect determination of the convective heat transfer coefficients in jacketed reactor shell chamber..... 49
During the heat transfer process the convective heat transfer coefficients can determinate if adequate data available. In the relevant literature we found criterial equations to the mixture tank with jacket cooling. In this paper we show two methods to calculate the convective heat transfer coefficients.

GÉP

INFORMATIVE JOURNAL

for Technics, Enterprises, Investments, Sales, Research-Development, Market of the Scientific Society of
Mechanical Engineering

Dr. Döbröczöni Ádám

President of Editorial Board

Vesza József

General Editor

Dr. Jármai Károly

Dr. Péter József

Dr. Szabó Szilárd

Deputy

Dr. Barkóczy István

Bányai Zoltán

Dr. Beke János

Dr. Bercsey Tibor

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Dudás Illés

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Kármán Antal

Dr. Kulcsár Béla

Dr. Kalmár Ferenc

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Pálkás István

Dr. Patkó Gyula

Dr. Péter László

Dr. Penninger Antal

Dr. Rittinger János

Dr. Szabó István

Dr. Szántó Jenő

Dr. Tímár Imre

Dr. Tóth László

Dr. Varga Emilné Dr. Szűcs Edit

Cooperation in the editing:

Dr. Jármai Károly

Dear Reader,

The second issue of the journal Gép contains those researches in continuation of the first issue, which are elaborated in the 4th Centre of Excellence, entitled Innovative Mechanical Engineering Design and Technologies at the University of Miskolc and made within the framework of the TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 project supported by the European Union and co-funded by the European Social Fund. The activity of the Centre of Excellence is serving the research, development, innovation and the education. The Centre aim is to develop the research potential by research in which innovative modelling, design and technological processes are implemented. This is in line with the European Union's drive to encourage innovation in the most efficient way, using environmentally friendly technologies and improve them.

The Centre of Excellence is divided into seven Scientific Workshops, which are department related. These are: Mechanical Technology, Production Engineering, Fluid and Heat Engineering, Chemical Machinery, Mechanics, Machine and Product Design and Materials Handling and Logistics Departments. The teachers involved BSc, MSc and PhD students into the research, so that they provide a good opportunity to young people to familiarize themselves with the scientific work. During the three-quarter-year of operation of the Centre of Excellence several students already provided outstanding performance and quality of so called TDK (Science Student Team) works.

The question arises that where the results can be applied? Within the Scientific Workshops there are twenty R & D topics, which are very diverse. Some of them approached the basic research, while others are more applicable in practice, some results were already visible, while others promise long-term results. In order to make these achievements to professional audiences available a considerable number of publications produced by researchers and reported in national and international conferences, national and international professional journals. Of course, the results are incorporated into the education. These articles in this journal serve the purpose to show the Scientific Workshops' latest scientific results in the Centre of Excellence.

Prof. Dr. Károly Jármai

leader of the Center of Excellence

Managing Editor: Vesza József. Editor's address: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.
Postage-address: 3501. Pf. 55. Phone/fax: (+36-46) 379-530, (+36-30) 9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Published by the Scientific Society of Mechanical Engineering, 1027 Budapest, Fő u. 68.

Postage-address: 1371, Bp, Pf. 433

Phone: 202-0656, Fax: 202-0252, E-mail: a.gaby@gteportal.eu, Internet: www.gte.mtesz.hu

Responsible Publisher: Dr. Igaz Jenő Managing Director

<http://www.gepujsag.hu>

Printed by Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67.

Price per month: 1260 Ft.

Distribution in foreign countries by Kultúra Könyv és Hírlap Külkereskedelmi Vállalat H-1389

Budapest, Pf. 149. and Magyar Média H-1392 Budapest, Pf. 272.

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

All articles are peer reviewed.