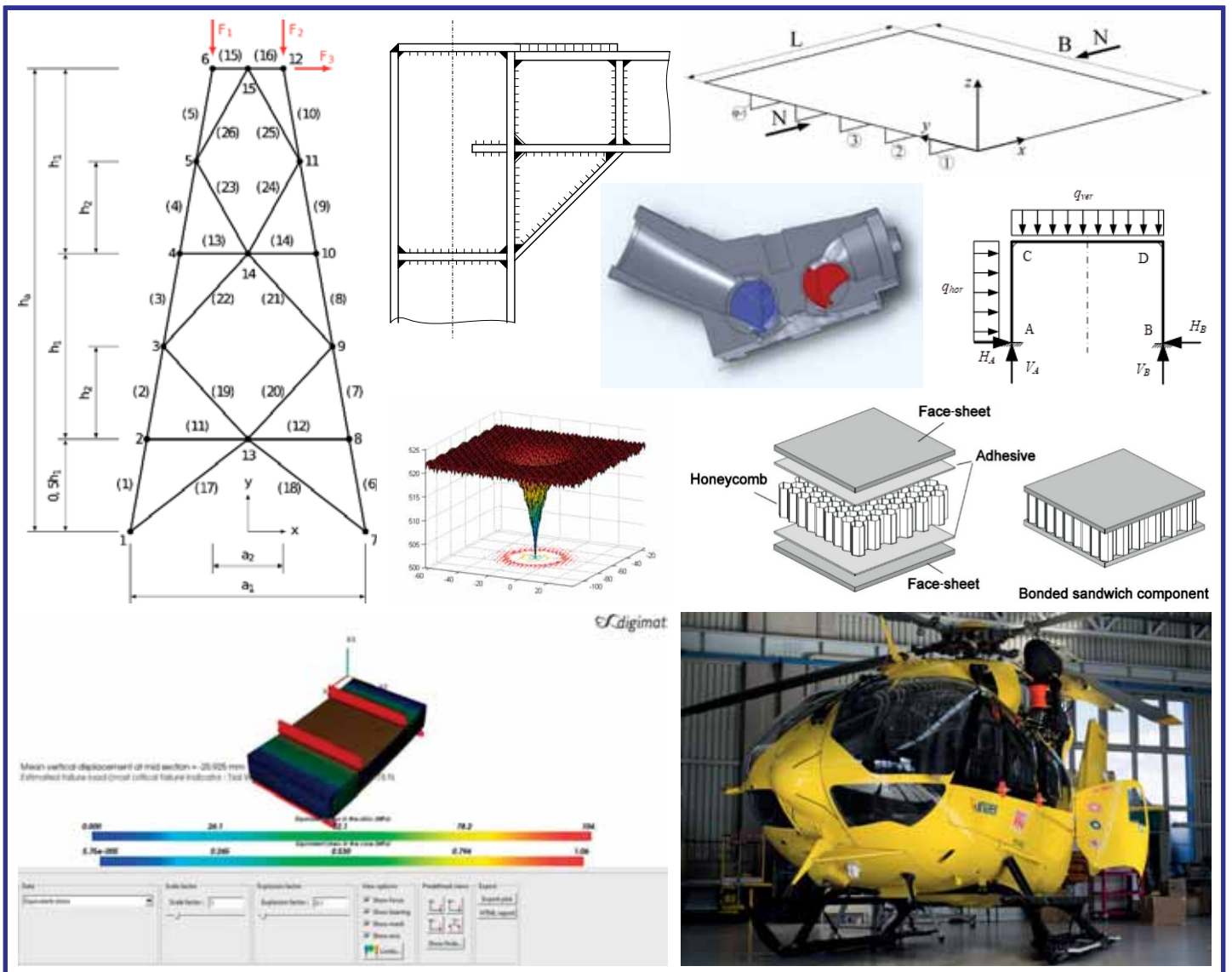


GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET MŰSZAKI FOLYÓIRATA





4th International Conference on Vehicle and Automotive Engineering VAE2022

2022. szeptember 8-9. Miskolc, Hungary



Call for papers

Örömmel meghívjuk Önt a 4. Nemzetközi Jármű- és Autómérnöki Konferenciára (VAE2022), ami 2022. szeptember 8. és 9. között lesz Miskolcon online. A konferencia célja, hogy összehozza a tudományos és ipari területek szakértőit, és bemutassa e területek fejlődését. A konferencia az előzőekhez hasonlóan egy, a Nemzetközi Hegesztési Intézethez (IIW) kapcsolódó rendezvény.

A konferencia főbb témái:

- | | |
|---------------------------------------|--|
| A. Hagyományos hajtáslánc és emisszió | H. Aktív és passzív biztonság |
| B. Alternatív hajtásláncok | I. Fenntarthatóság |
| C. Járműdinamika | J. Oktatás |
| D. Anyagok és gyártás | K. Járműszerkezetek és felületek tervezése |
| E. Járműelektronika | L. Optimalás |
| F. Autonóm járművek | M. Hegesztés |
| G. Zaj és rezgés | N. Több csuklós szerkezetek |

Cikkek megjelentetése

Minden cikk szakértőkkel lektorált. Az elfogadottak a Springer Verlag által kiadott, a Scopus által indexált *Lecture Notes in Mechanical Engineering* sorozatban jelennek meg, akár csak a korábbi konferenciákon (<https://www.springer.com/gp/book/9789811595288> <https://www.springer.com/gp/book/9783319756769>, <https://www.springer.com/gp/book/9783319511887>). A Kiadvány Scopus indexált, Q3/Q4 besorolású. A Kiadványokat eddig összesen 291 ezren töltötték le. A cikkek a Konferencia kezdésekor minden regisztrált résztvevő számára elektronikus úton elérhetőek lesznek. A beküldött cikkeknek eredetinek kell lenniük, máshol nem publikálnak. A cikk hossza minimum 6 oldal, maximum 16 oldal, a template szerint. Az előadást a szerzőnek meg kell tartania. A konferenciát **online** tervezzük a vírushelyzettől függően.

Határidők

Esemény	Határidő
Absztrakt benyújtása	2022. január 26.
Absztrakt elfogadása	2022. február 11.
A teljes cikk benyújtása	2022. március 25.
Teljes cikk elfogadása	2022. április 29-én.
Részvételi díj fizetés	2022. május 16.
Konferencia	2022. szeptember 8-9.

A konferencia nyelve angol. Az absztrakt szövegnek 300 és 500 szó között kell lennie. Konferencia díja: 149 – 249 Euro/fő (online, egy vagy két cikk), egy dolgozat 6-16 oldal között.

További információ:

Prof. Dr. JÁRMAI, Károly
Miskolci Egyetem
H-3515 Miskolc, Egyetemváros
Tel. +36-46-565111 ext 2929
Fax. +36-46-563399

A konferencia honlapja

<http://vae2022.uni-miskolc.hu>

E-mail: vae2022@uni-miskolc.hu



GÉP

A GÉPIPARI TUDOMÁNYOS EGYESÜLET

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

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Dr. Döbröczöni Ádám

elnök

Vesza József

főszerkesztő

Dr. Jármái Károly

Dr. Péter József

Dr. Szabó Szilárd

főszerkesztő-helyettesek

Dr. Barkóczi István

Bányai Zoltán

Dr. Beke János

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Dr. Kalmár Ferenc

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Pálincás István

Dr. Patkó Gyula

Dr. Péter László

Dr. Penninger Antal

Dr. Szabó István

Dr. Szántó Jenő

Dr. Szűcs Edit

Dr. Tímár Imre

Dr. Tóth László

TISZTELT OLVASÓ!

A Miskolci Egyetemen a 4-es Kiválósági Központ keretében *Innovatív Járműmérnöki, Energetikai és Gépészeti Tervezés és Technológiák* címmel folynak kutatások. A központ célja a kutatási potenciál fejlesztése olyan kutatásokkal, amelyek innovatív modellezést, tervezést és technológiai folyamatokat valósítanak meg, összhangban az Európai Unió azon törekvésével, amely az innováció serkentésére, a leghatékonyabb környezetbarát technológiák alkalmazására és fejlesztésére irányul. A Kiválósági Központ szeretné az elért eredményeket továbbfejleszteni, újakkal bővíteni. Az Áramlás- és hőtechnikai kísérleti és numerikus vizsgálatok tudományos műhelyhez, valamint Mérnöki tartó- és vázszerkezetek optimális méretezése tudományos műhelyhez kötődő kollégák cikkeinek gyűjteményét adjuk közre ebben a számban.

A 2016-ban a Miskolci Egyetemen elindult járműmérnök képzés új kihívásokat teremtett. Az új doktoranduszok, akik részben a Stipendium Hungaricum keretében érkeztek hozzánk szintén lendületet adtak bizonyos területeken. Ezen új irányok és eredmények bemutatását kívánjuk részben ezzel a folyóiratszámunkkal is megvalósítani.

A cikkek túlnyomó része az Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet tanszékeihez kötődik. A szakmai spektruma igen széles: áramlástechnika, szelepek, hőszivattyú, méhsejtvázás jármű panel, bordázott lemezek, keretszerkezetek, rácsos tartók, optimaló algoritmusok.

A cikkekben ismertetett kutató munka részben az EFOP-3.6.1-16-2016-00011 jelű „Fiatalodó és Megújuló Egyetem – Innovatív Tudásváros – a Miskolci Egyetem intelligens szakosodást szolgáló intézményi fejlesztése” projekt részeként – a Széchenyi 2020 keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg. 2022-ben még egy fontos indikátora van a projektnek: a végzett doktoranduszok száma. A folyóirat ezen száma ezt a célt is szolgálja, hogy a végzés előtt álló, végzésre készülő doktoranduszok doktori eljárása sikeres legyen.

Az utolsó két cikk nem része a Miskolci Egyetem Kiválósági Központja publikációs termésének.

*Prof. Dr. Jármái Károly
a Kiválósági Központ vezetője*

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

Telefon: +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Kiadja a Gépipari Tudományos Egyesület, 1147 Budapest, Czobor u. 68., Levélcím: 1371 Bp. Pf.: 433.

Telefon: +36-1/202-0656, fax: +36-1/202-0252, e-mail: mail@gteportal.eu, internet: www.gteportal.eu

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

Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Felelős kiadó: Dr. Bárdos Krisztina ügyvezető igazgató.

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Telefon: +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Előfizetésben terjeszti a Magyar Posta Zrt. • Postacím: 1900 Budapest

Előfizetésben megrendelhető az ország bármely postáján, a hírlapot kézbesítőknél, www.posta.hu WEBSHOP-ban (<https://eshop.posta.hu/storefront/>), e-mailel a hirlapelofizetes@posta.hu címen, telefonon +36-1-767-8262 számon, levélben a MP Zrt. 1900 Budapest címen. Külföldön terjeszti a Batthyány Kultur-Press Kft., H-1013 Budapest, Attila út 2/A/III/14.

T: +36 1 201 88 91, +36 1 212 53 03, E-mail: batthyany@kultur-press.hu

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

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

A megjelent cikkek lektoráltak.

A kiadvány a Nemzeti Kulturális Alap támogatásával jelenik meg.

TARTALOM

1. BUKÓÖRVÉNYLÉSI-ARÁNY VIZSGÁLATA KÉT ELTÉRŐ MOTOR SZELEPVEZÉRLÉS ESETÉN

Kovács László, Dr. Szabó Szilárd, Dr. Bolló Betti5
Egy újonnan kialakított szeleprendszer kiváló paramétereinek bemutatása érdekében összehasonlító numerikus szimulációkat végeztek. A lengőszelepes konstrukcióval elérhető kedvezőbb örvénytér elősegíti a réteges töltésű motorokban a szükséges keverékrétegződés kialakulását, miközben a szeleprendszer alkatrészeinek elrendezése nem korlátozza a hengerbe ömlő friss keverék mennyiségét. Ezáltal könnyebben megvalósítható egy olyan erőforrás, amely a szükséges motorjellemzőket csökkentett löketterfogással, ám egyéb segédberendezések használata nélkül (pl. turbó) valósítja meg, viszonylag alacsony előállítási költségek mellett.

2. HŐSZIVATTYÚ A JÖVŐBEN

Hornják Gábor, Bozay Péter11
A hőszivattyús rendszerek gazdaságos alternatívákat kínálnak a különböző forrásokból származó hő visszanyerésére különféle ipari, kereskedelmi és lakossági alkalmazásokhoz. A hőszivattyúk teljesítményének, megbízhatóságának és környezeti hatásainak javítása folyamatos fejtörést okoz a szakemberek számára. A cikk bemutatja a hőszivattyús rendszerekben a közelmúltban elért fejlődési eredményeket, a megvalósítás és az alkalmazás lehetőségeit és előnyeit.

3. TÁVVEZETÉK-TORONY OPTIMÁLÁSA EVOLÚCIÓS ÉS VEM TECHNIKÁVAL

Nagy Szilárd, Dr. Jármái Károly, Dr. Baksa Attila17
Távvezeték tartó torony optimalizálását mutatja be ez a tanulmány. Az optimalizálás a virágbeperzsi algoritmus segítségével történik. A célfüggvény a szerkezet tömege. A tervezési kényszerek a statikus feszültség, a helyi csavarodás és a csavarodás. Az ismeretlenek a kör alakú üreges szelvényű tartószerkezet jellemző méretei. Parametrikus vizsgálatokat végeztek az anyag folyáshatárának és a rácsosztások számának változtatásával. Az eredmények azt mutatják, hogy a nagyobb folyáshatárú acélok használata nem jelent könnyebb szerkezetet.

4. KERETSZERKEZETEK OPTIMÁLIS MÉRTEZÉSE KÜLÖNBÖZŐ TERHELÉSI ESETEKRE

Dr. Petrik Máté, Dr. Jármái Károly24
A tanulmány a merev sarokkapcsolattal jellemezhető keretszerkezetek optimális méretezésével foglalkozik. Az optimalizálás különböző terhelésekkel, de összehasonlítható terheléstartományokban lett elvégezve, ahol az optimalizálás célfüggvénye a legkisebb acéltömeget jelentette. Az eredmények azt mutatják, hogy a hajlítással igénybe vett gerendák esetén a nagyobb szilárdságú acélok kisebb keresztmetszet területeket igényelnek, azonban a nyomóerővel terhelt gerendák esetén, a kihajlás jelensége miatt, a vizsgált acélminőségek gyakorlatilag azonos geometriai méreteket igényelnek.

5. HELIKOPTER KOMPOZIT PADLÓLEMEZE OPTIMÁLÁSÁNAK ELMÉLETI ALAPJAI

Dr. Alaa Al-Fatlawi, Dr. Jármái Károly és Dr. Kovács György30
A kutatás célja egy újszerű optimalizálási megközelítés megtervezése volt egy teljes egészében FRP kompozit anyagból készült helikopterpadlóhoz. Az optimalizálási folyamat során 46 különböző rétegekombinációt vizsgáltak négy különböző FRP rétegből (üvegszálszövés fenolgyantával; üvegszálszövés epoxigyantával; szénszálszövés epoxigyantával; hibrid kompozit) és négy különböző FRP méhszerű mag szerkezeti elemből. Az előlapokat különböző rétegszámok és szálorientációk alkalmazásával építették fel, beleértve a keresztiréteges, szögletes és többirányú rétegeket.

6. ESETANULMÁNY HELIKOPTER KOMPOZIT PADLÓLEMEZE OPTIMÁLÁSÁRA

Dr. Alaa Al-Fatlawi, Dr. Jármái Károly és Dr. Kovács György38

Bemutatták egy kompozit padlórendszer optimalizációs eljárását. Kilenc tervezési kényszert vettek figyelembe: lehajlás; felületi feszültség (hajlító terhelés, végterhelés); merevség; hajlítás; mag nyírófeszültség; héjhajlás; cellán belüli hajlás; és nyíróhajlás. Az egycélú optimalizációs problémát a Matlab Interior Point Technique, az Excel Solver nemlineáris Generalized Reduced Gradient (GRG) algoritmus és a Laminator szoftver segítségével oldották meg. A Digimat-HC programmal elvégezték a helikopterpadlók ideális szendvicsplátóinak numerikus szimulációját. Az teljesen FRP kompozit szendvicsszerkezet optimalizálását egy esettanulmányon keresztül mutatták be.

7. OPTIMALIZÁLT BORDÁSLEMEZ PARAMÉTERVÁLTOZÁSAINAK HATÁSA A SAJÁTÉRTÉKEKRE

Dr. Virág Zoltán, Dr. Szírbik Sándor43
Ez a cikk merevített lemezek modális elemzésével és stabilitásával foglalkozik hosszirányú nyomás mellett, egyszerű alátámasztás esetén. Az optimalizált merevített lemezszerkezet FE-modelljeiben vizsgálható a korrózió okozta merevítők szerkezeti károsodásának hatása. A sérült szerkezetek módusai összehasonlíthatók a sérülésmentes szerkezetekkel, így a teherbírás változásai előre jelezhetők. A sajátfrekvenciák észrevehető különbségeket mutatnak a rugalmassági modulus változtatásakor. Ezért fontos, hogy a szerkezetet megfelelően tervezzék meg és megfelelő anyagokból készítsék el.

8. MEGTERMÉKENYÍTÉSI OPTIMÁLÓ ALGORITMUS TESZTELÉSE A CEC2015 KÖRNYEZETBEN ÉS ALKALMAZÁSA NAGYMÉRETŰ PROBLÉMÁKRA

Hazim Nasir Ghafil, Shaymaa Alsamia és Dr. Jármái Károly47
A cikk bemutatja a megtermékenyítő optimáló algoritmust, egy új módszert, amely a Levy-féle repülésen és a véletlenszerű kereséssel alapul egy keresési térben. A CEC2015 körben az optimáló algoritmusok teljesítményét számítási időigényes benchmarkok és nagyméretű optimalizációs problémák segítségével hasonlították. A saját tesztelés azt mutatja, hogy a megtermékenyítő algoritmus sok esetben felülmúlta a többi algoritmus teljesítményét.

9. HIDEGALAKÍTÁSI PROBLÉMÁK, A LÖVEDÉKKÖPENY HŰZÁSI TECHNOLÓGIÁJÁBAN

Leitold András55
Egyedi lövedék-konstrukcióhoz tartozó összeszerelő gépen alkalmazott lövedékgyártási technológia tervezése kerül bemutatásra. A lövedék, a töltény legfontosabb alkatrésze, végső soron a lehető legpontosabban hordozza azt az energiát, amelyet el kell juttatni. A mélyhúzáskor fellépő hibák rendszerint nem önmagukban, hanem összetetten jelentkeznek, így ezek kiküszöböléséhez is több hibát kell javítani.

10. VOC SZELEPSZÁR TÖMÍTÉS TESZTPAD

Behofsits Antal60
A Szelence Kft. elnyert egy kutatás-fejlesztési pályázatot, amelynek tárgya a „VOC (illékony szerves vegyületek) szivárgás csökkentése speciális tömítésteztelés útján”. A projekt során olyan teszt-pad kifejlesztésére került sor, aminek segítségével valós üzemi környezethez közelálló paraméterek (közeg, nyomás, hőmérséklet) mellett lehet vizsgálni a szelepszárak VOC szivárgását. A kutatás-fejlesztési projekt kivitelezése során, a végső mérőpad elkészítését több prototípus előzte meg.

A GÉP jelenlegi számában szereplő cikkek két-két szakmai bírálóhoz kerültek véleményezésre. A bírálók a következők voltak (a cikkek megnevezése nélkül): Dr. András Endre, Dr. Beleznai Róbert, Dr. Bencs Péter, Dr. Fenyvesi Dániel, Dr. Jármái Károly, Dr. Kovács György, Dr. Mankovics Tamás, Dr. Orbán Ferenc, Dr. Szabó J. Ferenc, Dr. Tímár Imre, Dr. Virág Zoltán, Farkas András, Juhász Márton Gábor, Nagy Szilárd, Tollár Sándor, Vadkerti Tóth Zoltán

BUKÓÖRVÉNYLÉSI-ARÁNY VIZSGÁLATA KÉT ELTÉRŐ MOTOR SZELEPVEZÉRLÉS ESETÉN

INVESTIGATION OF TUMBLE RATIO IN TWO DIFFERENT ENGINE VALVE CONSTRUCTIONS

*Kovács László**, *Dr. Szabó Szilárd***, *Dr. Bolló Betti****

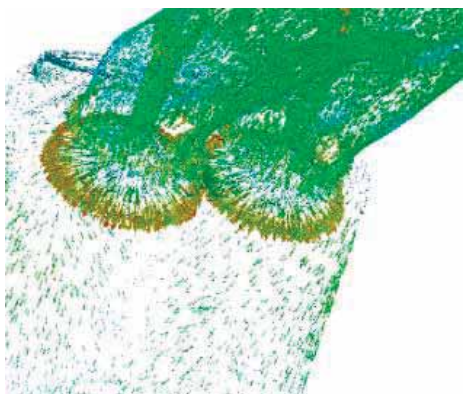
ABSTRACT

In our research we investigated the possibility of offering a viable alternative for internal combustion engines' poppet valves. The new system improves the efficiency of the gas exchange process. To underline the superior parameters of the newly designed valve system comparative numerical simulations were conducted in order to define the tumbling action inside the cylinder using poppet valve and Swinging Valve arrangements. Keeping the flow parameters identical results showed marked improvements in the tumbling action which is a prerequisite of successful employment of the extra lean working principle in stratified charging engines.

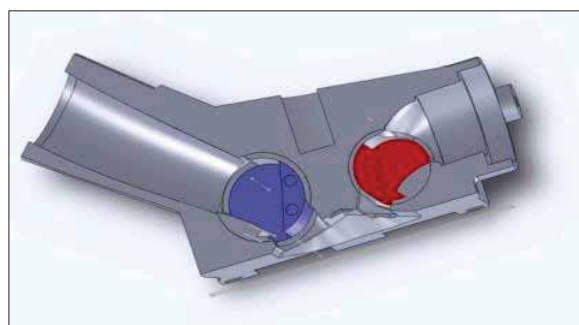
A hagyományos szelepek másik problematikus részegysége a szeleprugó. Mivel rugalmasságánál fogva hozzá létre a kapcsolatot a vezérmű alkatrészei és a szelep között, magasabb fordulaton a szelep elveszítheti kapcsolatát a vezérmű bütyökkel. Ez azonnali motorkárosodást eredményez. Az általunk ajánlott lengőszelepes konstrukció (2. ábra) alkalmazásával mindkét hátrány orvosolható, hiszen a szelep test nyitott állapotban nem akadályozza az áramlást, miközben nyitáshoz és zárva tartáshoz nem szükséges rugó alkalmazása. E megoldásnál a szeleptest lengőmozgást végezve fordul ki-be az áramlási keresztmetszetből. Ezen tulajdonságok vizsgálatáról az [1] és [2] közlemény tartalmaz bővebb információt.

1. BEVEZETÉS

A belsőégésű motorok szívóüteme során a friss töltet a szívószelep tányérjának hátulról nekicsapódik, amely jelentősen rontja a beömlés hatásosságát. Ennek eredményeként a henger töltöttsége csökken, az erőforrás pedig nem éri el az elméletileg megvalósítható teljesítményt. Több módszer létezik a henger töltöttségének javítására, ezek közül legelterjedtebb a turbótöltő alkalmazása. Viszont az alapvető hiányosságot ez a módszer sem szünteti meg, az összesűrített levegő áramlását ebben az esetben is akadályozza a szeleptányér. A helyzetet az 1. ábra mutatja be.



1. ábra A szelep hátoldala által eltérített áramlás



2. ábra Lengőszelepes hengerfej kialakítása. (Kék: szívó szelep, piros: kipufogó szelep)

2. KORÁBBI VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK

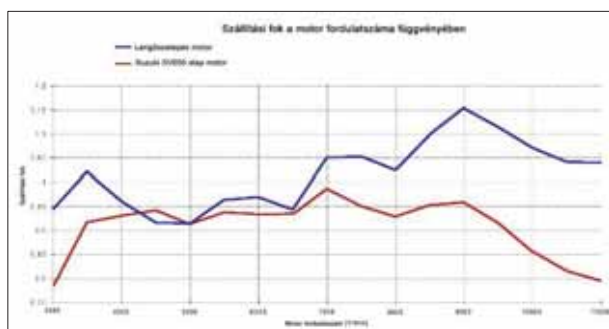
A kutatás korábbi szakaszában egy hagyományos szelepekkel szerelt motor paramétereit görgős fékpadi eljárással határoztuk meg [3]. Ezt követően elkészült egy lengőszelepes hengerfej modell, amely segítségével a hagyományos szelepekkel szerelt hengerfejjel összehasonlító áramlási vizsgálatokat hajtottunk végre [2]. Ezekből a vizsgálatokból egyértelműen kiderült, hogy a lengőszelepes konstrukció lényegesen jobb áramlási jellemzői (az áramlási együttható tekintetében a javulás szívó szelepesetén 14,5%, kipufogó szelep esetén 11,36%) nagyobb hatásfokú erőforrás megalkotását teszik lehetővé. Az áramlástan mérés során kapott

* doktorandusz hallgató, ** professzor emeritus, *** egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Áramlás-és Hőtechnikai Gépek Intézet Tanszék

eredmények felhasználásával egy-egy számítógépes motormodell készült. Az ülékes szeleppel szerelt erőforrás OD/1D modelljének validálása az előzőleg lefolytatott fékpadi próba alapján történt. Ezt követően a lengőszelepes konstrukció számítógépes szimulációja is megtörtént. Ennek során elvégzett elemzések az áramlástan vizsgálatoknak megfelelő eredményeket mutattak (3. ábra) [4]. A kutatás során felhasznált eszközök főbb technikai paramétereit az 1. táblázat mutatja.

1. táblázat Vizsgálat során alkalmazott eszközök főbb paramétereit

Motor konstrukció	4 ütemű, kéthengeres V henger elrendezésű
Furat/löket	81/62,6 mm
Lökettérfogat	645 cm ³
Áramlástan mérőpad:	Superflow SF600
Görgős teljesítménymérő	Superflow Cycledyne SF250
OD/1D szimulációs szoftver	Optimum Virtual 4stroke

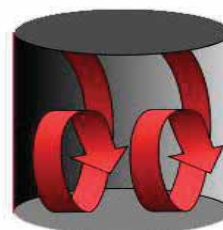


3. ábra Lengőszeleppel (kék) és ülékes szeleppel (piros) elérhető hengertöltöttségi fok vizsgálat eredménye [4]

3. RÉTEGES TÖLTÉSŰ MOTOROK

A jelenlegi energia válsággal sújtott környezetben az erőforrások tüzelőanyag felhasználásának csökkentése kiemelt hangsúlyt kap. Ennek megvalósítására többféle módszer kínálkozik, legszélesebb körben a réteges hengertöltet kialakítást alkalmazzák. Ennek lényege, hogy a benzinüzemű motorok égéstérében, a hagyományostól eltérően, a tüzelőanyag égésére nem homogén keverékként kerül sor. A réteges töltésű motorokban a tüzelőanyag koncentrációja a gyújtógyertya környezetében a legnagyobb, lehetővé téve a töltet meggyújtását, míg az égéster szélei felé haladva a tüzelőanyag koncentrációja jelentősen csökken, olyan mértékben, hogy az már a hagyományos módon, szikrával nem is lenne meggyújtható. Annak érdekében, hogy a vázolt tüzelőanyag eloszlás megvalósulhasson, a hengerbe lépő levegőnek olyan

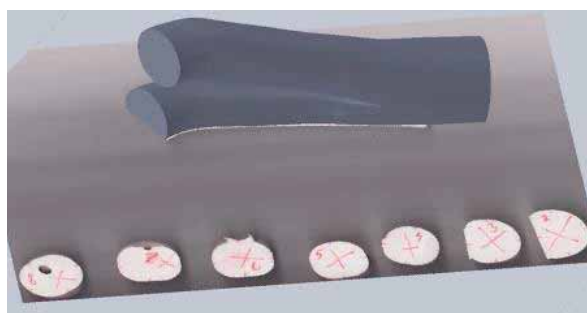
örvénystruktúrát kell felvennie, amely lehetővé teszi, hogy a gyújtás pillanatában a megfelelő mennyiségű és minőségű benzin-levegő keverék tartózkodjon a gyertya környezetében. Az ilyen keverékeloszlást elsősorban a bukóörvénylésnek (tumble) nevezett áramlási szerkezettel lehet elérni (4. ábra). E struktúra a szelepek bezárása után, egészen a gyújtás időpontjáig fennmarad, a megfelelő mértékű örvénylés elengedhetetlen feltétele a szükséges keverék eloszlás megvalósulásának. Kialakulását jelenleg különféle áramlás terelő, örvénykeltő lapokkal biztosítják, amelyek elkerülhetetlen áramlási veszteségeket okoznak a szívócsőben, rontva ezzel a henger töltési fokát [5].



4. ábra Bukó örvénylés (Tumble) a hengerben [6]

4. NUMERIKUS MODELL A TÖLTET MOZGÁS VIZSGÁLATÁRA

A töltetmozgás vizsgálatát CFD modellezés felhasználásával végeztük el. Ehhez megalkottuk a hengerfejek számítógépes 3D modelljeit. Műszaki rajz híján az ülékes szelepes hengerfej esetén két komponensű szilikon gumi alkalmazásával lenyomatot készítettünk a szívócsőről. Ezt feldarabolva, a keresztmetszeteket lemérve állítottuk elő a szívócső 3D-s modelljét (5. ábra).



5. ábra A szívócső feldarabolt szilikon modellje és a szelepek alapján létrehozott 3D modell

Ennek alapján készült el a lengőszelepes verzió 3D modellje is, amely így az ülékes szeleppel szerelt hengerfejjel azonos irányú beömlést tesz lehetővé a hengerbe. Ezáltal a két hengerfej modell esetén csak a szeleprendszer kialakítása különbözik, az áramlási keresztmetszetek nagysága, illetve a szívócső által létrehozott áramlási irány és beömlési szög azonos. Az

elkészült modelleket tovább finomítottuk, hogy a CFD modellbe integrálásuk zökkenőmentes legyen. Ezt a célt az Ansys szoftvercsalád termékeivel valósítottuk meg. A modell utómunkákat Space Claim programmal végeztük el, az áramlástani modell futtatására pedig a Fluent programot használtuk.

4.1. Hálófüggetlenségi vizsgálat

Mivel a CFD szoftver eredményeinek pontossága befolyásolja a vizsgálat minőségét [7], ezért a modellek többféle hálózási konfigurációval is futtatásra kerültek. Minden esetben a CutCell módszer került alkalmazásra, mert csak ezzel lehetett elkerülni a dinamikus hálózás során fellépő töredék cellák kialakulását, ami az egész folyamatot lebénította. Erre a dugattyú mozgás modellezése miatt volt szükség. Fontos részlet még a kezdeti cella méret megválasztása is. Ha ugyanis a hagyományos szeleppel szerelt hengerfej esetén a cellák mérete nagyobb volt egy bizonyos határértéknél, akkor a szelepek jelenléte torzította a hálót, leállítva a szimulációt (6. ábra).



6. ábra A kritikus hálósűrűséget meghaladó méret esetén kialakuló eltérő kiterjedésű cellák a dinamikus áramlási vizsgálat szempontjából "mozgó" felületen

A vizsgálat során a futáshoz szükséges kritikus cellaméretnél sűrűbb hálózások kerültek ellenőrzésre, ám az áramlási eredmények lényegi eltérést nem mutattak szemben a vizsgálat időtartamával, amely jelentősen növekedett. A kutatás ezen szakaszában szerzett tapasztalatok alapján a lengőszelepes hengerfejnél is az üléses szelep esetén bevált, a stabil futtatást lehetővé tevő kritikus hálózási paraméterek kerültek alkalmazásra, amelyeket a 2. táblázatban foglaltunk össze.

2. táblázat CFD vizsgálat során alkalmazott hálózási paraméterek

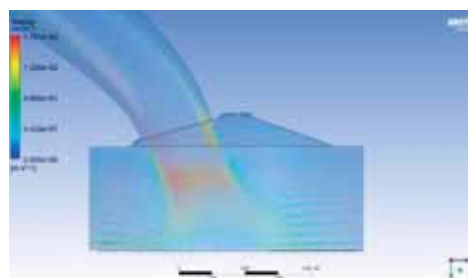
	Általános cellaméret	A dugattyú felületén alkalmazott cellaméret
Alap eset (kritikus méret)	2 mm	1 mm
Finomított hálózás 1.	1 mm	0,5 mm
Finomított hálózás 2.	1 mm	0,25 mm

5. CFD MODELL EREDMÉNYEINEK ELEMZÉSE

A modell vizsgálatok futtatására 7000 1/perc fordulatszámra került sor, amely a 0D/1D szimulációk alapján a legnagyobb tömegáramot hozza létre a szelepeken [3, 4]. A két szeleprendszert a legnagyobb dugattyúsebességnél hasonlítottuk össze, amely jelen esetben 23,5 m/s, amely a forgattyús tengely 75 fokkal a felső holtpont utáni állásánál valósul meg.

5.1. Grafikus elemzés

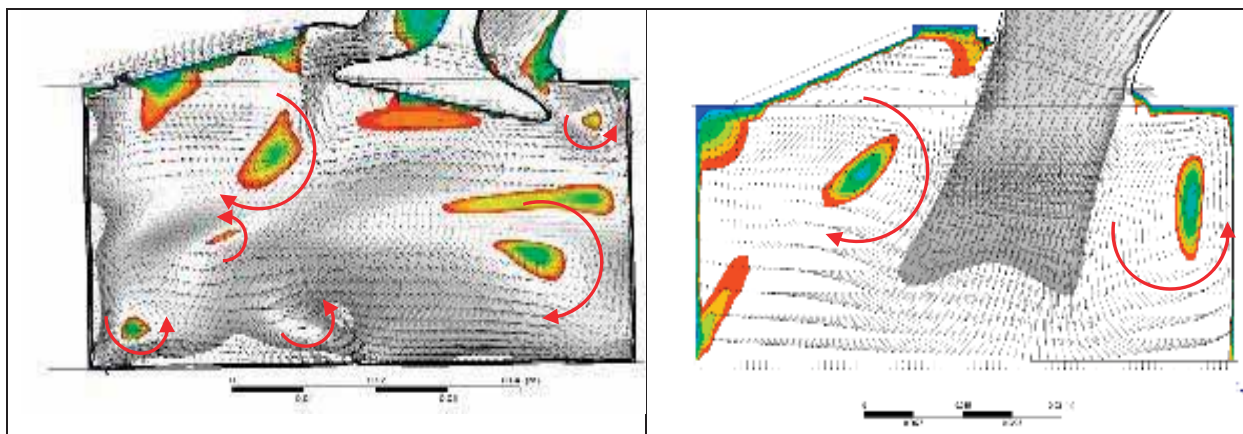
A szükséges áramlási adatok szoftverből való kinyeréséhez a lengőszelep esetén a henger szimmetria síkjában, míg az üléses szelep esetén az egyik szelepszár tengelyén átmenő síkban vizsgáltuk az áramlást. Az adatok táblázatos, illetve grafikus ábrázolása rávilágított a két szeleprendszer lényeges különbségére: Amíg a hagyományos szelep esetén a szeleptányér az áramlást szétterülő formában a szívócső felőli hengerfalra és a hengerfejjel párhuzamos irányba kényszeríti (lásd 1. ábra), addig a lengőszelep esetén a meghatározó légtömeg a dugattyú középpontja felé mozog. Ebben az esetben maga a dugattyú és a hengerfalak az áramlás fő irányítói, miközben az áramlást csak a hengerrel és dugattyúval való ütközésük tereli (7. ábra)



7. ábra A lengőszelepes hengerfejben a gázáramot a hengerfej és a henger fal irányítja

5.2. Bukóörvénylési-arány meghatározása

A motorműködés szempontjából lényegesen előnyösebb a stabil, nagyméretű örvénylés, mivel a réteges töltésű motorok hatékony működéséhez szükséges keverékeloszlás nagyobb fordulatszám-tartományban hozható létre. A túl nagy fordulatszámú, kis térfogatra koncentrálódó örvénylés ezzel szemben kerülendő. Ennek oka, hogy a gyors gázmozgás szétteríti a hengerbe közvetlenül befecskendezett tüzelőanyagot, nehezítve a szükséges keverék rétegződést, illetve az örvénylés miatt a munkaközeg hőátadása a hengerfalaknak nagyobb mértékű lesz. Így a munkaközeg energiatartalma a hűtőrendszerbe távozik, amely egyértelmű hatásfok csökkenést jelent. A grafikus elemzésből egyértelműen láthatóvá vált az örvényszerkezetek felépítése.



8. ábra A hengerfejekben a sebesség kontúros és vektoros ábrázolásával azonosíthatóvá váltak a kialakuló örvényrendszerek. A szürke szín a gyorsan mozgó gáztömeget, míg a színes mezők a forgó gáztömegek központi zónáit teszik láthatóvá. Bal oldalon a hagyományos szeleppel szerelt hengerfej, míg jobb oldalon a lengőszelepes hengerfej áramlási képe látható

A 8. ábrában látható szürke zónák reprezentálják a gyorsan mozgó töltetrészeket, míg a színes zónák az örvényterek közepét jelzik, ahol a töltet mozgási sebessége közel nulla értékű. Mint látható, a lengőszelepes rendszer az előzőekben említett kritériumoknak megfelel. A falak mentén kialakuló stagnáló zónákat nem számolva két nagyobb méretű örvény képződik.

Ezzel szemben a hagyományos szelep esetén ugyanezt a számlálási elvet alkalmazva hat kisebb méretű, gyorsan forgó örvényrendszer alakul ki, amely éppen a kerüendő megoldás lenne. Az ábrában látható világos, de nem színezett részek a rajz síkjára merőlegesen mozgó légtömeget jelzik. A vektorokat megfigyelve további fontos eltérés rajzolódik ki a két szeleprendszer által kialakított bukóörvénylesek között: Az áramlási irányok, méretük és forgási sebességük eltérő.

Az adatelemzéshez a szakirodalomban alkalmazott módszer [8] biztosított kiindulási pontot. Az elmélet a bukóörvénylezésben résztvevő légtömeget szilárd testként kezeli az áramlási térben. Kerületi sebességét, valamint az örvénylező gáztömeg sugarát a szimuláció táblázatos eredményeiből határoztuk meg, amely adatok felhasználásával meghatározhatóvá vált az örvénylezés fordulatszáma:

$$n_0 = \frac{30 \cdot v}{r \cdot \pi}, \quad (1)$$

ahol:

- n_0 : örvénylezés fordulatszáma [1/perc],
- r : az örvény külső forgási sugara [m].
- v : az r sugáron az örvény kerületi sebessége [m/s],

Az így meghatározott fordulatszám és a vizsgálat során alkalmazott motorfordulatszám arányából számítható a bukóörvénylezési-arány (BA) [9, 10]:

$$BA = \frac{n_0}{n_m}, \quad (2)$$

ahol:

- BA: bukóörvénylezési-arány [-],
- n_m : motor fordulatszám [1/perc].

5.3. Szeleprendszerek összehasonlítása

Mivel a vizsgálat célja a hagyományos és a lengőszelepes rendszer összehasonlítása, ezért a bukóörvénylezési-arány meghatározást ki kellett egészíteni oly módon, hogy a mozgásban résztvevő gáztömeg nagysága is megjelenjen az eredményekben. Itt visszautalunk az 5.1 szakaszban található információra, vagyis a hatékony réteges keverékelosztás kialakítása szempontjából egy nagyobb méretű, tehát nagyobb tömegű gázt magában foglaló örvény kívánatosabb, mint egy nagyon gyorsan forgó, de kis méretű örvény. Ennek nyomán bevezetésre került a relatív bukóörvénylezési arány (RBA), amely megmutatja, hogy az örvény mérete és henger mérete milyen arányban áll egymással. Ebben az esetben minél nagyobb a relatív bukóörvénylezési-arány, annál kedvezőbbek a feltételek a hatékony, alacsony hőveszteséggel rendelkező, réteges keverékképzésű égést alkalmazó munkafolyamat kialakítására. Ennek számítása a következőképpen történik:

$$RBA = \frac{r_H \cdot BA}{r}, \quad (3)$$

ahol:

- RBA: Relatív bukóörvénylezési-arány [-],
- r_H : henger sugara [m].

Elvégezve fenti számításokat a lengőszelepes konstrukció relatív bukóörvénylési aránya 36,69%-al bizonyult nagyobbak a kipufogó oldali örvénytérben. A szívó csatorna felőli oldalon vizsgálva a relatív bukóörvénylési-arányt szintén a lengőszelepes konstrukció mutatja a jobb eredményt 10,45%-al kedvezőbb értékeket produkálva, mint a hagyományos üléses szelep. A kapott értékek megmutatják, hogy az 5.2 pontban részletezett kritériumoknak megfelelő áramlási rendszer a lengőszelepes megoldás geometriájából fakadóan, természetsszerűleg alakul ki. Ugyanezekkel az értékekkel rendelkező örvénytér üléses szeleppel csak áramlás terelő lapok segítségével, vagy speciálisan kialakított örvénykeltő szívócsatorna elrendezésekkel valósítható meg. Mindkét alkalmazott megoldás csökkenti a hengerbe juttatható töltet mennyiségét, miközben az erőforrás, mint szerkezeti egység komplexitása, adott esetben beépítési mérete, tömege növekszik.

6. A VIZSGÁLAT EREDMÉNYEINEK ÖSSZEFOGLALÁSA

Jelen kutatási munkánkban bemutattuk a lengőszelep kialakításából fakadó hatékonyabb áramlási terek létrejöttét. A grafikus elemzés alapvető örvénylési különbségekre világított rá a két szeleprendszer tekintetében. Vizsgálatunk eredményeként egyértelmű, hogy a lengőszelepes konstrukcióval elérhető kedvezőbb örvénytér elősegíti a réteges töltésű motorokban a megfelelő eloszlású friss tüzelőanyag/levegő töltet kialakulását. A lengőszelep tömítettségét biztosító megoldások közül a deformálódó égéstérbetét nyújtja a legnagyobb biztonságot. Ezzel a megoldással a szelep felületére ható súrlódó erő csak addig a pillanatig áll fent, amíg a hengertér nyomása elegendő a betét tömítőszélének szelep felületére szorításához. Ezek a megoldások már a múlt század elején is rendelkezésre álltak, ám az anyagtechnika és tervezési eljárások akkori színvonalán még nem érték el a szükséges fejlettségi fokot [11]. Az elengedhetetlen kopásállóságot és mechanikai szilárdságot a megfelelő MMC, CMC, illetve tisztán kerámia szeleptest (pl. SiN) alkalmazása biztosíthatja. A legmegfelelőbb mechanikai és termikus tulajdonságokkal rendelkező anyagok kiválasztása külön kutatási feladat részét képezik. Számítással igazoltuk, hogy a lengőszelepes rendszer alkalmazásával kevesebb, lassabban forgó, de nagyobb forgó tömeggel rendelkező örvényrendszer alakul ki, amely jobban megfelel a hengerben elérni kívánt hatékony tüzelőanyag felhasználást biztosító áramlási jellemzőknek. Az áramlástanai modellből az is kiderült, hogy a lengőszelepes rendszer alkatrészei, miközben a fent említett előnyös áramlási teret biztosítják, elrendezésükkel nem korlátozzák a hengerbe ömlő friss

keverék mennyiségét. Így könnyebben megvalósítható egy olyan erőforrás, amely a szükséges motorjellemzőket csökkentett lökettérfogattal, ám egyéb segédberendezések használata nélkül (pl. turbó) valósítja meg, viszonylag alacsony előállítási költségek mellett. Ezért kijelenthető, hogy a koncepció illeszkedik és a helyes irányban mozdíthatja elő a globálisan kívánatos motor méretcsökkentési céloknak megfelelő erőforrások fejlesztését. A lengőszelep geometriai elrendezése folytán további lehetőségek rejlenek még az esetlegesen implementált változó szelepvezérlésében is.

7. IRODALOM

- [1] Kovacs, L.: *Magas fordulátú belsőégésű motor szelepvezérlési rendszerének elemző vizsgálata*, GÉP 2014/1., 2014. LXV. évfolyam, 28-33.
- [2] Kovacs, L., Szabo, Sz.: *Comparative study on the improvement of the gas exchange process efficiency of a high-speed IC engine using swinging valve*. *Analecta Technica Szegedinensia*, 2019. 13(2), 28-37.
- [3] Kovacs, L., Szabo, Sz.: *Improving the power characteristics of an Internal Combustion Engine with the help of a 0D/1D engine model*, *ANNALS of Faculty Engineering Hunedoara – International Journal of Engineering*, 2015. Tome XIII – Fascicule 2, 83-88.
- [4] Kovacs, L., Szabo, Sz.: *Test validated 0D/1D engine model of a Swinging Valve internal combustion engine*, *Multidiszciplináris tudományok*, 11. kötet, 2021. 4 sz. pp. 266-277
- [5] KAPLAN., M.: *Influence of swirl, tumble and squish flows on combustion characteristics and emissions in internal combustion engine-review*, *Amasya University Technology Faculty, Mechanical Engineering Department*, Published by Editorial Board Members of IJAET, 2019. e-ISSN: 2146 – 9067
- [6] Mohammadebrahim, A., Hannania, S. K. and Shafii M. B.: *Investigation into the effect of intake port geometric parameters and blockage on flow coefficient and in-cylinder flow: Application to engine port design*. *Scientia Iranica B* (2014) 21(2), 438-448
- [7] Hamid, M. F., Idroas, M. Y., Sa'ad, S., Teoh Yew Heng, T. Y., Mat, S. C., Alimuddin, Z., Shamsuddin, K. A., Shuib., R. K., and Abdullah, M. K.: *Numerical Investigation of Fluid Flow and In-Cylinder Air Flow Characteristics for Higher Viscosity Fuel Applications Processes* 2020, 8, 439; doi:10.3390/pr8040439, ISSN 2227-9717

- [8] Falfari, S., Brusiani, F., Bianchi, G. M.: *Numerical analysis of in-cylinder tumble flow structures – parametric 0D model development*, 68th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2013, 2014. Energy Procedia 45, 987 – 996
- [9] Falfari, S., Brusiani, F., Pelloni, P.: *3D CFD analysis of the influence of some geometrical engine parameters on small PFI engine performances – the effects on the tumble motion and the mean turbulent intensity distribution*, 68th Conference of the Italian Thermal Machines Engineering Association, ATI2013, 11-13 September 2013, Bologna, Italy, 2014. Energy Procedia 45, 701 – 710,
- [10] Bozza, R., De Bellis, V., Fantoni, S. and Colangelo, D.: *CFD 3D Analysis of Charge Motion and Combustion in a Spark-Ignition Internal Combustion Engine under Close-to-Idle Condition*, E3S Web of Conferences 197, 75° National ATI Congress – #7 Clean Energy for all (ATI 2020), 2020. Rome, Italy, September 15-16, 2020
- [11] Kovács, L.: *Ritkább, mint a fehér holló: Forgószelepes motorkonstrukciók*. Autótechnika: Javítás és Kereskedelem (1588-9858), 2013.07. pp 16-19 (2013)

HŐSZIVATTYÚ A JÖVŐBEN

HEAT PUMP IN THE FUTURE

Hornyák Gábor¹, Bozzay Péter²

ABSTRACT

The energy demand for heating and cooling is constantly increasing. The European Union wants to achieve a carbon-neutral economy by 2050. Heat pump systems offer an economical alternative to help achieve these goals.

1. BEVEZETÉS

A hőszivattyús rendszerek gazdaságos alternatívákat kínálnak a különböző forrásokból származó hő visszanyerésére különféle ipari, kereskedelmi és lakossági alkalmazásokhoz. Mivel az energiaköltség folyamatosan emelkedik, elengedhetetlen az energiamegtakarítás és az általános energiahatékonyság javítása. Ennek fényében a hőszivattyú kulcsfontosságú elemévé válik egy energia-visszanyerő rendszernek, amely nagy energiamegtakarítási potenciállal rendelkezik. A hőszivattyúk teljesítményének, megbízhatóságának és környezeti hatásainak javítása folyamatos fejlődést okoz a szakemberek számára. A hőszivattyús rendszerekben a közelmúltban elért fejlődés középpontjában a hővel és munkával működtetett rendszerek, fejlett körfolyamatok tervezése és továbbfejlesztése áll, különböző munkaközegek alkalmazásával, valamint szélesebb körben történő kihasználásával [1].

Az előrejelzések szerint a 2070-es évekre jelentősen meg fog növekedni a hűtés igénye a régiókban. Az épületszektor, amely magába foglalja a lakó-, köz- és kereskedelmi ingatlanokat is, közvetlenül és közvetve a világ végső energiafogyasztásának 30%-át teszi ki. A fűtési és hűtési rendszerek különösen kritikus területek az épületek károsanyag kibocsátásában, körülbelül 45%-ért felelősek, ennek oka, hogy az energia több mint 55%-át továbbra is fosszilis tüzelőanyagokból állítják elő (Magyarországon 37,83%). Továbbá becslések szerint az épületek alapterülete 2070-re várhatóan megduplázódik. [2].

2. HŐSZIVATTYÚ MŰKÖDÉSI ELVE

A termodinamika második főtétele szerint a hő spontán áramlik a magasabb hőmérsékletű tartományból az alacsonyabb hőmérsékletű tartományba. A hő

önszántából nem áramlik az alacsonyabb hőmérsékletűről a magasabbra, de munkavégzés esetén ebbe az irányba is áramoltatható. Az adott hőmennyiség átadásához szükséges munka általában sokkal kisebb, mint a hőmennyiség, ez az oka a hőszivattyúk használhatóságának a víz melegítésére és épületek belsejének hűtésére.

A hőmennyiség (Q) alacsonyabb hőmérsékletű tárolóból, például környezeti levegőből, magasabb hőmérsékletű tárolóba, például egy épület belsejébe történő eljuttatásához szükséges munka mennyisége a következő:

$$W = \frac{Q}{COP} \quad (1)$$

Ahol

W a hőszivattyú kompresszora által a munkaközegen végzett munka (J),

Q az alacsonyabb hőmérsékletű tárolóból a magasabb hőmérsékletű tartályba továbbított hő (J),

COP a hőszivattyú teljesítménytényezője a pillanatnyi hőmérsékleti viszonyok mellett [3].

3. HŐSZIVATTYÚK TÍPUSAI ÉS ALKALMAZÁSI LEHETŐSÉGEI

Hőszivattyú típusok:

- Levegő (*levegő-víz, levegő-levegő*)
- Geotermikus hőszivattyú (*talaj, talajvíz*)
- Elszívott levegő (*levegő-levegő, levegő-víz*)
- Napelemes (*hőszivattyú + napelem integráció*)
- Vízforrású (*víztest a hőforrás*)
- Hibrid (*levegő + talaj kombinált*)

Hőszivattyúk alkalmazási lehetőségei

Épületek és járművek fűtése és hűtése: Jellemzően gőzkompressziós hűtőberendezés, amely egy irányváltó szelepet és optimalizált hőcserélőket tartalmaz, így a hőáramlás (*hőenergia mozgása*) irány megfordítható [4].

¹ energetikai mérnök MSc hallgató, Miskolci Egyetem

² tanszéki mérnök, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

Vízmelegítés: Általában a hőt kültéri levegőből vonják ki és egy beltéri víztartályba továbbítják, egy másik változat pedig a belső levegőből vonja ki a hőt, hogy segítse a helyiség hűtését [5].

Távfűtés: Lehetséges hőforrásai a szennyvíz, környezetvíz, ipari hulladékhő, geotermikus hő, füstgáz, távhűtési hulladékhő és napenergia-tárolásából származó hő. A nagyméretű távfűtési hőszivattyúk hőenergia tárolással kombinálva nagy rugalmasságot kínálnak a változó megújuló energia integrálásához [5].

Ipari fűtés: Az ipari hőszivattyúk alkalmazása nagy lehetőség az ipar energiafogyasztásának és a kapcsolódó üvegházhatású gázok kibocsátásának csökkentésére. Egy 2015-ben lezárult nemzetközi együttműködési projekt megállapítása alapján rövid, 2 évnél rövidebb megtérülési idők lehetségesek, miközben a CO₂ kibocsátás nagymértékben (*akár >50%*) csökkenhet [6].

A hőszivattyús rendszerek gazdaságos alternatívákat kínálnak a különböző forrásokból származó hő visszanyerésére különféle ipari, kereskedelmi és lakossági alkalmazásokhoz. Mivel az energiaköltség folyamatosan emelkedik, elengedhetetlen az energia-megtakarítás és az általános energiahatékonyság javítása. Ennek fényében a hőszivattyú kulcsfontosságú elemévé válik egy energia-visszanyerő rendszernek, amely nagy energiamegtakarítási potenciállal rendelkezik. [7].

4. HŐSZIVATTYÚ ENERGIAHATÉKONYSÁGÁNAK NÖVELÉSE

- Töblépcsős ciklusok

A töblépcsős rendszerek egynél több kompresszió fokozatot alkalmaznak és összetett vagy kaszkád rendszerekként osztályozhatók [19]. Az egyfokozatúhoz képest a töbléfokozatú rendszernek kisebb a kompressziós aránya és nagyobb a kompressziós hatékonysága minden egyes fokozatban, ugyanakkor nagyobb a hűtési hatás, alacsonyabb a kibocsátási hőmérséklet és nagyobb a rugalmassága [20, 21].

- Kompresszor teljesítményének növelése

A gőz-sűrítési ciklus energiafogyasztásának minimalizálása érdekében az egyik kulcsfontosságú szempont a kompresszor energiafogyasztásának csökkentése a kívánt kompressziós arányhoz, azaz a kompresszor teljesítményének javítása. Az elmúlt években a scroll kompresszor feltalálása a kompresszortechnika jelentős technológiai áttörésének tekinthető. A szívó- és kiürítési folyamat elkülönül, ami azt jelenti, hogy a szívógázhoz nem adnak hőt, amikor az belép a kompresszorba, ellentétben a dugattyús kompresszorral [7, 8].

- Új hűtőközegek

A HFO (*Hidrofluoroolefin*) hűtőközegek az egyik legszélesebb körben használt hűtőközeg a hőszivattyús és légkondicionáló rendszerekben. Korábbi társához a HFC-hez (*Hidrofluorocarbon*) képest jelentősen kisebb a környékárosító hatásuk. Új hűtőközegek kiválasztása esetén szempont, hogy a hűtőközeg termodinamikai tulajdonságai hasonlóak legyenek a kiváltandó közegekéhez, mely esetben minimális a meglévő rendszerek újratervezésének vagy újra-konfigurálásának szükségessége [9].

Hőszivattyúk üzemmodjai

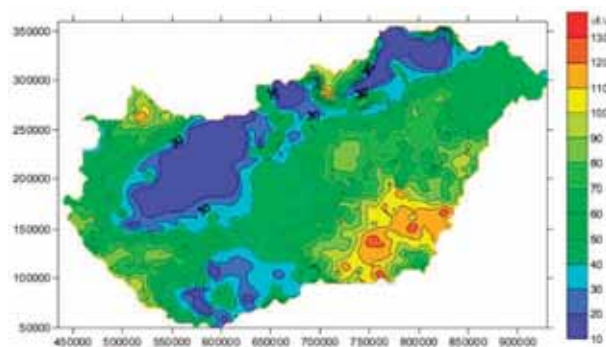
A helyiségek fűtésére szolgáló hőszivattyúk – a peremfeltételektől függően – alapvetően eltérő módokon üzemeltethetőek. A választott üzem mód mindenekelőtt a helyiségben található, illetve tervezett hőleadó rendszertől és a választott hőforrástól függ [10].

Monovalens üzem mód: A hőszivattyú a fűtés és a melegvíztermelés teljes hőigényét fedezi. Ehhez a talaj és a talajvíz optimális hőforrás, mivel ezek a hőforrások a külső hőmérséklettől szinte függetlenek és alacsony hőmérsékletek mellett is elegendő hőt szállítanak [10].

Bivalens üzem mód: A hőszivattyú mellett használatra kerül egy második hőtermelő is, gyakran egy meglévő kazán. Az alapellátást a hőszivattyú biztosítja, meghatározott külső hőmérséklettől, pl. 0 °C alatt pedig bekapcsolódik egy kazán. Gazdasági okokból ezek a rendszerek időközben már kikerültek a fókuszba [10].

Monoenergetikus üzem mód: Az energiacsúcsokat integrált elektromos kiegészítő fűtéssel fedezik. Ez a rásegítő fűtés ideális esetben a melegvíztermelés és a fűtés támogatására is alkalmas. [10].

5. MAGYARORSZÁG, MINT GEOTERMIKUS ENERGIA NAGYHATALOM



5.1. Hőáramsűrűség eloszlás a felső-pannoniai réteg fekéjében (mW/m²) [11]

A Pannon-medence alatt a földkéreg meglehetősen vékony, 60-100 km vastagságú, ami a miocénben való kivékonyodás következménye. E tény miatt sorolják ma Magyarországot geotermikus adottságai vonatkozásában Európa élvonalába [11]. A 70-90 mW/m² kontinens-átlaggal szemben a Kárpát-medencei átlagos hőáram-sűrűség 80-110 mW/m², a maximum érték pedig 90-120 mW/m². A földi hőáram-sűrűség (*hőáram, hőfluxus*) a hőenergia-áramlást jellemzi, amely az egységnyi föld-felületen, egységnyi idő alatt átáramló hőmennyiséget mutatja meg. A Pannon-medencében az átlagos geotermikus gradiens – amely a felszín alatti hőmérséklet növekedést jellemzi – 50 °C/km, aminek oka a hőáram-sűrűségen kívül a medencét jellemző agyagos-homokos üledék, amely jó szigetelő tulajdonságokkal rendelkezik. Éppen ezért a geotermikus gradiens értéke az Alföldön és a Dél-Dunántúlon a legnagyobb hazánkban [11].

6. GEOTERMIKUS HŐSZIVATTYÚK

A geotermikus hőszivattyúk vagy talajhőszivattyúk a földi forrásokból származó alacsony minőségű hőenergiát használják. Egy 1912-ben Heinrich Zoelly által kiadott svájci szabadalom az első utalás a geotermikus hőszivattyús rendszerekre. Az Egyesült Államokban néhány földi és talajvíz hőszivattyús rendszert közvetlenül a második világháború előtt telepítettek, majd a háború után a telepítések száma tovább növekedett. Ebben az időben tucatnyi kutatási projektet végeztek az amerikai villamosenergia-szolgáltatók, majd a tovább kutatás és érdeklődés hanyatlani látszott az 1970-es olajválságig. Az 1980-as években megalakult a Nemzetközi *Ground Source Heat Pump Association (IGSHPA)*, amely a zárt ciklusú talajhőszivattyúk méretezési protokolljának kifejlesztésén dolgozott. Az 1990-es években indult gyors növekedésnek a talajhőszivattyú piac az Egyesült Államokban és Európában, elősegítve a különböző mérnöki szakmai szervezetek növekedését és újabbak megalakulását. Mára a „geotermikus hőszivattyús rendszer” egy mindent magába foglaló kifejezéssé vált. Olyan hőszivattyús rendszer, amely a földet, talajvizet és felszíni vizet vagy más földi hőt használ fel hőforrásként és/vagy elnyelőként. Más néven is megtalálhatóak, mint: föld/talajhőszivattyú, talajvíz hőszivattyú, talaj-csatlakozású hőszivattyú, felszíni víz hőszivattyú [12].

Geotermikus hőszivattyúk csoportosítása hőforrások alapján:

- **Felszín közeli hőenergia (napenergia):** Szezonálisan tárolódik a talajban és 0,80...1,50 m mélységben vízszintesen fektetett, úgynevezett talajhő kollektorokkal hasznosítható.

- **Geotermikus hő:** A Föld mélyéből áramlik a felszín felé és 150 m mélységig függőlegesen elhelyezett talajszondákkal hasznosítható. Mindkét esetben zárt rendszerként víz és fagyálló folyadékok (pl. etilén-glikol) keveréke kering.

A talajkollektorok előnye, hogy kedvező költségűek és magas az éves teljesítményszámuk. Hátrányuk, hogy nagy a felületigényük, szakszerűtlen fektetés esetén „légzsákok” alakulhatnak ki, illetve a telepítés területe nem beépíthető [10].

A talajhőszondák előnyei, hogy nagy a megbízhatóságuk, kis helyigényűek és magas az éves teljesítményszámuk. Hátrányuk, hogy rendszerint magasabb a beruházási költségük, illetve nem minden területen lehetséges az alkalmazásuk [10].

A talajvíz hőszivattyúk előnye a magas teljesítményszám és a csekély helyigény. Hátránya, hogy nyílt a rendszer, karbantartási igénye van, továbbá szükséges a vízvizsgálata [10].

1. táblázat Hőforrás kiválasztása [10]

Tényezők	Felületi kollektor	Talajszonda	Talajvíz
Helyigény	+	+++	+++
Hatékonyaság	+++	+++	+++
Beruházási költség	+++	+	+
Üzemeltetési költség	+++	+++	+++
Beépítés	++	+++	++
Karbantartás	+++	+++	+++
Engedélyezés	+++	++	++

+++ nagyon jó, ++ jó, + megfelelő

7. HŐSZIVATTYÚ LÉTJOGOSULTSÁGA

A hőszivattyúk hasznosságának szemléltetésére egy számítási példa, amelyben a működtető energia, illetve a villamos motor hajtása nem 100%-ban megújuló energiaforrásból származik.

- Magyarországon a villamosenergia-termelés 14,65 %-ban megújuló energiaforrásból származik [14] és

- a példában szereplő villamos hőszivattyú szezonálisteljesítmény-tényezője: SPF = 4,0 (25% befektetett munka, 75% környezetből átvett ún. zöldhő).

Az említett hőszivattyú ebben az esetben

$$25 * 0,1465 + 75 = 3,6625 + 75 \approx 78,66 \%$$

megújuló energiaforrást hasznosít.

2013-tól a hőszivattyús rendszerek megújuló energia felhasználásának elszámolása a 2008. év végén kiadott EU-irányelv az ún. RES (*megújuló energia*) direktíva VII. melléklete b) része szerint:

$$E_{RES} = Q_{hasznos} * (1 - 1/SPF) \quad (2)$$

ahol:

$Q_{hasznos}$ a hőszivattyúból származó teljes becsült hasznos hőenergia (J). Csak az $SPF > 1,15$ ($1/\eta$) hőszivattyúk vehetők figyelembe

SPF a becsült átlagos szezonátlagteljesítmény-tényező (*Seasonal Performance Factor [kWh/kWh]*)

η a teljes (*bruttó*) villamosenergia-termelés és az ahhoz felhasznált elsődleges (*primer*) energia aránya. Az Eurostat adatai alapján megállapított EU átlaggal kell kiszámolni. A Bizottság a számítás bevezetéséig még iránymutatásokat készít, hogy a tagállamok megbecsülhessék a $Q_{hasznos}$ és SPF értékeit különböző hőszivattyúzási technológiák esetében [13].

A hazai villamosenergia-rendszer átlagos hatásfoka, amivel helyileg a hőszivattyúknál számolni lehet:

$$\eta = \eta_{er\ddot{o}m\ddot{u}} * \eta_{h\ddot{a}l\ddot{o}zat} \quad (3)$$

ahol:

$\eta_{er\ddot{o}m\ddot{u}}$ a magyarországi összes er\ddot{o}m\ddot{u} technológiák hatásfokaiból és részarányából számítható (*értéke a kezdetektől fogva, ma is és várhatóan a jövőben is folyamatosan növekedik*)

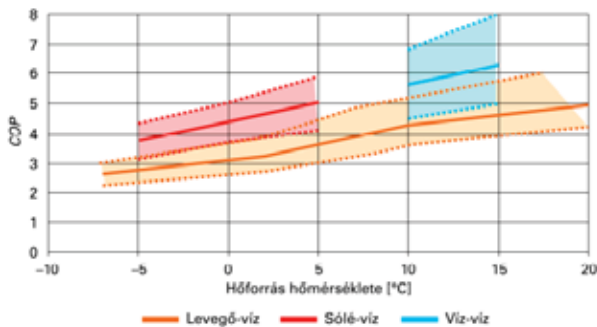
$\eta_{h\ddot{a}l\ddot{o}zat}$ hálózati hatásfok (*szállítási és elosztási hatásfok, ez csak hosszabb távon növekedő érték*)

A fenti képlet számértékekkel helyettesítve:

$$\eta = 0,35 * 0,90 = 0,315 \text{ illetve } 31,5\% \quad (4)$$

A szezonátlagteljesítmény-tényező ezzel:

$$SPF = 1,15(1/\eta) \approx 3,65 \quad (5)$$



7.1. COP [kW/kW] mérési eredmények (a hőszivattyú teljesítménytényezője 35 °C előremenő vízhőmérséklet esetén) [13]

8. HŐSZIVATTYÚ JOGSZABÁLYI HÁTTERE

2020. januárjától több olyan jogszabály változás is hatályba lépett, melyek érintették a geotermikus hőszivattyús rendszereket. Korábban a 20 méternél nem mélyebb talajszondák kialakítása esetén bejelentési kötelezettség terhelte a telepíteni kívánót az illetékes bányahatóság felé. 2020 januárjától a korábbi 20 méteres bejelentési kötelezettséget 120 méterre terjesztették ki [15].

Állami támogatások rendszere

Innovációs és Technológiai Minisztérium (vállalkozóknak): Az európai klímavédelmi törekvések és hazai adottságok (*jelentős nap, biomassza/biogáz és földhő potenciál*) figyelembevételével Magyarországon a hosszú távú cél olyan energetikai iparági struktúra megteremtése, amelyben a tiszta (CO_2 kibocsátás mentes) hő- és villamosenergia-termelés biztosítja a hazai ellátás túlnyomó részét.

Geotermikus fűtés állami támogatás: Az 519/2020. (XI. 25.) Korm. rendelet alapján 2021.01.01-től 2022.12.31-ig terjedő időszakban otthonfelújítási támogatásban részesülhetnek azok a családok, akik a lakhatási körülményeik javítása érdekében felújítják/modernizálják otthonukat. A támogatandó építési tevékenységek közé tartozik a fűtési rendszer korszerűsítése, vagy elemeinek cseréje, ideértve a megújuló energiaforrások alkalmazását, amik közé a hőszivattyús fűtési rendszer kialakítása teljes mértékben beleillik [16].

Támogatható tevékenységek:

- Geotermikus termelőkút fúrása, kiépítése
- Termelőkúthoz tartozó geotermikus visszasajtoló kút fúrása, kiépítése
- Használatban lévő geotermikus termelőkút és/vagy visszasajtoló kút átalakítása, felújítása
- Használaton kívüli kutak átalakítása, felújítása
- A termelő és visszasajtoló kutakat összekötő vezetékek létesítése
- A gyűjtő és kút-bekötő vezetékek kiépítése a termelői hőközpontig

9. DÍJSZABÁSOK

A H tarifa egy az igénybe vehető áramdíjszabások közül, amelyet azért hoztak létre, hogy egy kedvezményes tarifával lehessen működtetni a hőszivattyúkat és a megújuló energiaforrásokat, például a napenergiát hasznosító fűtési rendszereket. Ezt a különleges díjszabást 2010-ben rendeletben alkották meg, azóta igényelhető az egyetemes áramszolgáltatás keretein belül [17].

- A1 tarifa (legismertebb): általános díjszabás éjjel-nappal ugyanazon az áron
- A2 tarifa (két zónaidős áram): csúcsidőszak és kedvezményes völgyidőszak
- B tarifa (régi éjszakai áram): külön mérővel rendelkező, fix hálózati csatlakozású berendezések
- Geo tarifa (hőszivattyúkhöz): speciális díjszabás kifejezetten hőszivattyús rendszer üzemeltetéséhez
- H tarifa (megújuló energiaforrások és hőszivattyúk): a hőszivattyúkhöz és a megújuló energiaforrásokhoz kiépített rendszerekhez

10. GAZDASÁGI SZÁMÍTÁSOK

Megtérülési példa egy 100 m² hasznos alapterülettel rendelkező épületre:

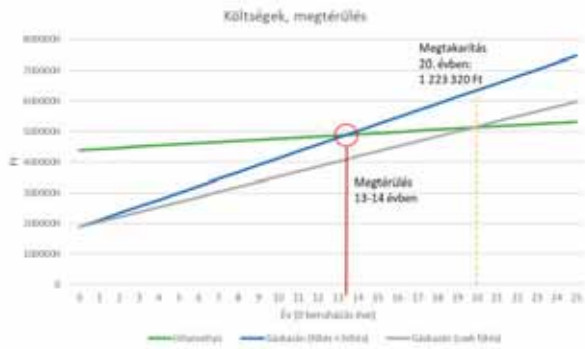
Feltételezve, hogy az épület a 7/2006 (V. 24) TNM rendeletben foglalt hőtechnikai követelményeknek megfelel (energetikailag „fokozottabb” védelemmel ellátott épület, 100 kWh/m²/év fűtési energiaigény alatt), az alábbi megtérülés valószínűsíthető a talajhő-víz hőszivattyú (éves COP 4 értékkel), és a szintén prémium kategóriába tartozó kondenzációs gázkazán (~100% hatásfokkal) összevetésében.

Az épület hűtése geotermikus hőszivattyús rendszernél passzív hűtéssel, gázkazános rendszernél split rendszerű klímákkal (a felületfűtéshez illeszthető folyadékűtős, illetve kútpáros verzióknál nagyságrendekkel kisebb a beruházási költsége) lett figyelembevéve. Az éves primer energiafelhasználás a 22 °C-ot meghaladó külső átlaghőmérsékletet meghaladó napokat veszi figyelembe [18].

Éves hőenergia: Gázkazán esetén 12 630 kWh (fűtés) és 1 570 kWh (hűtés), hőszivattyú esetén 6 190 kWh. Ennek előállításához szükséges energiamennyiség ~1 338 m³ földgáz, még a hőszivattyú esetén 1 548 kWh áram.

A gáz és áram egységárakból számolva, éves üzemeltetési költség gázkazán esetén körülbelül 223 556 Ft, hőszivattyú esetén pedig 37 140 Ft. Beruházási költség gázkazán esetén 1 886 250 Ft, hőszivattyú esetén pedig 4 391 250 Ft. Ezekből az értékekből kiszámolható a megtérülés.

A 10.1 ábrán zölddel jelölve a hőszivattyú, kézzel a gázkazán (fűtés + hűtés esetén), szürkével a gázkazán (csak fűtés esetén). A függőleges tengely Ft, a vízszintes tengely az eltelt évek, ahol a 0 a beruházási év.



10.1. Költségek, megtérülés

A beruházás megtérülése így körülbelül 13-14 év, de más fűtési módokhoz képest ettől jelentősen kedvezőbb is lehet:

2. táblázat Hőszivattyú megtérülés különböző fűtési módokhoz képest

Hőszivattyú	Kond. Gázkazán	Villanykazán	Infra panel	Fapellet
Levegő/víz	14-15 év	4-5 év	7-8 év	14-15 év
Talajhő/víz	13-14 év	5 év	8-9 év	12-13 év
Kútvíz/víz	6-7 év	2-3 év	5-6 év	7 év

11. ÖSSZEGRÉS, KONKLÚZIÓ

Az épületek energiafogyasztásának jelentős hányadát a fűtés és a hűtés teszi ki. A fűtés jelenleg többnyire valamilyen primer energiahordozó égetéséből származó hőenergiájával valósul meg. Az Európai Unió célja 2050-re a teljes karbonsemlegesség, amelyhez szükséges a fűtés és a hűtés energiafelhasználásának megváltoztatása. A fűtés és a hűtés hőszivattyús rendszerekkel is megvalósítható, amelyek amellyel, hogy gazdaságos alternatívák, még környezetbarátok is. Magyarországon jelenleg a megújuló energiaforrásból származó villamosenergia-termelés körülbelül 14,65 %. Ezzel az aránnyal a hőszivattyú 78,66 %-ban megújuló energiahordozót használ, ez jelen helyzetben is kedvezőbb, mint a primer energiahordozókkal megtermelt hőenergia. Magyarország jelentős mértékű geotermikus energia felhasználási potenciállal rendelkezik, amely a 2050-es karbonsemleges tervek eléréséhez elengedhetetlen. Az áramszolgáltatók speciális díjszabással is rendelkeznek, amelyek ösztönzik a hőszivattyúkkal való fűtést és hűtést, illetve a megújuló energiaforrások használatát. Hőszivattyúk telepítéséhez igényelhető állami támogatás, mind cégek, mind magánszemélyek esetében. Durva költségbecslés alapján a megtérülési idő egy gázkazánal szemben (fűtés és hűtési funkciót is végezve) körülbelül 13-14 év, amely idő az állami támogatások igénybevitelével számottevően

csökkenthető, illetve a jövőben még jelentősen tovább csökkenhet a gázárak növekedésével, a technológia további fejlődésével, illetve újabb EU-s és állami pályázatokból származó támogatásokkal. A hőszivattyút mindenképpen a jövő meghatározó fűtés és hűtés megoldásának kell tekintenünk.

12. 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

13. IRODALOM

- [1] K. J. Chua, S. K. Chou, and W. M. Yang, "Advances in heat pump systems: A Review," *Applied Energy*, vol. 87, no. 12, pp. 3611–3624, 2010.
- [2] "Is cooling the future of heating? – analysis," IEA, 13-Dec-2020. [Online]. Available: <https://www.iea.org/commentaries/is-cooling-the-future-of-heating>. [Accessed: 30-Dec-2021].
- [3] "Coefficient of performance (COP) heat pumps," Grundfos, 19-Apr-2021. [Online]. Available: <https://www.grundfos.com/solutions/learn/research-and-insights/coefficient-of-system-performance>. [Accessed: 30-Dec-2021].
- [4] "What's a good seer rating? What is a high-efficiency air conditioner? Trane topics," IR Trane Content Hub, 30-Mar-2021. [Online]. Available: <https://www.trane.com/residential/en/resources/whats-good-seer-rating/>. [Accessed: 30-Dec-2021].
- [5] A. David, B. V. Mathiesen, H. Aeverfalk, S. Werner, and H. Lund, "Heat roadmap europe: Large-scale electric heat pumps in district heating systems," *Energies*, vol. 10, no. 4, p. 578, 2017.
- [6] "Home," Annex 35, 17-Oct-2016. [Online]. Available: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex35/>. [Accessed: 30-Dec-2021].
- [7] K. J. Chua, S. K. Chou, and W. M. Yang, "Advances in heat pump systems: A Review," *Applied Energy*, vol. 87, no. 12, pp. 3611–3624, 2010.
- [8] G.-Y. Ma and H.-X. Zhao, "Experimental study of a heat pump system with flash-tank coupled with scroll compressor," *Energy and Buildings*, vol. 40, no. 5, pp. 697–701, 2008.
- [9] "Current long-term alternative refrigerants and their possible applications" [Online]. Available: https://seors.unfccc.int/applications/seors/attachments/get_attachment?code=743SF600720U6UXDQP NJXNFGNQXRGEIQ. [Accessed: 30-Dec-2021].
- [10] Junkers and Bosch, Tervezési segédlet: Talajhőszivattyúk, fűtéshez és melegvízkészítéshez, vol. 72, 72 vols. Wernau, D-73249: Junkers, 2008.
- [11] Á. Béla, "Földhőszondák hőtechnikai viszonyai hőszivattyús rendszereknél," Ph.D dissertation, SZENT ISTVÁN EGYETEM, Gödöllő, 2012.
- [12] A. Chiasson, *Geothermal heat pump and heat engine systems: Theory and practice*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons Ltd, 2016.
- [13] K. Ferenc and F. Zoltán, "Nem szívás!" *Mérnök Újság a Magyar Mérnöki Kamara lapja*, vol. 5, pp. 24–26, Feb. 2011.
- [14] Hornyák G., Bencs P., *CHANGES IN THE ENERGY PRODUCTION TO REDUCE THE ENVIRONMENTAL IMPACT*, Analecta Technica Szegedinensia, 2021
- [15] - B. -, "Talajszonda engedélyeztetés - közel félmillió árscökkenés 2020-tól!" *energiatudatosotthon.hu*, 22-Jan-2020. [Online]. Available: <https://energiatudatosotthon.hu/talajszonda-engedelyeztetes-kozel-felmillio-arcsokkenes-2020-to/>. [Accessed: 30-Dec-2021].
- [16] "Otthonfelújítási támogatás 2021," Otthonfelújítási támogatás - Hőszivattyútelepítés.hu. [Online]. Available: <https://hoszivattyutelepites.hu/content/35-otthonfelujitasi-tamogatas>. [Accessed: 30-Dec-2021].
- [17] "Minden, Amit Tudni akarsz a H Tarifa Kapcsán!" *Lakossági*. [Online]. Available: https://www.eon.hu/hu/blog/otthon-kenyelme/minden_amit_tudni_akarsz_H_tarifa_kapcsan.html. [Accessed: 30-Dec-2021].
- [18] "Geotherm Kft - Megtérülés kalkulátor," UK. [Online]. Available: <https://www.ukgeotherm.hu/MegterulesSzamitas>. [Accessed: 30-Dec-2021].
- [19] S. S. Bertsch and E. A. Groll, "Two-stage air-source heat pump for residential heating and cooling applications in northern U.S. climates," *International Journal of Refrigeration*, vol. 31, no. 7, pp. 1282–1292, 2008.
- [20] R. Andrushuk and P. Merkel, "MANITOBA HYDRO MONITORING STUDY" *Performance of Ground Source Heat Pumps in Manitoba*, vol. 70, Jun. 2009.
- [21] L. Chen, J. Li, F. Sun, and C. Wu, "Performance optimization for a two-stage thermoelectric heat-pump with internal and external irreversibilities," *Applied Energy*, vol. 85, no. 7, pp. 641–649, 2008.

TÁVVEZETÉK-TORONY OPTIMÁLÁSA EVOLÚCIÓS ÉS VEM TECHNIKÁVAL

OPTIMIZATION OF TRANSMISSION LINE TOWER WITH EVOLUTIONARY AND FEM TECHNIQS

Nagy Szilárd*, Jármái Károly**, Baksa Attila***

ABSTRACT

The optimization of the pylon is shown in this paper. The optimization is made by using flower pollination algorithm. The objective function is mass of the structure. The design constraints are static stress, local buckling and buckling. The unknowns are the typical dimensions of the circular hollow section truss. Parametric inspections have been made changing yield strength of material and the number of grid divisions. The results show that the use of higher yield strength steels, do not imply a lighter structure.

1. BEVEZETÉS

A gyakorlatban alkalmazott acél távvezeték tartó tornyok kialakítása rácsos szerkezetű [1]. A leggyakrabban szögacél szelvényű rudakból épülnek fel. A szögacél-szelvény előnye az egyszerű szerelhetőségben rejlik, de nagy hátránya, hogy nagyon kicsi a kihajlási szilárdsága [2]. Körcső (CHS) szelvények alkalmazása jobb tömeg minimumot eredményezhet köszönhetően a jobb kihajlási szilárdságnak [3].

Az acél távvezeték-tornyok rendszerint két részre oszthatóak. Egy csonka gúla formájú rácsos alsó félre, és egy a vezetékek rögzítésére szolgáló felső részre. Az utóbbiak kialakítása változatos formát vehet fel, ezért jelen esetben csak az alsó rész optimalizálásával foglalkozunk.

Az optimalizáláshoz az ön-adaptív differenciális evolúciót (SaDE) [4] alkalmazunk. Az algoritmussal az optimalizálás jól automatizálható, mivel nincs szükség az eredményt befolyásoló paraméterek finomhangolására.

2. ÖN-ADAPTÍV DIFFERENCIÁLIS EVOLÚCIÓ

Az eredeti differenciális evolúció (DE) Storn és Price javasolta [5]. A DE iterációs lépések sorozatán keresztül javítja n_p elemű populáció D dimenziójú \mathbf{x} egyedeit.

$$\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_D]^T \in S \subset \mathbb{R}^D \quad (1)$$

ahol S a keresési tér. Ideális esetben a kezdeti populáció véletlenszerűen lefedi a teljes keresési teret. Az egyed minden egyes változója egyenletes eloszlású véletlen szám a keresési térben.

A DE minden egyes iterációs lépésben, vagyis generációnként három művelet ismételt végrehajtásával állítja elő az új egyedeket. Ezek név szerint a mutáció, keresztezés és visszahelyezés műveletek.

A mutáció művelet során minden egyes G generációs ${}^G\mathbf{x}_i$ egyedhez előállít egy ${}^G\mathbf{v}_i$ mutánst az alábbi öt stratégia egyikével:

- DE/rand/1:

$${}^G\mathbf{v}_i = {}^G\mathbf{x}_{r_1} + F({}^G\mathbf{x}_{r_2} - {}^G\mathbf{x}_{r_3}) \quad (2)$$

- DE/best/1:

$${}^G\mathbf{v}_i = {}^G\mathbf{x}_b + F({}^G\mathbf{x}_{r_1} - {}^G\mathbf{x}_{r_2}) \quad (3)$$

- DE/current to best/2:

$${}^G\mathbf{v}_i = {}^G\mathbf{x}_i + F({}^G\mathbf{x}_b - {}^G\mathbf{x}_i) + F({}^G\mathbf{x}_{r_1} - {}^G\mathbf{x}_{r_2}) \quad (4)$$

- DE/best/2:

$${}^G\mathbf{v}_i = {}^G\mathbf{x}_b + F({}^G\mathbf{x}_{r_1} - {}^G\mathbf{x}_{r_2}) + F({}^G\mathbf{x}_{r_3} - {}^G\mathbf{x}_{r_4}) \quad (5)$$

- DE/rand/2:

$${}^G\mathbf{v}_i = {}^G\mathbf{x}_{r_1} + F({}^G\mathbf{x}_{r_2} - {}^G\mathbf{x}_{r_3}) + F({}^G\mathbf{x}_{r_4} - {}^G\mathbf{x}_{r_5}) \quad (6)$$

ahol $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq r_4 \neq r_5 \in [1, n_p]$ véletlen indexek, $F \in [0, 2)$ skálázó tényező és ${}^G\mathbf{x}_b$ a G . generáció legfittebb egyede.

A mutációt követi a „binominális” keresztezés, mely kombinálja az újonnan létrehozott ${}^G\mathbf{v}_i$ mutánst a vele azonos indexű ${}^G\mathbf{x}_i$ egyeddel

* PhD hallgató, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

** egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

*** egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Műszaki Mechanikai Intézet

$${}^G \mathbf{u}_{j,i} = \begin{cases} {}^G \mathbf{v}_{j,i} & U_j(0,1) \leq C_R \text{ vagy } j = j_R \\ {}^G \mathbf{x}_{j,i} & \text{egyébként} \end{cases} \quad (7)$$

ahol $U_j(0,1)$ egy $[0,1]$ félig zárt intervallumon vett egyenletes eloszlású véletlen szám, $C_R \in [0,1]$ a keresztezési arány és $j_R \in [1, D]$ véletlen index.

Szelekció során, ha az újonnan generált ${}^G \mathbf{u}_i$ egyed fitness értéke jobb, mint a ${}^G \mathbf{x}_i$ egyedé, akkor bekerül az új generációs populációba, ha nem akkor az algoritmus eldobja

$${}^{G+1} \mathbf{x}_i = \begin{cases} {}^G \mathbf{u}_i & f({}^G \mathbf{u}_i) \leq f({}^G \mathbf{x}_i) \\ {}^G \mathbf{x}_i & \text{egyébként} \end{cases} \quad (8)$$

A differenciális evolúció működését, és ebből adódóan az optimalás sikerességét nagyban befolyásolja a választott mutációs stratégia, az F skálázási tényező értéke és a C_R keresztezési arány. Ezen paraméterek megválasztása sokszor fáradságos munka. Előfordulhat, hogy számos kombinációt ki kell találni, mire sikeres lesz a feladat megoldás. Az ön-adaptív differenciális (SaDE) [4] evolúció erre kínál megoldást.

A (2) egyenlettel definiált „DE/rand/1” mutációs stratégia és (4) szerint meghatározott „DE/current to best/2” között iterációs lépésként egy p valószínűségi változó szerint véletlenszerűen választ. A p értékét l_p szabadon választott iteráció szám után frissíti

$$p = \frac{n_{s1}(n_{s2} + n_{f2})}{n_{s2}(n_{s1} + n_{f1}) + n_{s1}(n_{s2} + n_{f2})} \quad (9)$$

ahol n_{s1} és n_{s2} az első, illetve a második stratégia által generált és sikeresen a következő generációba lépő egyedek száma, n_{f1} és n_{f2} pedig az egyes stratégiák által létrehozott, de a következő generációba nem lépő egyedek száma.

A skálázási faktor minden egyes mutáció előtt frissül. Értéke egy $(0,2]$ intervallumba eső normál eloszlású véletlen szám, mely várható értéke 0,5 szórása pedig 0,3.

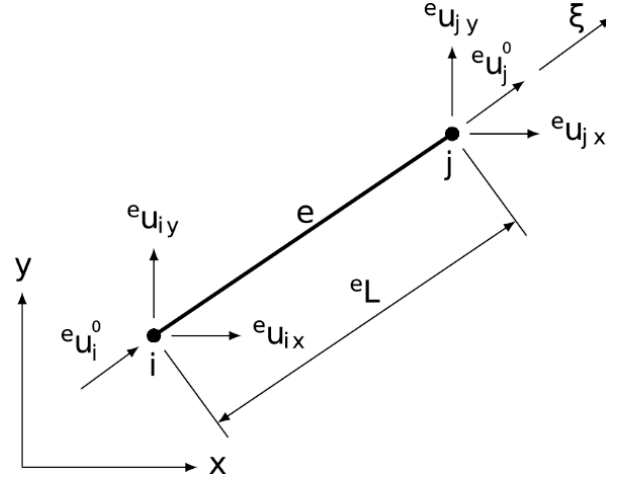
A C_R keresztezési arány is egy normál eloszlású véletlen szám a, mely várható értéke C_{Rm} és szórása 0,1. A C_{Rm} érték l_C iterációnként frissül, és értéke a következő generációba sikeresen lépő egyedekhez tartozó C_R értékek átlaga. A C_R keresztezési arány l_R iterációs lépésként frissül, és $l_R \ll l_C$.

3. RÁCSOSTARTÓK VÉGESELEM-MODELLJE

A rácsos szerkezetű tartók esetében a csomópont csatlakozásokat csuklós kapcsolattal modellezzük [6]. Csomóponti excentricitások, csak a tartót alkotó elemek metszéspontjából adódnak. A csomóponti excentricitások nyomatékot generálnak, melyek a számítások során figyelmen kívül hagyhatóak, ha az excentricitás értéke $-0,55D \leq e \leq 0,25D$ határok

között van CHS keresztmetszet esetén. A merev csomópontokkal történő számítás nem javasolt, még abban az esetben se, ha hegesztett kötéssel kapcsolódnak egymáshoz [6], mert túlzott nyomatékot generálnak a rácsrudakban.

Sík és térbeli rácsos tartók modellezhetőek húzott-nyomott rúdelemekkel (1. ábra). Csomóponti elmozdulás csak az i és j csomópontokon átmenő ξ tengely (helyi koordináta-rendszer) mentén lehetséges. A szerkezethez kötött $x - y$ globális koordináta-rendszerben pedig ezen elmozdulás x, y vetületei értelmezettek.



1. ábra Húzott-nyomott síkbeli rúdelem

A rúdelemen belüli elmozdulást közelítse a [7]

$$\begin{aligned} {}^e \mathbf{u}(\xi) &= \begin{bmatrix} \xi_i - \xi & \xi_j - \xi \\ eL & eL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^e \mathbf{u}'_i \\ {}^e \mathbf{u}'_j \end{bmatrix} \\ &= [{}^e \mathbf{N}_i(\xi) \quad {}^e \mathbf{N}_j(\xi)] \begin{bmatrix} {}^e \mathbf{u}'_i \\ {}^e \mathbf{u}'_j \end{bmatrix} \\ &= {}^e \mathbf{N} {}^e \mathbf{u}' \end{aligned} \quad (10)$$

függvény, amely kinematikailag lehetséges, ahol ${}^e L$ a rúdelem hossza, ${}^e \mathbf{N}$ alak függvények mátrixa, és ${}^e \mathbf{u}'$ a rúdhoz kötött lokális koordináta rendszerben értelmezett csomóponti elmozdulások vektora. A globális koordináta rendszerben pedig a csomóponti elmozdulások vektora

$${}^e \mathbf{u} = [{}^e u_{ix} \quad {}^e u_{iy} \quad {}^e u_{jx} \quad {}^e u_{jy}]^T \quad (11)$$

alakban írható fel. A két koordináta-rendszer között az átjárás a transzformációs mátrixszal lehetséges

$${}^e \mathbf{T} = \begin{bmatrix} {}^e T_{11} & {}^e T_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & {}^e T_{23} & {}^e T_{24} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$${}^e T_{11} = {}^e T_{23} = \frac{{}^e u_{jx} - {}^e u_{ix}}{{}^e L} \quad (13)$$

$${}^e T_{12} = {}^e T_{24} = \frac{{}^e u_{jy} - {}^e u_{iy}}{{}^e L} \quad (14)$$

$${}^e \mathbf{u}' = {}^e \mathbf{T} {}^e \mathbf{u} \quad (15)$$

A rúdelem fajlagos nyúlása

$${}^e \varepsilon = \frac{d{}^e u(\xi)}{d\xi} = \frac{1}{{}^e L} [-1 \quad 1] {}^e \mathbf{u}' \quad (16)$$

továbbá a tengelyirányú normál feszültség

$${}^e \sigma = E {}^e \varepsilon = \frac{E}{{}^e L} [-1 \quad 1] {}^e \mathbf{u}' \quad (17)$$

ahol E a rugalmassági modulusz. Az ${}^e A$ keresztmetszetű prizmatikus rúd alakváltozási energiája

$$\begin{aligned} {}^e U &= \int_L {}^e A {}^e \sigma {}^e \varepsilon d\xi \\ &= \frac{1}{2} {}^e \mathbf{u}'^T \frac{{}^e A E}{{}^e L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} {}^e \mathbf{u}' \\ &= \frac{1}{2} {}^e \mathbf{u}'^T {}^e \mathbf{K}' {}^e \mathbf{u}' \end{aligned} \quad (18)$$

ahol ${}^e \mathbf{K}'$ az elem merevségi mátrixa. A külső erők munkája pedig

$${}^e W = \int_L {}^e u(\xi) p d\xi = {}^e \mathbf{u}'^T {}^e \mathbf{f}' \quad (19)$$

ahol ${}^e \mathbf{f}'$ a külső terhelések csomópontba redukált terhelés vektora. Egy elem teljes potenciális energiája

$${}^e \Pi_p = {}^e U - {}^e W = \frac{1}{2} {}^e \mathbf{u}'^T {}^e \mathbf{K}' {}^e \mathbf{u}' - {}^e \mathbf{u}'^T {}^e \mathbf{f}' \quad (20)$$

szerint alakul, globális koordináta rendszerben értelmezett mennyiségekkel pedig

$${}^e \Pi_p = \frac{1}{2} {}^e \mathbf{u}^T {}^e \mathbf{K} {}^e \mathbf{u} - {}^e \mathbf{u}^T {}^e \mathbf{f} \quad (21)$$

ahol

$${}^e \mathbf{K} = {}^e \mathbf{T}^T {}^e \mathbf{K}' {}^e \mathbf{T} \quad (22)$$

$${}^e \mathbf{f} = {}^e \mathbf{T}^T {}^e \mathbf{f}' \quad (23)$$

Bevezetve az \mathbf{u} összes csomóponti elmozdulás vektort, és az \mathbf{f} összes csomóponti terhelések vektorát a teljes szerkezet potenciális energiája

$$\Pi_p = \frac{1}{2} \mathbf{u}^T (\mathbf{K} \mathbf{u} - \mathbf{f}) \quad (24)$$

ahol \mathbf{K} az elemillesztés szabályait (lásd [7], [8] irodalmakban) betartva a teljes szerkezet merevségi mátrixa. Egyensúlyban a Π_p potenciális energia minimális, ha az első $\delta \Pi_p$ variációja zérus [9],[10]. A peremfeltételek (megfogások, stb.) alkalmazása mellett a $\delta \Pi_p = 0$ egyenlet értelmében a megoldandó algebrai egyenletrendszer

$$\delta \Pi_p = \delta \mathbf{u}^T \frac{\partial \Pi_p}{\partial \mathbf{u}} = \mathbf{K} \mathbf{u} - \mathbf{f} = 0 \quad (25)$$

A rúd elemenkénti tengely irányú normál feszültsége számítható (25) egyenlet megoldásával kapott \mathbf{u} összes csomóponti elmozdulás vektorból

$${}^e \sigma = \frac{E}{{}^e L} [-{}^e T_{11} \quad -{}^e T_{12} \quad {}^e T_{11} \quad {}^e T_{12}] {}^e \mathbf{u} \quad (26)$$

4. OPTIMÁLÁSI FELADAT

A rácsos tartók optimálása korlátos optimálási feladat

$$\begin{aligned} \min. f(\mathbf{x}) \quad \mathbf{x} &= [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_D]^T \in \mathbb{R} \\ g_i(\mathbf{x}) &\leq 1 \quad 1 \leq i \leq q \\ h_j(\mathbf{x}) &= 0 \quad 1 \leq j \leq r \end{aligned} \quad (27)$$

ahol \mathbf{x} a független változók vektora, D a független változók száma, $f(\mathbf{x})$ az optimálandó célfüggvény, $g_i(\mathbf{x})$ egyenlőtlenségi feltételek, $h_j(\mathbf{x})$ egyenlőségi feltételek és q , r az egyenlőtlenségi, egyenlőségi feltételek száma.

Jelen esetben az optimálás célja a tömegminimum elérése

$$f(\mathbf{x}) = \rho \sum_{e=1}^{n_e} {}^e A {}^e L \quad (28)$$

ahol n_e a rúdelemek száma és ρ a sűrűség.

A szerkezetnek szilárdsági, és stabilitási követelményeknek kell megfelelnie. Jelen esetben három kritérium került figyelembevételre. A húzott rudak esetén a húzófeszültséggel szembeni ellenállás, a nyomot rudaknál pedig a kihajlás és végül a helyi horpadás. Ezen jellemzőket a keresztmetszeti kihasználtsági tényezővel jól lehet jellemezni.

A húzott és nyomott rudak húzással és nyomással szembeni ellenállását lehet egy egyenlőtlenségi feltétel definícióval értelmezni, abban az esetben, ha a terhelésből származó feszültséget előjelesen értelmezzük. A negatív feszültség nyomást jelent, míg a pozitív húzást

5. SZÁMPÉLDA

$$g_{ii} = \begin{cases} \frac{\gamma_{M0}|e\sigma|}{\chi f_y} \leq 1 & e\sigma < 0 \\ \frac{\gamma_{M0}|e\sigma|}{f_y} \leq 1 & e\sigma \geq 0 \end{cases} \quad (29)$$

ahol f_y a folyáshatár, γ_{M0} a biztonsági tényező [11] szerint és χ kihajlási tényező [11] szerint

$$\chi = \begin{cases} 1 & \bar{\lambda} \leq 0,2 \\ \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 + \bar{\lambda}^2}} & \bar{\lambda} > 0,1 \end{cases} \quad (30)$$

ahol

$$\phi = 0,5(1 + 0,21(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2) \quad (31)$$

és $\bar{\lambda}$ karcsúsági tényező

$$\bar{\lambda} = \pi k L \sqrt{\frac{A}{I_x} \frac{f_y}{E}} \quad (32)$$

ahol I_x a rúd keresztmetszet másodrendű nyomatéka, k kihajlási hossz tényező, mely értéke közbenső rudak esetén $k = 1$ a megfogott rudaknál pedig $k = 0,7$.

A körcső-szelvények esetén helyi lemezhorpadásra [11] ajánlását felhasználva az egyenlőtlenségi feltétel

$$g_{ii} = \frac{df_y}{21150t} \leq 1 \quad (33)$$

mely csak abban az esetben igaz, ha f_y folyáshatár mértékegysége MPa, d átmérő és t falvastagság mértékegysége mm.

Felhasználva (28), (29) és (33) egyenleteket az optimalizálható fitness függvény

$$\mathcal{F}(\mathbf{x}) = \rho \sum_{e=1}^{n_e} e A^e L + \sum_{i=1}^{n_e} p(g_{ii}(\mathbf{x})) + \sum_{i=1}^{n_k} p(g_{kii}(\mathbf{x})) \quad (34)$$

ahol n_k az eltérő méretű körcsőszelvények száma, és p büntető statikus függvény

$$p(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0 & g(\mathbf{x}) \leq 1 \\ 10^6 g(\mathbf{x}) & g(\mathbf{x}) > 1 \end{cases} \quad (35)$$

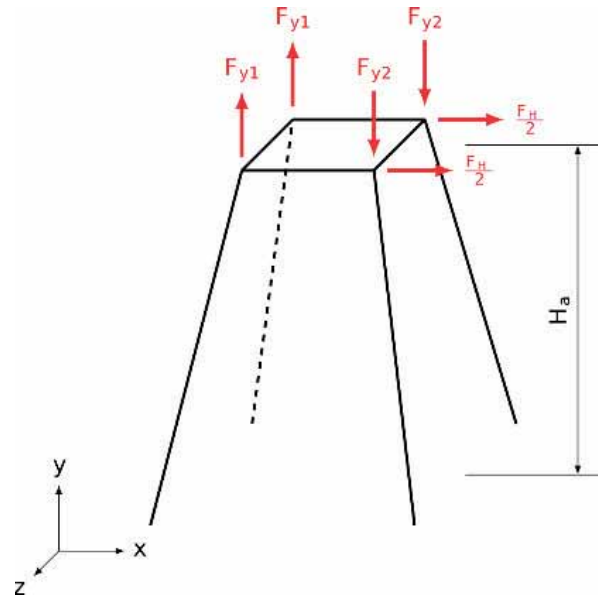
Az \mathbf{x} független változók vektora a körcsőszelvény jellemző méreteit tartalmazza, úgymint d külső átmérő és t falvastagság

$$\mathbf{x} = [d_1 \ d_2 \ \dots \ d_{n_k} \ t_1 \ t_2 \ \dots \ t_{n_k}]^T \quad (36)$$

Az optimalizálási probléma számszerűsítéséhez egy 45m magas, közbenső torony került kiválasztásra. A szerkezet két részre bontható egy $H_f = 21$ m magas felső, és egy $H_a = 24$ m magas alsó részre (lásd 2. ábra).

A terhelések a [12] szerint kerültek felvételre. A mértékadó terhelés fél vezeték húzás.

A [12] szerinti számítások részletezése nélkül egy 400m toronytávolságú, 12 áramvezetékes, 40kN becsült önsúlyú felső toronyrészről alsó toronyrészre átadó terhelések: 1,1 biztonsági tényezővel számított függőleges erő $F_V = 209,03$ kN, fél vezeték-húzásból adódó vízszintes erő $F_H = 312,14$ kN és hajlító nyomaték $M_h = 2850,5$ kNm.



2. ábra Alsó rész vázlatja

A 2. ábra szerinti négyzetes alapterületű csongagúla alakú alsó toronyrész csúspontjaiba redukált erőrendszer:

$$F_{y1} = \frac{M_h}{2a_2} - \frac{F_V}{4} = 332,94 \text{ kN} \quad (37)$$

$$F_{y2} = \frac{M_h}{2a_2} + \frac{F_V}{4} = 437,46 \text{ kN} \quad (38)$$

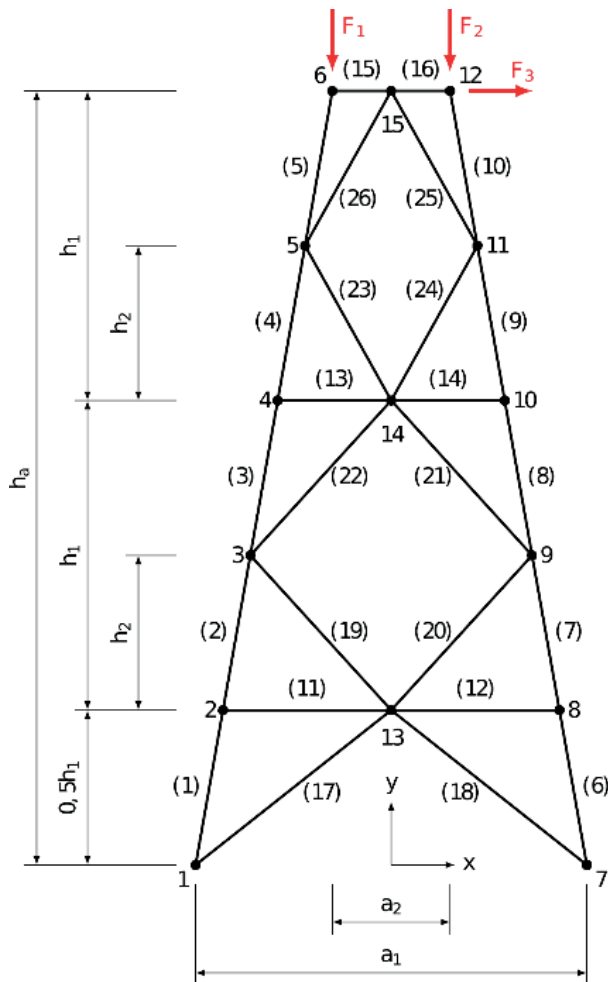
ahol $a_2 = 3,7$ m felső toronyszélesség.

A számításokat elegendő csak egy a terhelés szempontjából lényeges ferde síkon végezni (3. ábra). Egy $\beta_0 = 80^\circ$ oldalferdeségű gúla esetén a 3. ábra jelöléseivel a vizsgált ferde síkra ható erők:

$$F_1 = \frac{F_{y1}}{\sin \beta_0} = \frac{332,94 \text{ kN}}{\sin 80^\circ} = 338,08 \text{ kN} \quad (39)$$

$$F_2 = \frac{F_{y2}}{\sin \beta_0} = \frac{437,46 \text{ kN}}{\sin 80^\circ} = 444,21 \text{ kN} \quad (40)$$

$$F_3 = \frac{F_H}{2} = \frac{312,14 \text{ kN}}{2} = 156,07 \text{ kN} \quad (41)$$



3. ábra Síkbeli rácsos-tartó

A 3. ábra egy $n_r = 2$ rácsosztású példát szemléltet. A további vizsgálatok során több osztású feladat is megoldásra kerül. A rácsosztások csökkentése, illetve növelése a

$$h_1 = \frac{h_a}{2,5n_r} \quad (42)$$

összefüggés alapján történik. Az így kapott n_r darab egyenlő rész, deltoid rácsosztást kap vízszintes összekötő rudakkal. Az alsó $0,5h_1$ magasságú rész pedig egy az egyik oldalán nyitott háromszög rácsosztást. Ez a megfontolás teszi lehetővé, több csak rácsosztás számában eltérő topológia egyszerű összehasonlítását. A több vagy kevesebb rácsosztású topológiák esetén a 3. ábra

jelölésétől a rudak és csomópontok sorszámozása eltér, de a továbbiakban az azonos funkciójú rudak azonosítása a 3. ábra jelöléseivel fog történni.

6. OPTIMALIZÁLÁS EREDMÉNYEI

Az optimalizálás során a fitness függvény minden esetben folyamatosan konvergált egy értékhez. Több egymás utáni futtatás eredménye is 0,1% hibán belül volt. Ezért az eredményeket globális minimumnak, és az így kapott szerkezetet optimálisnak tekinthető, habár teljes bizonyossággal az evolúciós algoritmusok tulajdonságaiból adódóan ezt nem lehet állítani.

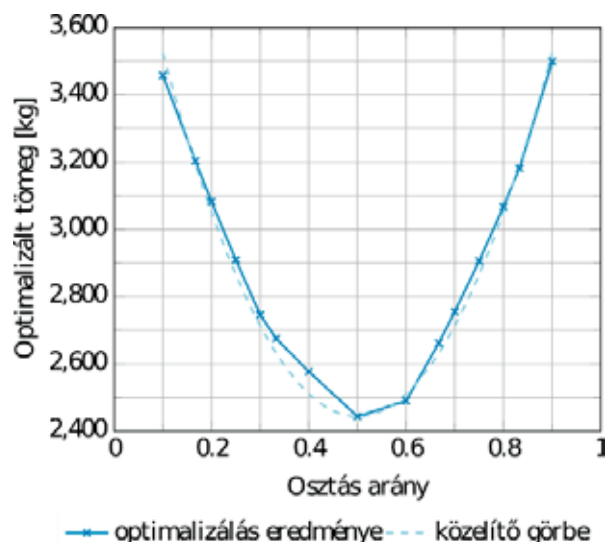
A 3. ábra szerint a deltoid csúcspontja felez egy rácsosztáshoz tartozó oldalt. Megvizsgáltuk, hogyan változik az optimalizált tömeg, ha ettől eltérünk. Az eredményeket szemlélteti a 4. ábra az h_r osztás arány változásának függvényében.

$$h_r = \frac{h_2}{h_1} \quad (43)$$

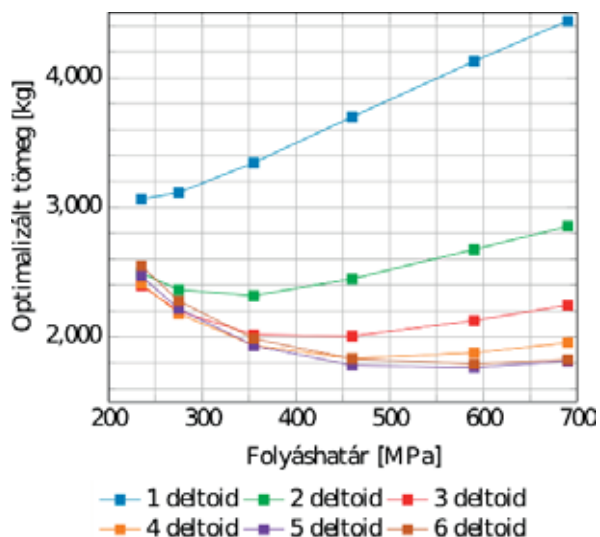
A legkisebb tömegű szerkezetet akkor kapjuk, ha a deltoid pont felezi az adott rácsosztást (4. ábra). Ha ettől eltérünk jobbra vagy balra, a tömeg másodfokú polinommal közelíthető az optimumhoz képest százalékban kifejezve

$$m_{\%} = 2,764(h_r - 0,5)^2 \quad (44)$$

Megvizsgálásra került, hogy hogyan változik az optimalizált tömeg, ha különböző minőségű acélokból készül a szerkezet. Ennek az eredményét szemlélteti a 5. ábra. A folyáshatár növekedésével az optimumhoz tartozó rácsosztásokat adó deltoidok száma is nő.

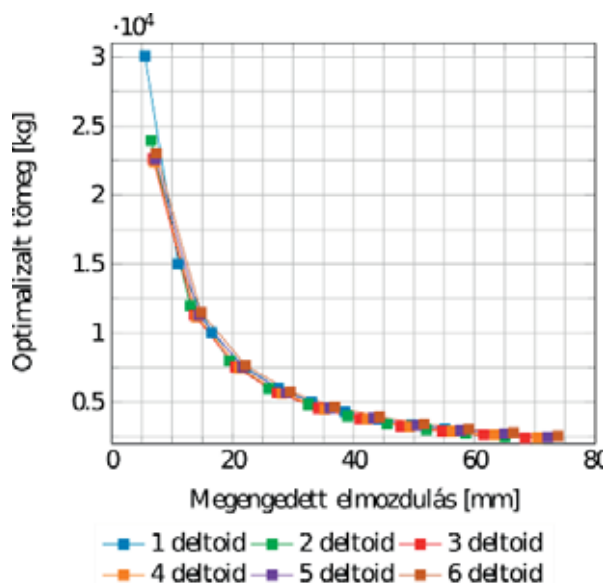


4. ábra Optimalizálás eredménye változó osztásarány mellett



5. ábra Optimalizálás eredménye változó anyag minőségekkel és rácsosztás számmal

A harmadik egyben ebben a témakörben az utolsó vizsgálat tárgyát az képezi, hogy miként változik a szerkezet tömege, ha a 3. ábra jelölései alapján a jobb felső 12-es csomópont elmozdulását korlátozzuk. Az eredményeket a 6. ábra szemlélteti.



6. ábra Tömeg változása a megengedett elmozdulás függvényében.

Az elmozdulás korlátot milliméterben megfogalmazva, az tapasztalható, hogy a tömeg hiperbolikusan nő és jó közelítéssel független a rácsosztások számától.

$$m_{\%} = 2,764(h_r - 0,5)^2 \quad (45)$$

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A bemutatott evolúciós technika – ön-adaptív differenciális evolúció – összekapcsolása végeelem-moddal egy hatékony eszközt kínál rácsos tartók optimalizására. Jövőben kiegészítve a csomóponti excentricitások figyelembevételével, és a rudak metszéspontjában a helyi képlékeny alakváltozást korlátozó feltételekkel teljes értékű általánosan használható segédlet lehet.

A bemutatott távvezeték oszlop alsó részének optimalizálása során deltoid rácsosztást használva a tömeg minimum akkor adódik, ha a rácsrúd felezi az övrudat.

A jobb minőségű acél használata nem feltétlen eredményez kisebb tömegű szerkezetet, ha a rácsosztások száma nem változik. A folyáshatár növekedésnek kettős hatása van. Egyrészt növeli a maximálisan megengedhető feszültséget, másrészt rontja a χ kihajlási tényezőt. Ez azt eredményezi, hogy rövidebb, kevésbé karcsú rudakat kell alkalmazni.

A legnagyobb elmozdulással rendelkező csomópont elmozdulását korlátozva a tömeg hiperbolikusan nő.

8. KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka részben a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatásával a K 134358 nyilvántartási számú projekt keretében valósul meg.

9. IRODALOM

- [1] RAO G. V.: Optimum design for transmission line towers. *Computers & Structures*, Vol. 57, No. 1, (1995), pp. 81–92.
- [2] SILVA J. G. S., VELLASCO P. C. G., ANDRADE S. A. L., OLIVEIRA M. I. R.: Structural steel design and behaviour; Steel structures; Spatial structures; Telecommunication and transmission towers. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 61, No. 8, (2005)
- [3] ORBÁN F., FARKAS, J., JÁRMAI, K.: Optimum design of a transmission line tower : Welded tubular truss structure. *6th European Conference on Steel and Composite Structures*, Eurosteel 2011, Brussels
- [4] QIN A. K., SUGANTHAN P. N.: Self-adaptive differential evolution algorithm for numerical optimization, *IEEE Congress on Evolutionary*

- Computation*, Vol. 2, (2005), pp. 1785-1791, doi: 10.1109/CEC.2005.1554904.
- [5] STORN R., PRICE K. V.: Differential evolution – A simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces, *Journal of Global Optimization*, Vol. 11, (1997), pp. 341-359.
- [6] WARDENIER J., KUROBANE Y., PACKER J. A., ZHAO X.-L.: *Design guide for circular hollow section (CHS) joints under predominantly static loading*, CIDECT 2008, ISBN 978-3-938817-03-2
- [7] FERREIRA A. J. M., FANTUZZI N.: *MATLAB Codes for Finite Element Analysis*, Springer, Cham, 2020, ISBN 978-3-030-47951-0, doi: 10.1007/978-3-030-47952-7
- [8] SMITH I. M., LEE M.: *Programming the Finite Element Method, 5th edition*, John Wiley and Sons Ltd, London 2013, ISBN 978-1-119-97334-8
- [9] PÁCZELT I.: *Végeselem-módszer a mérnöki gyakorlatban*, Miskolci Egyetemi Kiadó, Miskolc 1999, ISBN 963-661-312-5
- [10] PÁCZELT I., BAKSA A., SZABÓ T.: *A végeselem-módszer alapjai*, HEFOP jegyzet, Miskolc, 2007, pp. 243
- [11] EN 1993-1-1:2009: *Eurocode 3: Design of steel structures - part 1-1 General rules and rules for buildings*, European Committee Standardization, Brussels, (2009).
- [12] MSZ 151-1:2000: *Villamos légvezetékek. 1 kV-nál nagyobb névleges feszültségű légvezetékek szerelési követelményei*, Magyar Szabványügyi Testület, Budapest, (2000)

KERETSZERKEZETEK OPTIMÁLIS MÉRETEZÉSE KÜLÖNBÖZŐ TERHELÉSI ESETEKRE

OPTIMAL DESIGN OF FRAME STRUCTURES FOR DIFFERENT LOADS

*Petrik Máté**, *Jármai Károly***

ABSTRACT

Frame structures are structures built of straight, less frequently curved bars, designed to support planar or spatial loads. These frame structures are generally considered to be statically indeterminate structures, so that several methods can be used to determine their loads, but all require some simplification. This paper is not concerned with the investigation of these theories for determining loads, but with the optimal design of a frame structure of a given geometry. Several different loads have been considered, where the value of the wind load in the horizontal direction has not been neglected. The optimization problem has been formulated mathematically such that the compressive forces and bending moments acting on both the horizontal beam and the vertical column, as well as their composite loads, are below the limit value determined by the material properties. The column connections were assumed to be fully rigid and welded I-sections were considered for both columns. Eurocode 3 was applied for local dents.

1. BEVEZETÉS

A hegesztett fémszerkezetek nagy jelentőséggel bírnak az ipari és a mezőgazdasági szektorban is. Mivel ezek a szerkezetek karcsú rúdelemekből épülnek fel, az egyik legfontosabb stabilitásvesztési probléma a kihajlás jelensége. Amint azt a 17. század közepe óta tudjuk, Euler munkássága révén, a húzó igénybevételnek kitett rudak viselkedése könnyen és pontosan predesztinálható, míg a nyomó igénybevételnek kitett rudak meghibásodása, azaz kihajlása sokkal inkább statisztikai viselkedést mutat, amely miatt a számítása is problémásabb. Ennek következtében célszerű lenne olyan szerkezeteket tervezni, melyeknek rúdjai húzásnak vannak kitéve. Ez például hidak tervezésénél meg is valósulhat (függőhidak esetében), keretszerkezetek esetén viszont elkerülhetetlen a kihajlás ellenőrzése.

Vegyipari üzemek acélszerkezetének tervezésekor elvileg nem ütközünk magassági korlátokba. Horizontális építési mód esetén kis szelvény keresztmetszetekre van szükség, azonban ez nagy

alapterületet igényel, így sok veszteség jelenne meg a közegek áramoltatása során. Vertikális építési mód esetén viszont a készülékek sokkal közelebb kerülhetnek egymáshoz, így csökkenthetők a veszteségek, azonban a szelvények méretei is jelentősen megnövekednének, egyrészt a készülékek súlya, másrészt a gerendák önsúlya következtében. Nem szabad elfelejtenünk egy ilyen szerkezet tervezése esetén a balesetek következtékora a kezelőszemélyzet beavatkozási idejéről sem, ami egyik szélsőséges esetben sem mondható ideálisnak [1,2].

Tudománytörténeti szempontból először Galilei foglalkozott a kihajlás problémájával, melyet később, 1778-ban Euler oldott meg [3]. Az általa készített modell erősen idealizált volt: tökéletesen prizmatikus rudat és koncentrikus terhelést feltételezett. Közel száz évvel később Ayrton és Perry [4] a kezdeti pontatlanságokat, majd újabb száz évvel később Beer és Schulz [5] már a hegesztések hatását is figyelembe vették a számítások során. Ezeknek az elméleteknek a kombinálásával alkották meg az Eurocode szabványokban [6] leírt kihajlási feltételeket, melyek alapján számíthatók a vizsgált gerendák.

Azonban a vázolt oszlopok terhelése nem önmagukban történik, hanem valamilyen keret függőleges oszlopaként vagy vízszintes gerendájaként, melyek csatlakoztatása hegesztett vagy csavarozott kötésekkel történhet. Előbbiek merev, utóbbiak félmerev csatlakozásnak tekinthetők a számításokban. Csavarozott esetben a kötőelemek elmozdulásai szögtorzulást okozhatnak, melyek a gerendákban fellépő hajlítónyomatékra, normál- és nyíróerőkre és a váz stabilitására is hatással lesznek. Jelen tanulmány Glushkov [7] munkásságára támaszkodva különböző függőleges és vízszintes terhelésekkel terhelt keretszerkezetek optimális méretezése során kapott eredmények összehasonlítását mutatja be.

A vizsgált keretszerkezeteket nem csupán az alátámasztandó készülékek tömege, hanem természeti erők is terhelik. Ezek a természeti terhek azonban erősen földrajzi elhelyezkedés- és évszakfüggők lehetnek. A vizsgált szerkezet akár egy kompresszor csarnok is lehet, tetővel és oldalfalakkal burkolva, így a hóterhelés, a szélterhelés és a földrengés terhelés is figyelembe veendő

* adjunktus, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

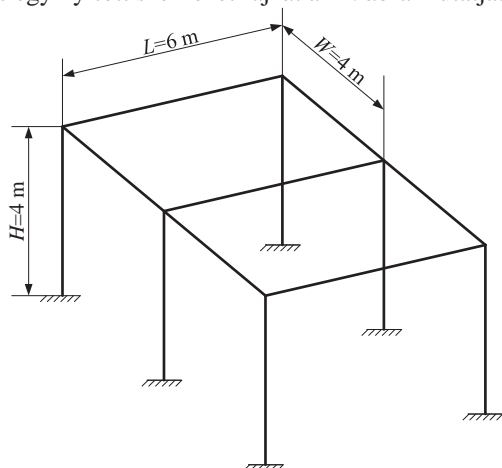
**egyetemi tanár, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

a méretezés során. A hőterhelés függőleges irányú megoszló terhelést, a szél vízszintes irányú megoszló terhelést jelent. A földrengés vagy szeizmikus terhelés a nevéből adódóan földrengésből, forgó gépek működéséből vagy a közlekedő járművekből származhat, és a kifáradásra és a rezonancia-katasztrófára lesz hatással.

A szélterhelés kettős szempontból terheli az épületet: egyrészt egy felületen megoszló terhelésként, másrészt a szélirány, a szélesség és az épület alakjának kölcsönhatásából olyan örvényleválások keletkezhetnek, melyek a szerkezet rezonancia-katasztrófáját okozhatják, ahogy ez történt a Tacoma Narrows híd összeomlásánál is [8].

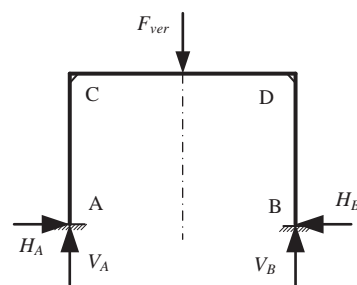
2. SZÁMÍTÁSI MÓDSZER

A tanulmány készítése során azonos peremfeltételekkel rendelkező keretszerkezetek optimális méretezése valósult meg. Különböző terhelések esetén az összehasonlíthatóság a keretek geometriai méretének azonossága mellett az egyenértékű terhelési faktor volt. A geometriai méretek lekötése nélkül az optimálás megvalósítása nem következhetett be. Ezek miatt egy olyan keretszerkezet számítása történt meg, ahol az oszlopok magassága 4 m, a fesztáv 6 m, az oszlopok távolsága pedig szintén 4 m volt. Két alapvetően különböző terhelés lett figyelembe véve: szélterhelés nélküli és szélterheléses eset. Az előbbi, vagyis egy nyitott szerkezet rajzát az 1. ábra mutatja.



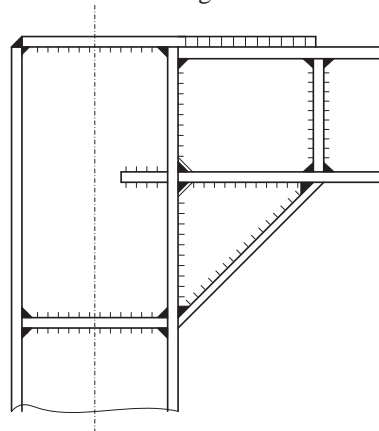
1. ábra Nyitott keretszerkezet

Az ábrán látszik, hogy a szerkezet szimmetrikus, és a számításnál gyakorlatilag elegendő csupán egy egyszerű keret számítását elvégezni, amely két függőleges oszlopból és egy vízszintes gerendából épül fel. Ebben az esetben a koncentrált erőként és egyenletesen megoszló terhelésként modellezett terhelést feltételezve azokat a szelvény geometriai értékeket keressük, amely képes elviselni a feltételezett terhelést és ezek mellett a legkisebb tömeggel rendelkezik. A 2. ábra a koncentrált erő modelljét mutatja.



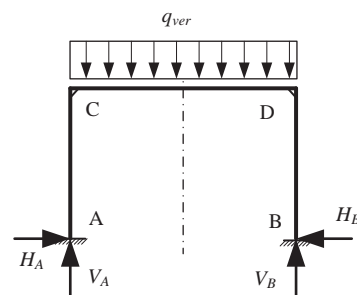
2. ábra Koncentrált erő

A számítások során az A és B pontokban ébredő erők meghatározása Glushkov munkássága [7] alapján történt. Az ábrán nem kerültek feltüntetésre a sarokpontokban ébredő nyomatékok. Ahogy a bevezetőben jeleztük, a sarokpontok feltételezés szerint hegesztéssel készüljenek, így merev csatlakozásként modellezhetők. Egy ilyen kialakítási lehetőséget mutat a 3. ábra.



3. ábra Lehetséges sarokpont kialakítás

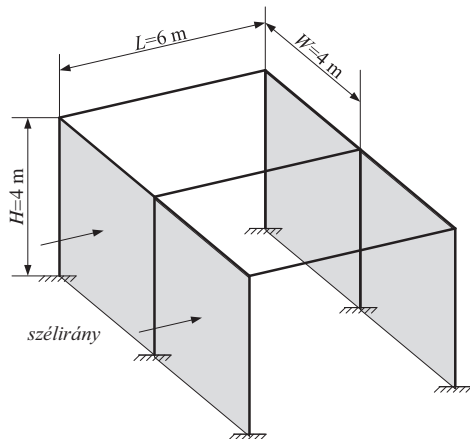
Meg kell jegyezni, hogy az ábrán vázolt kialakítás I-szelvényekre vonatkozik, így a számítások során mind a vízszintes, mind a függőleges oszlopok esetén ilyen típusú szelvény lett feltételezve. Nagyobb méretű berendezések vagy ömlesztett anyagok tárolása esetén a terhelés nem koncentrált erőként, hanem egyenletesen megoszló teherként vehető figyelembe. A 4. ábra ezt a terhelési esetet mutatja.



4. ábra Megoszló terhelés

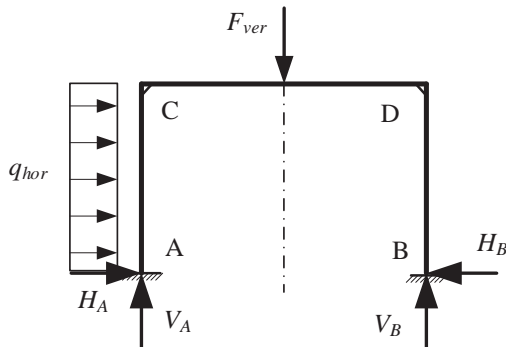
Nem nyitott, hanem valamilyen építészeti elemekkel burkolt szerkezet esetén nem feledkezhetünk el a szélterhelés esetétől sem. Ez a szélterhelés egy klasszikus

megoszló terhelés, nagysága egyenes arányban függ a homloklfelület nagyságával. Egy ilyen szerkezetet mutat az 5. ábra.

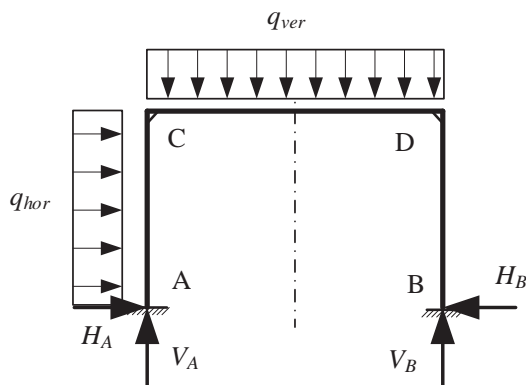


5. ábra Zárt keretszerkezet

Hasonlóan az előzőekben ismertettekhez, a szélterheléssel kombinált terhelési esetekben is a vízszintes áthidaló gerendát koncentrált erő (6. ábra) és megoszló terhelés (7. ábra) terheli.



6. ábra Koncentrált erő szélterheléssel



7. ábra Megoszló terhelés szélterheléssel

3. AZ OPTIMÁLÁSI MÓDSZER

A számítások elvégzésekor mindkét gerenda hegesztett I-szelvénynek lett feltételezve, így a számítás során 8 geometriai méretet (a gerinclemezek magasságát és

vastagságát, valamint az övlemezek szélességét és vastagságát) kellett meghatározni. Célfüggvényként a teljes tömeg lett meghatározva, mely arányos a szelvények keresztmetszet területével.

Az optimalás során szükséges feltételefüggvényeket is definiálni. A számítás során az Eurocode [6] szabványokban leírt méretezési összefüggések lettek alkalmazva. Ezek közül az első a teherviselésre vonatkozó feltétel:

$$\frac{N}{\chi_{\min} \cdot A \cdot f_{y1}} + \frac{k \cdot M}{W \cdot f_{y1}} \leq 1 \quad (1)$$

Az összefüggésben szereplő N a nyomóerőt jelenti, mely a csatlakozási pontokban ébredő rúderök közül a legnagyobb értéket, míg az M nyomaték az előzően hasonlóan a maximális nyomatékot jelenti.

További feltételként az övlemez és a gerinclemez lokális horpadása lett előírva. Ez az alkalmazott acél folyáshatárának függvényében tehető meg.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235 \text{ MPa}}{f_y}} \quad (2)$$

A vonatkozó feltételek pedig ennek a horpadási értéknek függvényében:

- a gerinclemezre

$$\frac{h}{t_w} \leq 42 \cdot \varepsilon, \quad (3)$$

- az övlemezre pedig

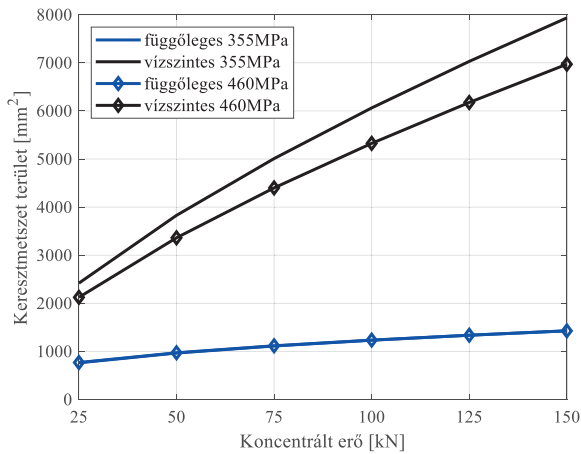
$$\frac{b}{t_f} \leq 28 \cdot \varepsilon. \quad (4)$$

Vegyük észre, hogy a szilárdsági osztály növelése a horpadási érték csökkenését jelenti, vagyis a nagyobb folyáshatárral jellemezhető acélok esetén kevésbé vékony lemezek alkalmazhatók. Ez a jelenség az eredmények ismertetésénél megfigyelhető.

A szélterhelés értéke a Magyarországon átlagosan tapasztalható 911 N/m² értékkel lett figyelembe véve.

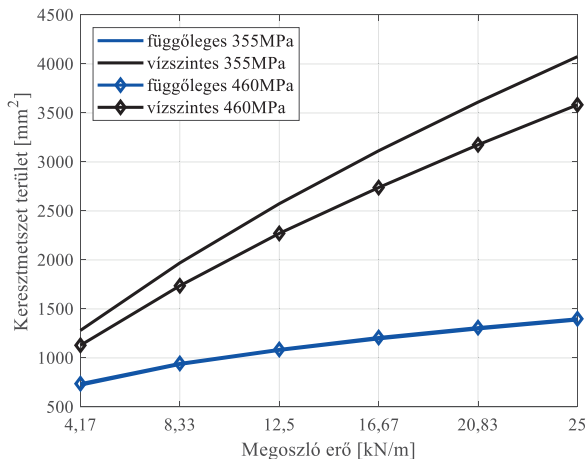
4. EREDMÉNYEK

A következőkben a különböző vizsgált esetekben kapott optimális keresztmetszet területek értékeinek bemutatása történik meg. A 8. ábra a 2. ábrán bemutatott terhelési eset optimális keresztmetszet területeit mutatja.



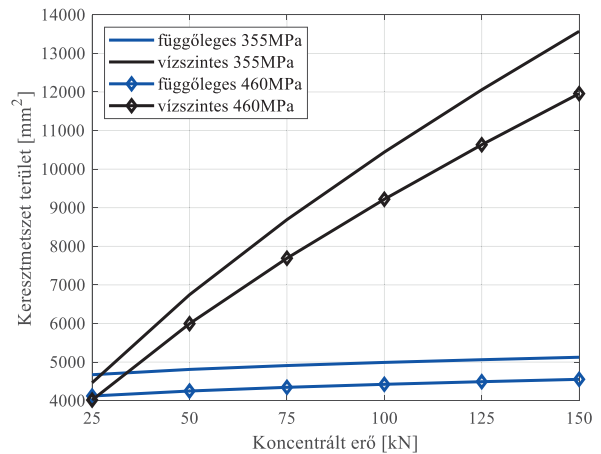
8. ábra Optimális keresztmetszet területek koncentrált terhelés esetén

Az ábrán látszik, hogy a vízszintes gerenda, amelynek jellemző terhelése a hajlítónyomaték, sokkal nagyobb geometriai méreteket igényel, mint a függőleges oszlopok, melyeknek a kihajlásnak kell ellenállniuk. A grafikonból az is megállapítható, hogy míg a hajlítás miatt a nagyobb folyáshatárú acél alkalmazásával kisebb méretek kaphatók eredményül, addig ez az állítás nem érvényes a kihajlásra, itt gyakorlatilag egyforma geometriai méreteket ad az optimálás.



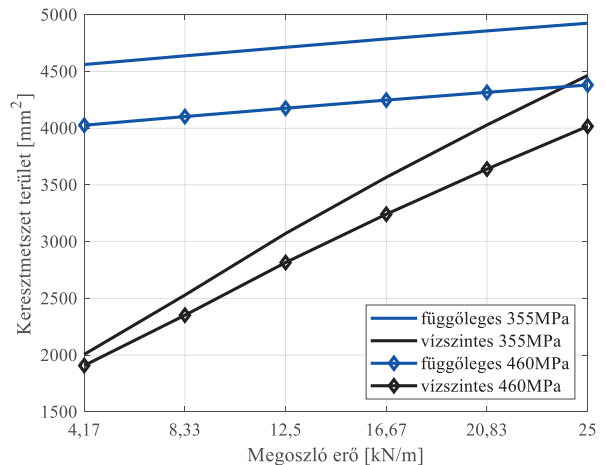
9. ábra Optimális keresztmetszet területek megoszló terhelés esetén

A 9. ábrán láthatóak a megoszló terheléssel terhelt vízszintes gerenda optimális keresztmetszet területei. Összehasonlítva a koncentrált erővel kapott eredményekkel megállapítható, hogy a megoszló terhelés következtében kisebb nyomaték alakul ki, mely kisebb keresztmetszeteket eredményez a vízszintes gerenda esetén, viszont a függőleges oszlopokra gyakorlatilag nincs hatással.



10. ábra Optimális keresztmetszet területek koncentrált terhelés és szélterhelés esetén

A 10. ábra a szélterheléssel kombinált koncentrált terhelés keresztmetszet területeit mutatja. A plusz terhelés miatt a keresztmetszet területek jelentősen megnövekednek a 8. ábrán ábrázoltakhoz képest. Továbbá az is megfigyelhető, hogy a függőleges oszlopon ébredő nyomaték miatt, az előbbiektől eltérően, itt már van jelentősége az acél szilárdságának.



11. ábra Optimális keresztmetszet területek megoszló terhelés és szélterhelés esetén

A 11. ábra a mindkét gerendán megoszló terhelés következtében kialakuló optimális keresztmetszet területeket mutatja. Gyakorlatilag a 9. és 10. ábrán látható eredmények kombinációja látható. Mindkét gerenda mérete függ a megoszló erő nagyságától, de a kisebb hatás miatt sokkal kevésbé növeli a szükséges méreteket, mint az előző esetben.

4. TŰZTERHELÉS HATÁSA

A bemutatott keretszerkezetek esetén a tervezést szinte minden esetben statikus terhelésekre kell elvégezni. Természetesen dinamikus hatások is érhetik a vizsgált

szerkezetet, de ezek minden esetben valamilyen baleset következményei, így az ezekre történő tervezés feleslegesen túlméretezné a szerkezetet. Másrészt a biztonsági tényezők használatának köszönhetően valószínűsíthető, hogy ezeket a hatásokat is elviselné a szerkezet összeomlás nélkül.

A vegyipari üzemekben azonban jellemzően tűz- és robbanásveszélyes közegek kezelése történik, így a tűzterhelés potenciális veszélyforrásként jelenik meg. Tűzterhelés esetén egy tranzien hőtadási folyamat játszódik le: a tűz hőmérséklete az idő függvényében növekszik, mely következtében a hőtadási tényezők és ezzel együtt a szerkezeti anyag hőmérséklete is növekszik. A szilárdsági jellemzők, a folyáshatár és a rugalmassági modulus a hőmérséklet növekedésével csökkennek, ami miatt a teherviselő képesség is csökken. A hőtágulás miatt azonban a geometriai méretek növekednek, ami miatt további járulékos feszültségek keletkeznek.

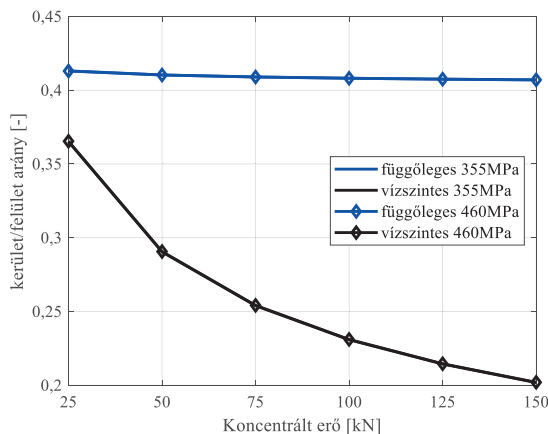
A tűzterhelés modellezése koncentrált paraméterű számítási módszerrel történhet [9,10], ahol a szelvény hőmérséklet növekedésének számításához a következő összefüggés használandó:

$$\Delta\theta_{steel} = k_{sh} \cdot \frac{A_m / V}{c_{steel} \cdot \rho_{steel}} \cdot \alpha \cdot \Delta t, \quad (5)$$

ahol

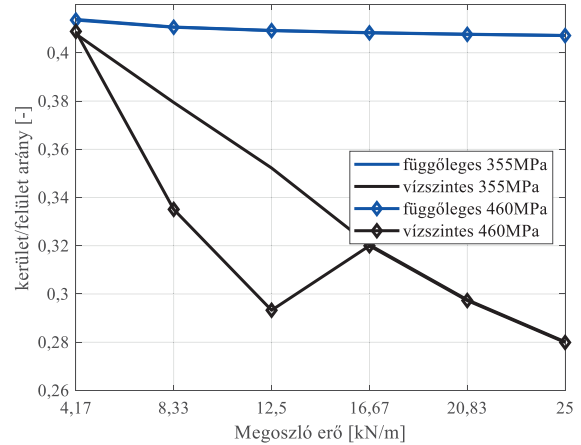
- $\Delta\theta$ a hőmérséklet-változás ($^{\circ}\text{C}$),
- k_{sh} az árnyékolási tényező (-),
- A_m/V a tűznek kitett terület és teherviselő keresztmetszet aránya (1/m),
- c_{steel} az acél fajhője (J/kgK),
- ρ_{steel} az acél sűrűsége (kg/m³),
- Δt a vizsgálati időtartam (s).

Az összefüggésből látszik, hogy minél nagyobb a kerület és keresztmetszet terület aránya, annál gyorsabban növekszik a gerendák hőmérséklete. A tervezés során célunk lehet az, hogy biztosítsuk a létesítményi tűzoltók kitéréséhez szükséges időt. A következőkben az optimált értékekre vonatkozó kerület/felület arányok, továbbiakban szelvénytényezők bemutatása történik.



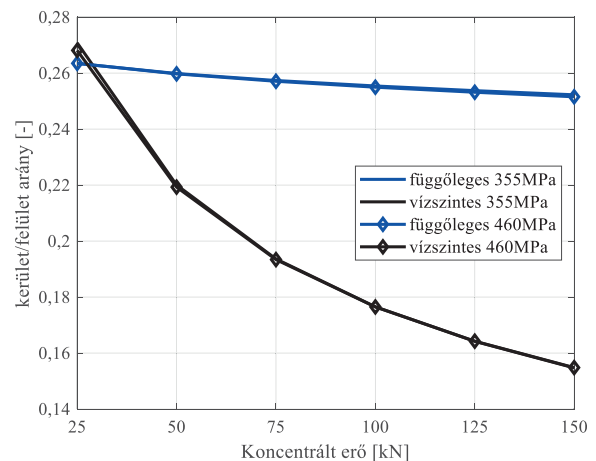
12. ábra Szelvénytényezők koncentrált terhelés esetén

A 12. ábra a vízszintes gerendán ható koncentrált terhelés esetén ábrázolja a szelvénytényezők értékeit a ható erő függvényében. Látható, hogy a két különböző szilárdságú acél esetén teljesen megegyezik az értéke. Azonban míg az oszlop esetén ez majdnem állandó érték, addig a vízszintes gerenda esetén csökkenő tendenciát mutat.



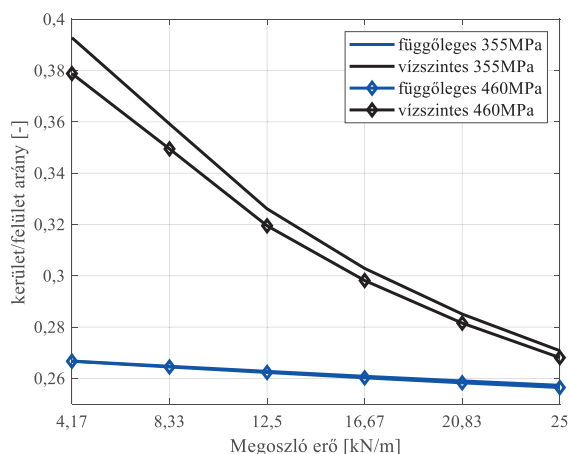
13. ábra Szelvénytényezők megoszló terhelés esetén

A 13. ábrán a vízszintes gerendán megoszló terhelés hatása látható. Hasonló tulajdonságokkal jellemezhető, mint a koncentrált terhelés. A grafikon azt is mutatja, hogy mivel az oszlop tényezői minden esetben nagyobbak a gerenda értékeitől, valószínűsíthető, hogy hosszabb ideig történő tűzben állás esetén a függőleges oszlop hajlik ki hamarabb, nem pedig a vízszintes gerenda károsodik. Az ábrán megfigyelhető a szelvénytényező érdekes viselkedése is, mely a lokális horpadás következménye.



14. ábra Szelvénytényezők koncentrált terhelés és szélterhelés esetén

A 14. ábra a már szélterheléssel is terhelt szerkezet szelvénytényezőit mutatja. Ebben az esetben már a oszlop is mutat egy minimális csökkenést a koncentrált erő növekedésének függvényében.



15. ábra Szelvénytényezők megoszló terhelés és szélterhelés esetén

A 15. ábra a mindkét gerendán egyenletesen megoszló terhelés esetén ábrázolja a szelvénytényezőket. Ennél a terhelési esetenél megfordul a tendencia, a vízszintes gerenda szelvénytényezője a nagyobb érték, viszont a csökkenés ismét ennél figyelhető meg. A másik különbség az előzőekhez képest az a tény, hogy látható a különbség a különböző szilárdságú acélok esetén, és ez a különbség a teljes vizsgált tartományt jellemzi.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Jelen tanulmány a merev sarokkapcsolattal jellemezhető keretszerkezetek optimális méretezésével foglalkozik. Az optimalás különböző terhelésekkel, de összehasonlítható terheléstartományokban lett elvégezve, ahol az optimalás célfüggvénye a legkisebb acéltömeget jelentette. A vizsgálatok az általánosított redukált gradiens módszerrel készültek, ahol statikus terheléseket feltételeztünk. Az eredmények azt mutatják, hogy a hajlítással igénybe vett gerendák esetén a nagyobb szilárdságú acélok kisebb keresztmetszet területeket igényelnek, azonban a nyomóerővel terhelt gerendák esetén, a kihajlás jelensége miatt, a vizsgált acélminőségek gyakorlatilag azonos geometriai méreteket igényelnek. A kivitelezés során ezek az adatok felhasználhatók, így a költségek csökkenthetők.

A kapott eredményekből információk nyerhetők a tűzterhelés közben kialakuló tranziens viselkedésre is. A szelvénytényezők értékei egyenesen arányosak a hőmérséklet növekedés sebességével. Az adatok felhasználhatók a tűzvédelem tervezésénél.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatásával a K 134358 számú projekt keretében valósult meg.

7. IRODALOM

- [1] Y. XU, Z. WANG, and Q. ZHU, "An Improved Hybrid Genetic Algorithm for Chemical Plant Layout Optimization with Novel Non-overlapping and Toxic Gas Dispersion Constraints," *Chinese J. Chem. Eng.*, vol. 21, no. 4, pp. 412–419, 2013, doi: [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(13\)60490-6](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(13)60490-6).
- [2] Y. WU, S. ZHANG, R. WANG, Y. WANG, and X. FENG, "New model for large scale chemical industrial layout optimization," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 161, pp. 58–71, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2020.06.026>.
- [3] L. EULER, "Determinatio onerum, quae columnae gestare valent," *Acta Acad. Sci. Petrop.*, vol. 2, 1776.
- [4] W. E. AYRTON and J. PERRY, "On struts," *Eng.*, vol. 12, no. 62, p. 464, 1886.
- [5] H. BEER and G. SCHULZ, "Bases théoriques des courbes eropéennes de flambement," *Constr. Métallique*, no. 3, 1970.
- [6] EN 1993-1-1: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings
- [7] G. GLUSHKOV, I. YEGOROV, and V. YERMOLOV, *Formulas for designing frames*. Moscow: Mir Publishers, 1975.
- [8] F. LI, L. ZOU, J. SONG, S. LIANG, and Y. CHEN, "Investigation of the spatial coherence function of wind loads on lattice frame structures," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 215, p. 104675, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104675>.
- [9] EN 1993-1-2: Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design
- [10] PETRIK, M., ERDŐS, A., JÁRMAI, K., & SZEPESI, G. *Optimum design of an air tank for fatigue and fire load*. *Acta Polytechnica Hungarica*, 18(3), 163-177. (2021). doi:10.12700/APH.18.3.2021.3.9

HELIKOPTER KOMPOZIT PADLÓLEMEZE OPTIMÁLÁSÁNAK ELMÉLETI ALAPJAI

THEORETICAL BACKGROUND OF THE COMPOSITE HELICOPTER FLOOR OPTIMISATION

Dr. Alaa Al-Fatlawi*, Dr. Jármái Károly** és Dr. Kovács György***

ABSTRACT

The use of Fiber Reinforced Plastic (FRP) composites in aircraft structural components results in weight reductions, which results in reduced fuel consumption, cheaper fuel costs, less air pollution, and enhanced speed. The research objective was to design a novel optimization approach for a helicopter floor made entirely of FRP composite material. The optimization process involved examining 46 distinct layer combinations of four different FRP layers (woven glass fiber with phenolic resin; woven glass fiber with epoxy resin; woven carbon fiber with epoxy resin; hybrid composite) and different FRP honeycomb core structural elements. The face sheets were constructed using a variety of different layer counts and fiber orientations including cross-laminated, angled, and multidirectional. The optimization procedure took into account nine design constraints: deflection; face stress (bending load, end load); stiffness; flexure; core shear stress; shell buckling; in-cell buckling; and shear buckling. The single-objective weight optimization problem was solved using Matlab's Interior Point Technique, Excel Solver's nonlinear Generalized Reduced Gradient (GRG) algorithm, and Laminator software. Digimat-HC solved numerical models of ideal sandwich plates for helicopter floors using the Digimat-HC program. The primary contribution is the creation of a novel method for optimizing a totally FRP composite sandwich structure that is more favorable than standard helicopter floors due to its material components and construction. This truth has been shown through a case study.

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a vállalatok versenyképességének növelése és a fenntarthatóság biztosítása érdekében új, korszerű anyagok és szerkezetek, valamint innovatív és környezetbarát technológiák alkalmazására van szükség mind a gyártó-, mind a szállítási szektorban [1-3]. A legdrágább és környezetszennyezőbb szállítási mód a légi közlekedés. Ezért a fő célok az üzemanyag-fogyasztás csökkentése és az üzemanyagköltségek

csökkentése mellett a kisebb környezeti károk elérése, valamint a légi közlekedés hatékony és biztonságos működésének javítása [4-6].

A kutatási téma fontosságát az adja, hogy - a légi járművek közül - különösen a helikopterek számos különleges, összetett és kockázatos helyzetben játszanak kulcsszerepet. Csak helikopterek képesek számos fontos és veszélyes feladatot ellátni, pl. légi mentési, tűzoltási és légi felügyeleti feladatok. Ezért a helikopterekkel szemben számos speciális követelmény van, amelyek a következők: kis tömeg; nagy sebesség; könnyű és biztonságos manőverezőképeség; költséghatékony üzemeltetés (alacsony üzemanyag-fogyasztás); és biztonságos szállítás (pl. megbízhatóság, törésbiztonság) [7,8]. A törésbiztonság fontos elvárás a helikopterekkel kapcsolatban, mivel a helikopterek szerkezetének ellen kell állnia az ütközésnek és meg kell védenie a helikopterben tartózkodókat. Ezért a helikopterek padló szerkezetét úgy kell megtervezni, hogy ellenálljon az emberi testet érő terheléseknek és gyorsulásoknak egy kényszerleszállás során. Előfordul, hogy a helikopterek emberi hibák vagy műszaki hibák miatt zuhannak le. A helikopterek tervezése mindig is kiemelt fontosságú marad a szerkezeti hibák elkerülése érdekében. A helikopterek roncsolódása energiaelnyelő anyagok vagy szerkezetek alkalmazásával csökkenthető [9,10]. A helikopter-szerkezetek törésbiztos kialakításával és energiaelnyelő mechanizmusaival kapcsolatban számos cikk jelent meg [11-14].

A korszerű kompozit anyagok alkalmazása a helikopterek szerkezeti elemeinek (például a helikopterek padlójának) tervezése és gyártása során kielégíti a helikopterekkel szemben a fentiekben említett elvárásokat. Ennek oka, hogy a kompozitok a hagyományos anyagoknál előnyösebb tulajdonságokkal rendelkeznek [15,16]. A kompozit anyagok kis sűrűsége jelentős súlycsökkenést jelent, ami egyrészt kisebb üzemanyag-fogyasztást, üzemanyagköltség-csökkenést és kisebb légszennyezést eredményez, másrészt lehetővé teszi a helikopterek nagyobb sebességét. Továbbá a kompozit szerkezetek nagy szilárdsággal, jó rezgéscsillapítással, korrózióval és vegyi anyagokkal

* végzett doktorandusz, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

** professzor, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

*** docens, Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézet

szembeni jó ellenállással, tűzállósággal és jó hőszigeteléssel rendelkeznek [17,18].

A kompozit anyagok – a fent említett tulajdonságaiknak köszönhetően – széleskörű gyakorlati alkalmazási lehetőségeket biztosítanak ezen korszerű anyagok számára, elsősorban a légi járművek, pl. helikopterek szerkezeti elemeiként való felhasználásra.

A kompozit anyagok leggyakrabban használt típusai a szálerősítésű műanyag (FRP) kompozitok. Az FRP kompozitok két komponensből állnak: (1) egy mátrix anyagból (általában gyanták) és (2) egy erősítő komponensből (általában szálak). A szálak biztosítják a kompozit anyagok szilárdságát. A mátrix anyag tartja a szálakat és védi őket a negatív környezeti hatásoktól. Az erősítő szálaknak és mátrix anyagoknak is számos típusa áll rendelkezésre. A különböző szálaknak és mátrix anyagoknak számos kombinációja állítható elő, amelyek biztosítják az adott szerkezet kialakításához szükséges ideális kompozit anyagok megalkotását [19].

A gyakorlatban a leggyakrabban használt FRP kompozitok a következő szálakat kombinálják: szén, üveg, aramid stb. és a következő mátrixokat: epoxi, fenol stb. Az epoxigyanta jó mechanikai tulajdonságokkal, kiváló környezeti ellenállással és könnyű feldolgozhatósággal rendelkező polimer. A fenolgyanta egy szintetikus polimer, amely jó kémiai, tűz- és hőállósággal, alacsony toxikus kibocsátással és egyszerű feldolgozással rendelkezik [20,21]. A leggyakrabban alkalmazott szintetikus erősítő anyagok az üvegszálak és a szénszálak. Az üvegszál a legszélesebb körben alkalmazott erősítőanyag a viszonylag alacsony költségének köszönhetően. A szénszálak nagy a szilárdság/tömeg aránya, és magas költsége ellenére számos alkalmazásban, különösen a légi és űrtechnikai alkalmazásokban használják [22, 23].

1. Az FRP szendvicsszerkezetek a mérnöki alkalmazásokban a legszélesebb körben alkalmazott szerkezeti elemek közé tartoznak. Az FRP szendvicsszerkezetek FRP fedőlemezekből (pl. laminált lemezek) és maganyagokból (pl. méhsejt, hab) épülnek fel. Ezen szerkezetek nagy szilárdságot és merevséget, könnyű összeszerelhetőséget és kiváló testreszabhatóságot biztosítanak [24-26].

2. Számos releváns publikáció áll rendelkezésre a kompozit szendvicsszerkezetek tervezési és optimalizálási eljárásaira vonatkozóan, amelyek célja olyan optimális szerkezeteket létrehozása, amelyek kis súly és költség mellett nagy merevséget és szilárdságot biztosítanak [27-29]. Heimbs és társai szénszál-erősítéses műanyag szendvicsszerkezetek mechanikai viselkedését vizsgálták az LS-DYNA FE szoftverrel. A modellek validálását és a szendvicsszerkezet optimalizálását az LS-OPT szoftverrel végezték el [30,31]. Bisagni és társai egy optimalizálási módszert dolgoztak ki egy alumíniumötvözetből készült helikopter padlólemezére [32]. Adel és Steven hibrid kompozit fedőlapokkal

ellátott habszendvics-szerkezetek egycélfüggvényes és többcélfüggvényes optimalizálási módszerét dolgozták ki hajlítási és csavarási méretezési feltételek alkalmazásával [33].

3. Néhány cikk a habosított anyagok hangszigetelő képességének vizsgálatára szolgáló kísérleti és számítási módszereket mutat be, valamint a szürke relációs elemzési módszert, továbbá a többcélfüggvényes részecskecsoport optimalizáló algoritmust alkalmazza a habkompozitok akusztikai teljesítményének javítására [34-36]. Khan és társai a méhsejt-mag deformációjának és tönkremeneteli módjainak a modellezését mutatják be statikus terhelés esetén [37].

4. Számos szakirodalom foglalkozik különböző kompozit szerkezetek optimalizálási feladatainak megoldására szolgáló technikák és módszerek bemutatásával [38-41]. A szerkezetoptimalizáláshoz sok szoftveralkalmazás (pl. MATLAB, ABAQUS) vált általánossá. A végeselemes szoftveralkalmazásokat gyakran használják a szerkezeti analízis során differenciálegyenletek numerikus megoldására [42-44]. Khalkhali és szerzőtársai egy módosított genetikus algoritmust használtak hullámos maggal rendelkező szendvicspanelek tömeg- és lehajlási célfüggvényeinek megoldására [45]. Corvino és társai genetikus algoritmusokon alapuló többcélfüggvényes optimalizálási eljárást mutattak be az ANSYS szoftverrel [46].

5. A fellelhető szakirodalom szintézise alapján megállapítható, hogy bár a szendvicsszerkezetek optimalizálására számos tervezési és optimalizálási módszer áll rendelkezésre, azonban a teljesen FRP szendvicsszerkezetekre (amelyben mind a fedőlemezek, mind a méhsejt-mag is FRP kompozit) vonatkozó optimalizáló módszer a szakirodalomban nem található. Ezért az újonnan kidolgozott optimalizálási módszer hiánypótló ezen a kutatási területen.

A kutatás célja egy helikopter padlólemezének kialakításához használható teljesen FRP kompozit – vagyis FRP fedőlemezek és FRP méhsejt-mag – szendvicsszerkezet optimalizálási módszerének kidolgozása volt. Az optimalizálás célja a helikopter szendvics padlólemeze optimális anyagösszetételének és szerkezeti kialakításának a meghatározása volt, amely a szerkezet minimális tömegét biztosítja. Az optimalizálás során 4 különböző típusú FRP kompozit réteg (1. szőtt üvegszálak fenolgyantával; 2. szőtt üvegszálak epoxigyantával; 3. szőtt szénszálak epoxigyantával és 4. hibrid kompozit rétegek) 46 rétegekombinációjából álló fedőlemezekből és FRP méhsejt-magból álló konstrukciókat vizsgáltunk. A fedőlemezek különböző számú és szálirányú [keresztirányú (0°, 90°); szögben álló ($\pm 45^\circ$) és többirányú (0°, 90°, $\pm 45^\circ$)] rétegekből kerültek összeállításra.

A szerzők egy egycélfüggvényes tömegoptimalizálási módszert dolgoztak ki kilenc tervezési feltétel alkalmazásával, amelyek a következők: a lehajlásra; a

fedőlemez feszültségre (hajlító terhelés és végerterhelés); a merevségre; a mag nyírófeszültségére; a héj feszültségére; a kihajlásra; a nyírási deformációra; a héjgyűrődésre és a méhsejt horpadására vonatkozó feltételek. Az optimalizálási feladat a MATLAB szoftver IPA (Interior Point Algorithm) algoritmusával, az Excel Solver szoftver GRGNA (Generalized Reduced Gradient Nonlinear Algorithm) algoritmusával és a Laminator szoftver alkalmazásával került megoldásra. A helikopter szendvics padlólemezének numerikus modellezése a Digimat-HC szoftver alkalmazásával valósult meg. Továbbá a helikopter padlólemezének optimalizálása során alkalmazott mind a kilenc tervezési feltételre vonatkozó biztonsági tényezők is kiszámításra kerültek.

A kutatás fő hozzáadott értéke az, hogy egy teljesen FRP kompozit szendvicsszerkezet optimalizálási módszere került kidolgozásra – mind az anyagösszetétel, mind a szerkezeti kialakítás tekintetében –, mely szendvicsszerkezet jóval előnyösebb, mint a jelenleg alkalmazott hagyományos helikopter padlólemezek. Továbbá az újonnan kidolgozott optimalizálási módszerben kilenc tervezési feltétel került figyelembe vételre, míg más publikációkban tárgyalt optimalizálási módszerek általában csak három-négy tervezési feltételt alkalmaznak. A nagyszámú tervezési feltétel alkalmazása megbízhatóbb optimális szendvicsszerkezetet eredményez, amely biztosítja a helikopter biztonságosabb üzemeltetését is. Összegezhető, hogy az újonnan tervezett teljesen FRP szerkezet – alacsony sűrűsége miatt – jelentős súlymegtakarítást, ezáltal alacsonyabb üzemanyag-fogyasztást, alacsonyabb üzemanyagköltséget és kisebb környezeti terhelést eredményez, mint a hagyományos szerkezetek. Következésképpen az újonnan kidolgozott optimális módszerünkkel tervezett teljesen FRP szerkezetek széles körben alkalmazhatók a gyakorlatban különböző mérnöki alkalmazásokban, pl. a szállító járművek szerkezeti elemeiként (hajófedém, szállító járművek szerkezeti elemei, stb.) való felhasználásokra.

2. AZ ÚJONNAN TERVEZETT HELIKOPTER PADLÓLEMEZÉNEK SZERKEZETE ÉS ANYAGÖSSZETÉTELE

A helikopter padlólemezének az újonnan tervezett könnyűszerkezetes szendvicslemeze FRP méhsejt magból és 4 különböző típusú FRP kompozit réteg [(1) szőtt üvegszálak fenolgyantával; (2) szőtt üvegszálak epoxigyantával; (3) szőtt szénszálak epoxigyantával és (4) hibrid (szőtt üvegszál-epoxi és szőtt szénszál-epoxi rétegek kombinációja) rétegek] rétegekombinációjából álló fedőlemezekből áll. A fedőlemezek különböző számú és szálirányú [keresztirányú (0° , 90°); szögben álló ($\pm 45^\circ$) és többirányú (0° , 90° , $\pm 45^\circ$)] rétegekből kerültek összeállításra. Az 1. ábrán látható az Airbus

helikopter padlólemeze, amelyet szendvicsszerkezettel kívánunk kialakítani [47].



1. ábra Airbus helikopter [47].

A helikopter padlólemeze 1500 x 825 mm méretű, és önhordó, azaz a padló szélein kívül nincsenek külső merevítők. A padlólemezt $p = 1500 \text{ kg/m}^2$ és $4,5 \text{ g}$ gyorsulás egyenletes eloszlású nyomásnak vetik alá, és $\delta_{max} = 25 \text{ mm}$ -rel deformálódik (lásd az 1. táblázatot). A helikopter padlólemeze egyszerűen alátámasztott, és $l/b = 1,8$ (lásd a 2. táblázatot).

1. táblázat A helikopterpadló szendvicslemezeének műszaki adatai [48]

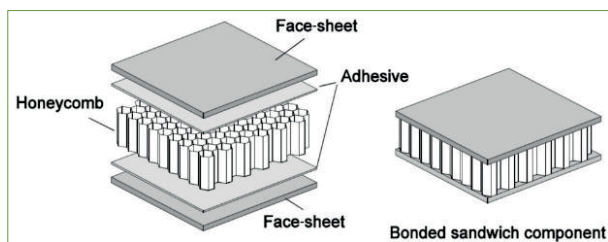
Hossz	Szélesség	Lehajlás	Gyorsulás	Maximális terhelés	
l	b	δ_{max}	g	P	p
(mm)	(mm)	(mm)	(m/sec^2)	(N)	(Pa)
1500	825	25	9,81-4,5	53510	66217,5

2. táblázat A szabadon felfekvő helikopterpadló szendvicslemezeének a tervezési adatai

Hajlítási lehajlástényezője	Nyírási lehajlástényezője	Maximális hajlító-nyomaték	Maximális nyíróerő	Kihajlási tényező
K_b	K_s	M	F	β
5	1	Pl	P	1
384	8	8	2	

2.1. Az újonnan tervezett helikopter padlólemezének szerkezete

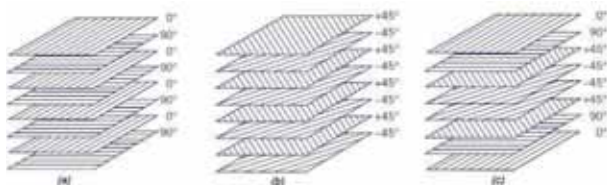
Az FRP szendvicslemez kis tömeggel és viszonylag nagy merevség-tömeg aránnyal rendelkezik. Az FRP kompozit szendvicslemez két FRP fedőlemezéből (felső és alsó) áll, amelyeket egy vastagabb FRP méhsejt-mag választ el egymástól. A fedőlemezek és a méhsejt-mag összeállítása ragasztóanyaggal történik (2. ábra). A szerkezet nagy merevsége a fedőlemezek közötti távolságból adódik, a kis súlya pedig a méhsejt-mag kis sűrűségének köszönhető. A kompozit méhsejt-mag kiváló tulajdonságai számos ipari alkalmazásban hasznosíthatók, mint pl. a helikopter padlólemezének gyártása során is.



2. ábra. Méhsejtvázás szendvicselem felépítése.

2.1.1 A szendvicsszerkezet fedőlemeze

A 3. ábra a cikkben vizsgált kompozit rétegelt fedőlemezek három típusát mutatja, amelyek a keresztirányú rétegek (0° , 90°), a szögben álló rétegek ($\pm 45^\circ$) és a többirányú rétegek (0° , 90° , $\pm 45^\circ$). A 3. táblázat az alkalmazott különböző kompozit rétegek mechanikai tulajdonságait mutatja, mely anyagok a Hexcel Composites Company termékei.



3. ábra A kompozit rétegek elrendezése. (a) Keresztirányú rétegek (0° , 90°); (b) Szögben álló rétegek ($\pm 45^\circ$) és (c) Többirányú rétegek (0° , 90° , $\pm 45^\circ$).

3. táblázat Az alkalmazott FRP rétegek anyagtulajdonságai [49].

Réteg típusa	Szilárdság (MPa) Húzás/Nyomás	Rugalmassági modulus (GPa) Húzás/Nyomás	Poisson arány (-)	Rétegvastagság (mm)	Tömeg/Réteg (kg/m ²)
Szött üvegszál fenolgyantával	400/360	20/17	0,13	0,25	0,47
Szött üvegszál epoxigyantával	600/550	20/17	0,13	0,25	0,47
Szött szénszál epoxigyantával	800/700	70/60	0,05	0,3	0,45

4. táblázat. Az alkalmazott FRP méhsejt-mag anyagtulajdonságai [50].

Jellemzők		Nyomás		Nyírás			
Sűrűség	Cellaméret	Stabilizált		Hosszirány		Keresztirány	
		Erő	Modulus	Erő	Modulus	Erő	Modulus
(kg/m ³)	(mm)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
104,12	6,35	8,14	828	4	159	2,28	90

3. EGYCÉLFÜGGVÉNYES OPTIMÁLÁSI MÓDSZER

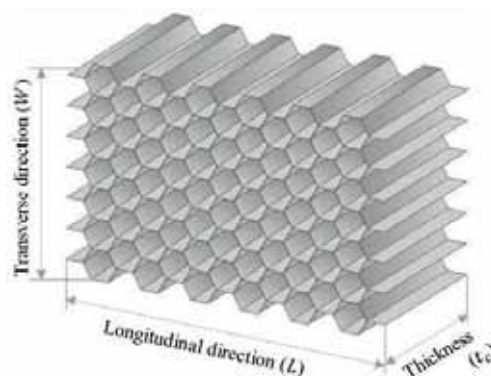
3.1. Tömegcélfüggvény

A szendvicsszerkezet teljes tömegének a számítása:

$$W_t = W_f + W_c = 2 \rho_f l b t_f + \rho_c l b t_c \quad (1)$$

2.1.2. A szendvicsszerkezet méhsejt-magja

A hatszögletű méhsejt-mag a legnépszerűbb méhsejt alakzat, amely fém és kompozit anyagokból is gyártható (4. ábra).



4. ábra. Méhsejt sejt konfiguráció (hatszögletű cellák).

A 4. táblázat az FRP méhsejt-mag mechanikai tulajdonságait adja meg. A méhsejt-mag a Hexcel Composites Company terméke, amely megfelel a legtöbb repülőgépgyártó cég előírásainak is.

ahol: $t_f = N_f t_i$; indexek: f - fedőlemez; c - mag.

A szendvicsszerkezet teljes tömege a hibrid kompozit fedőlemezek (üveg- és szénszálak) alkalmazása esetén:

$$W_t = W_f + W_c = 2(W_{f,g} + W_{f,cr}) + W_c = 2(\rho_g N_g t_g + \rho_{cr} N_{cr} t_{cr}) l b + \rho_c l b t_c \quad (2)$$

3.2. Tervezési változók

A kompozit szendvicselemezénél célszerű az alábbi méretkorlátokat előírni a méhsejt-mag vastagságára (t_c) és a fedőlemezek vastagságára (t_f) vonatkozóan:

$$1 \text{ mm} \leq t_c \leq 100 \text{ mm} \quad (3)$$

$$0,5 \text{ mm} \leq t_f \leq 2 \text{ mm} \quad (4)$$

ahol: $t_f = N_l t_{f_l}$; N_l - a laminátban lévő rétegek száma; t_{f_l} - egy réteg vastagsága.

3.3. Tervezési feltételek

3.3.1. A szerkezet merevsége

A szendvicselemez hajlítási merevségi feltétele a következő képlettel adható meg:

$$D_{11,x} = D_{11}/(1 - v_{12}^f v_{21}^f) \geq D_{min} = \frac{K_b p l^4}{\delta} \quad (5)$$

ahol: $D_{11} = 0,5 d^2 A_{11}^f + 2 D_{11}^f + 2 d B_{11}^f$; $v_{12}^f = A_{12}^f / A_{22}^f$; $v_{21}^f = A_{12}^f / A_{11}^f$ és $d = t_f + t_c$.

A szendvicselemez nyírási merevségi feltétele a következő képlettel adható meg:

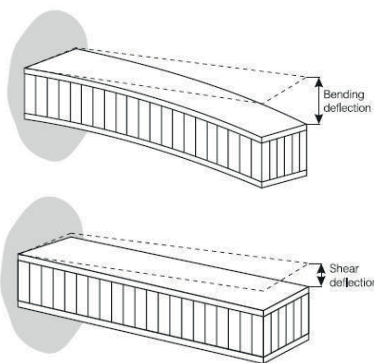
$$\tilde{S}_{11} = \frac{d^2 E_c}{t_c 2 (1 + \nu_c)} \quad (6)$$

A szendvicselemez számított merevségének nagyobbak kell lenni, mint az 1. és 2. táblázat adatai alapján számítható minimális merevségnek.

3.3.2. A szerkezet lehajlása (5. ábra)

A szendvicselemez lehajlási feltétele:

$$\delta_{max} \geq \delta = \frac{K_b p l^4}{D_{11,x}} + \frac{K_s p l^2}{\tilde{S}_{11}} \quad (7)$$



5. ábra. A szendvicsszerkezet lehajlása

A helikopterpadló szendvicselemeze 1. táblázatban megadott maximális lehajlásának (δ_{max}) nagyobbak kell lenni, mint a számított lehajlásnak (δ).

3.3.3. Feszültség a fedőlemezben

A szendvicselemez feszültségi feltétele:

$$\sigma_{f,x} \geq \sigma_f = \frac{M}{d t_f b} \quad (8)$$

$\sigma_{f,x}$ - az FRP fedőlemezben x irányban fellépő feszültség (a Laminator szoftverrel meghatározva);
 σ_f - a fedőlemez számított feszültsége.

3.3.4. A mag nyírófeszültsége

A nyírófeszültség korlátozási feltétel a következő képlettel adható meg:

$$\tau_{c,y} \geq \tau_c = \frac{F}{d b} \quad (9)$$

$\tau_{c,y}$ - a kompozit méhsejt-mag nyírási feszültsége keresztirányban (4. táblázat);

τ_c - a mag számított nyírófeszültsége.

3.3.5. Héjfeszültség (végterhelés)

A héjfeszültség korlátozási feltétel a következő képlettel adható meg:

$$\sigma_{f,y} \geq \sigma_f = \frac{P}{2 t_f b} \quad (10)$$

$\sigma_{f,y}$ - az FRP fedőlemezben y irányban fellépő feszültség (a Laminator szoftverrel meghatározva);
 σ_f - a fedőlemez számított feszültsége.

3.3.6. Kihajlás (6. ábra)

A kompozit szendvicselemez kihajlása:

$$P_{b,cr} = \frac{\pi^2 D_{11,x}}{\beta l^2 + \frac{\pi^2 D_{11,x}}{\tilde{S}_{11}}} \geq \frac{P}{b} \quad (11)$$

$P_{b,cr}$ - számított terhelés, amelyen a kihajlás bekövetkezik;

P/b - egységnyi szélességre jutó terhelés.



6. ábra. A szendvicsszerkezet kihajlása

3.3.7. Nyírási deformáció (7. ábra)

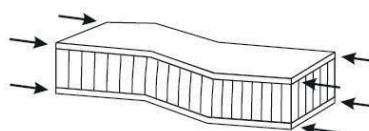
A nyírási deformáció az alábbi módon számítható:

$$P_{cr} = t_c G_c b \geq P \quad (12)$$

ahol: $G_c = G_w$;

P_{cr} - a számított terhelés, amelyen a nyírási deformáció bekövetkezik;

P - a tényleges terhelés.



7. ábra. A szendvicsszerkezet nyírási deformációja

3.3.8. Héjgyűrődés (8. ábra)

A következő héjgyűrődési feltételek számíthatók:

$$\sigma_{wr,cr} = 0,5 \sqrt[3]{E_{f,x} E_c G_c} \geq \sigma_{f,x} \quad (13)$$

ahol $G_c = G_L$.

$$\sigma_{wr,cr} = 0,5 \sqrt[3]{E_{f,y} E_c G_c} \geq \sigma_{f,y} \quad (14)$$

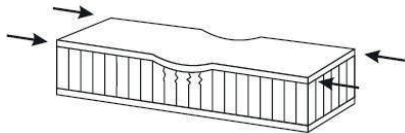
ahol $G_c = G_W$.

$$P_{wr,cr} = 2 \sqrt{D_{11}^f \frac{E_c}{(t_c/2)}} \geq \frac{P}{b} \quad (15)$$

ahol: $E_{f,x} = A_{11}^f (1 - \nu_{12}^f \nu_{21}^f) / t_f$; $E_{f,y} = A_{22}^f (1 - \nu_{12}^f \nu_{21}^f) / t_f$ és $E_f = \sqrt{E_{f,x} E_{f,y}}$.

A feszültség, amelyen a héjgyűrődés bekövetkezik ($\sigma_{wr,cr}$) nagyobb, mint a héj folyáshatára x irányban ($\sigma_{f,x}$) és y irányban ($\sigma_{f,y}$). A számítás a Laminator szoftverrel történik.

$P_{wr,cr}$ - a terhelés, amelyen a héjgyűrődés történik;
 P/b - a terhelés egységnyi szélességre.



8. ábra. A szendvicsszerkezet héjgyűrődése

3.3.9. Méhsejt-horpadás (héj gödrösödés) (9. ábra)

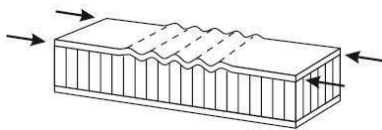
A méhsejt horpadási feltétele a következő képlettel számítható:

$$\sigma_{fib,cr} = \frac{2E_f}{(1 - \nu_{12}^f \nu_{21}^f)} \left[\frac{t_f}{s} \right]^2 \geq \sigma_{f,y} \quad (16)$$

ahol: $E_f = \sqrt{E_{f,x} E_{f,y}}$;

$\sigma_{fib,cr}$ - a feszültség, amelyen a méhsejt horpadás bekövetkezik;

$\sigma_{f,y}$ - a héj folyáshatára (a Laminator szoftverrel számítva).



9. ábra. A szendvicsszerkezet méhsejt-horpadása

A Laminator program képes megoldani a kompozit laminátum klasszikus elemzését. Az egycélű függvényes optimalizálás során követett eljárást az alábbi 10. folyamatábra mutatja.

1. lépés: Készítsen egy "objecfun.m" file-t (célfüggvény)



2. lépés: Készítsen egy "nonlconstr.m" file-t (nemlineáris feltételek)



3. lépés: Az optimalizálás futtatása:

- Nyissa meg az "optimálás" alkalmazást.
- A „Belső Pont Algoritmust” (Interior Point Algorithm) ki kell választani a megoldók *fmincon*-korlátozott nemlineáris minimalizálás listájából.
- Enter@*objecfun*, hogy hívja az *objecfun.m* file-t a minimalizálás érdekében.
- Adja meg a kezdőpont mező kezdőpontját, ahol az algoritmus megkezdí a vektorként megadott minimalizálás keresését.
- Határozza meg a nemlineáris feltételeket külön file-ként. Enter@*nonlconstr.m* a nemlineáris feltételek mezőben a *nonlconstr.m* file hívásához. A változók alsó és felső határa vektorként van meghatározva.
- Adja meg a beállításokat, és válassza az iteratív lehetőséget, hogy algoritmus adatokat kapjon a parancsablakban minden iteráció esetén.
- Futtassa a *Solver*-t és tekintse meg az eredményeket.

10. ábra. Az egycélű függvényes optimalizási eljárás folyamatábrája

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikk összefoglalja a kompozit anyagok alkalmazási lehetőségeit abban az esetben, ha a méhsejtvázás szendvicsszerkezet teljesen kompozit kialakítású. A cikkben át lettek tekintve azok a tönkremeneteli esetek, amelyeket a méretezés szempontjából mindenképp szükséges figyelembe venni. Ezek, mint méretezési feltételek szerepelnek az optimális szendvicsszendvicsszerkezetének optimalizálásánál. A cikk a vizsgálatok elméleti alapjait ismerteti. Ezt követően kerülhet sor a kidolgozott módszer gyakorlati alkalmazására, amelynek során egy konkrét szerkezetoptimalizációs feladat kerül majd megoldásra [51].

5. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatta K 134358 projekt keretében.

6. IRODALOM

- [1] Koberg, E.; Longoni, A. A systematic review of sustainable supply chain management in global supply chains. *J. Clean. Prod.* 2019, 207, 1084–1098.
- [2] Grondys, K.; Androniceanu, A.; Dacko-Pikiewicz, Z. Energy management in the operation of enterprises in the light of the applicable provisions of the energy efficiency directive (2012/27/EU). *Energies* 2020, 13, 4338.
- [3] Cselényi, J.; Illés, B.; Kovács, G.; Bálint, R. Network of north-east hungarian logistical centres and logistical clusters, In Proceedings of the 3rd International Logistics and Supply Chain Congress - Logistics and

- Supply Chain Management in a Globalizing World, Istanbul, Turkey, 23–24 November 2005.
- [4] Rushton, A.; Croucher, P.; Baker, P. *The Handbook of Logistics & Distribution Management*; Kogan Page Limited: London, 2010.
- [5] Kot, S. Sustainable supply chain management in small and medium enterprises. *Sustainability* 2018, 10, 1143.
- [6] Farkas, J.; Jármai, K.: Structural synthesis of sandwich beams with outer layers of box section, *J Sound Vib.* 1982, 84(1), 47–56.
- [7] Teodorović, D.; Janić, M. *Transportation Engineering: Theory, Practice and Modeling*; Butterworth-Heinemann: Oxford, 2016.
- [8] Kovács Gy. Innovative mathematical methods and new software applications for cost-effective, profitable and environmentally friendly freight transport. *Pol. J. Environ. Stud.* 2019, 28, 2659–2671.
- [9] Astori, P.; Zanella, M.; Bernardini, M. Validation of numerical models of a rotorcraft crashworthy seat and subfloor. *Aerospace* 2020, 7, 174.
- [10] Todor, M.P.; Kiss, I. Systematic approach on materials selection in the automotive industry for making vehicles lighter, safer and more fuel-efficient. *Appl. Eng. Lett.* 2016, 1, 91–97.
- [11] Hajela, P.; Lee, E. Topological optimization of rotorcraft subfloor structures for crashworthiness considerations. *Comp. Struct.* 1997, 64, 65–76.
- [12] Zheng, J.; Xiang, J.; Luo, Z.; Ren, Y. Crashworthiness design of transport aircraft subfloor using polymer foams. *Int. J. Crashworth.* 2011, 16, 375–383.
- [13] Astori, P.; Impari, F. Crash response optimisation of helicopter seat and subfloor. *Int. J. Crashworth.* 2013, 18, 570–578.
- [14] Yang, X.; Ma, J.; Wen, D.; Yang, J. Crashworthy design and energy absorption mechanisms for helicopter structures: A Systematic literature review. *Prog. Aeros. Sci.* 2020, 114, 100618.
- [15] Hollaway, L.C. A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. *Constr. Build. Mater.* 2010, 24, 2419–2445.
- [16] Todor, M.P.; Bulei, C.; Kiss, I. An overview on fiber-reinforced composites used in the automotive industry, *Ann. Fac. Eng. Huned. Int. J. Eng.* 2017, 15, 181–184.
- [17] Ferreira, A.D.B.L.; Nóvoa, P.R.O.; Marques, A.T. Multifunctional Material Systems: A state-of-the-art review. *Compos. Struct.* 2016, 151, 3–35.
- [18] Callister, W.D.; Rethwisch, D.G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 8th ed.; John Wiley & Sons: New York, NY, USA, 2018.
- [19] Kollár, L.P.; Springer, G.S. *Mechanics of Composite Structures*; Cambridge University Press: London, UK, 2003.
- [20] Sarika, P.R.; Nancarrow, P.; Khansaheb, A.; Ibrahim, T. Bio-based alternatives to phenol and formaldehyde for the production of resins. *Polymers* 2020, 12, 2237.
- [21] Culkova, K.; Khouri, S.; Straka, M.; Rosova, A. Ecological and economic savings of fly ash using as geopolymer. *Rocz. Ochr. Sr.* 2018, 20, 73–88.
- [22] Dong, C.; Davies, I.J. Optimal design for the flexural behavior of glass and carbon fiber reinforced polymer hybrid composites. *Mater. Des.* 2012, 37, 450–457.
- [23] Smith, W.F.; Hashemi, J. *Foundations of Materials Science and Engineering*, 6th ed.; McGraw-Hill Education: New York, NY, USA, 2019.
- [24] Zaharia, S.M.; Enescu, L.A.; Pop, M.A. Mechanical performances of lightweight sandwich structures produced by material extrusion-based additive manufacturing. *Polymers* 2020, 12, 1740.
- [25] Baca Lopez, D.M.; Ahmad, R. Tensile mechanical behaviour of multi-polymer sandwich structures via fused deposition modelling. *Polymers* 2020, 12, 651.
- [26] Yan, J.; Wang, G.; Li, Q.; Zhang, L.; Yan, J.D.; Chen, C.; Fang, Z. A comparative study on damage mechanism of sandwich structures with different core materials under lightning strikes. *Energies* 2017, 10, 1594.
- [27] Nayak, S.K.; Singh, A.K.; Belegundu, A.D.; Yen, C.F. Process for design optimization of honeycomb core sandwich panels for blast load mitigation. *Struct. Multidiscip. Optim.* 2013, 47, 749–763.
- [28] Xiang, L.; Gangyan, L.; Chun, H.W.; Min, Y. Optimum design of composite sandwich structures subjected to combined torsion and bending loads. *Appl. Compos. Mater.* 2012, 19, 315–331.
- [29] Nikbakt, S.; Kamarian, S.; Shakeri, M. A review on optimization of composite structures Part I: Laminated composites. *Compos. Struct.* 2018, 195, 158–185.
- [30] Heimbs, S.; Mehrens, T.; Middendorf, P.; Maier, M.; Schumacher, A. Numerical Determination of the Nonlinear Effective Mechanical Properties of Folded Core Structures for Aircraft Sandwich Panels. In Proceedings of the 6th European LS-DYNA Users' Conference, Gothenburg, Sweden, 29–30 May 2007.
- [31] Heimbs, S.; Middendorf, P.; Hampf, C.; Hähnel, F.; Wolf, K. Aircraft Sandwich Structures with Folded Core under Impact Load. In Proceedings of the International Conference on Sandwich Structures, Porto, Portugal, 6–8 May 2008.
- [32] Bisagni, C.; Lanzi, L.; Ricci, S. Size and Topological Optimization for Crashworthiness Design of Helicopter Subfloor. In Proceedings of the 9th AIAA/ISSMO Symposium on Multidisciplinary Analysis and Optimization, Atlanta, Georgia, 4–6 September 2002.
- [33] Adel, I.S.; Steven, L.D. Weight and cost multi-objective optimization of hybrid composite sandwich structures. *Int. J. Comp. Met. Exp. Meas.* 2017, 5, 200–210.

- [34] Hambric, S.A.; Shepherd, M.R.; Schiller, N.H.; Snider, R.; May, C. Quieting a rib-framed honeycomb-core sandwich panel for a rotorcraft roof. *J. Am. Helicopter Soc.* 2017, 62, 1–10.
- [35] Debeleac, C.; Nechita, P.; Nastac, S. Computational investigations on soundproof applications of foam-formed cellulose materials. *Polymers* 2019, 11, 1223.
- [36] Chen, S.; Zhu, W.; Cheng, Y. Multi-objective optimization of acoustic performances of polyurethane foam composites. *Polymers* 2018, 10, 788.
- [37] Khan, M.S.; Abdul-Latif, A.; Kolor, S.S.R.; Petrù, M.; Tamin, M.N. Representative cell analysis for damage-based failure model of polymer hexagonal honeycomb structure under the out-of-plane loadings. *Polymers* 2021, 13, 52.
- [38] Sohoulı, A.; Yildiz, M.; Suleman, A. Design optimization of thin-walled composite structures based on material and fiber orientation. *Compos. Struct.* 2017, 176, 1081–1095.
- [39] Gillet, A.; Francescato, P.; Saffre, P. Single-and multi-objective optimization of composite structures: The influence of design variables. *J. Compos. Mater.* 2010, 44, 457–480.
- [40] Ghafil, H.N.; Jármı, K. Dynamic differential annealed optimization: New metaheuristic optimization algorithm for engineering applications. *Appl. Soft Comput.* 2020, 93, 106392.
- [41] Houmat, A. Optimal lay-up design of variable stiffness laminated composite plates by a layer-wise optimization technique. *Eng. Optimiz.* 2018, 50, 205–217.
- [42] Virág, Z.; Szirbik, S. Finite element modal analysis of a hybrid stiffened plate. *Ann. Univ. Petroşani Mech. Eng.* 2019, 21, 115–120.
- [43] Delgado, S.D.R.; Kostal, P.; Cagánová, D.; Cambál, M. On the possibilities of intelligence implementation in manufacturing: The role of simulation. *Appl. Mech. Mater.* 2013, 309, 96–104.
- [44] Farkas J. Jármı K. *Fémszerkezetek innovatív tervezése*, Gazdász-Elasztik Kiadó és Nyomda, 2015, 592 old.
- [45] Khalkhali, A.; Khakshournia, S.; Nariman-Zadeh, N. A hybrid method of FEM, modified NSGAI and TOPSIS for structural optimization of sandwich panels with corrugated core. *J. Sandw. Struct. Mater.* 2014, 16, 398–417.
- [46] Corvino, M.; Iuspa, L.; Riccio, A.; Scaramuzzino, F. Weight and cost oriented multi-objective optimization of impact damage resistant stiffened composite panels. *Comp. Struct.* 2009, 87, 1033–1042.
- [47] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inaer_Airbus_Helicopters_EC145_T2_JP7991183.jpg (accessed on 10 June 2021).
- [48] Zenkert, D. *An Introduction to Sandwich Construction*; Engineering Materials Advisory Services (EMAS): London, UK.; Stockholm, Sweden, 1995.
- [49] Hexcel Composites Publication No. AGU 075b, Honeycomb Sandwich Design Technology. 2000. Available online: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf (accessed on 10 June 2021).
- [50] Product Data of Fibreglass/Phenolic Honeycomb Publication ATU 122b. 2007. Available online: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HRP_eu.pdf (accessed on 23 April 2021).
- [51] Alaa Al-Fatlawi, Jármı Károly, Kovács György: Esettanulmány helikopter kompozit padlólemeze optimalására, *GÉP*, 2022, 2, 38–42.

ESETTANULMÁNY HELIKOPTER KOMPOZIT PADLÓLEMEZE OPTIMÁLÁSÁRA

CASE STUDY FOR THE OPTIMIZATION OF COMPOSITE HELICOPTER FLOOR

Dr. Alaa Al-Fatlawi*, Dr. Jármái Károly** és Dr. Kovács György***

ABSTRACT

The optimization procedure of a Fiber Reinforced Plastic (FRP) composite floor system has been shown. 9 design constraints have been considered: deflection; face stress (bending load, end load); stiffness; flexure; core shear stress; shell buckling; in-cell buckling; and shear buckling. The single-objective weight optimization problem was solved using Matlab's Interior Point Algorithm, the Excel Solver's Nonlinear Generalized Reduced Gradient (GRG) Algorithm, and the Laminator software. Digimat-HC program solved the numerical models of the optimal sandwich plates for helicopter floors. The main contribution of the study is the elaboration of a novel method for optimizing a totally FRP composite sandwich structure that is more advantageous than standard helicopter floors due to its material components and construction. This result is confirmed in a case study.

1. BEVEZETÉS

A szálerősítéssel műanyag (FRP) kompozitok kiválóan alkalmasak légi járművek szerkezeti elemeinek gyártására. Ugyanis az FRP kompozitok sűrűsége kicsi, ezért alkalmazásuk a légi járművek súlycsökkenését eredményezi. Ez egyrészt kisebb üzemanyag-fogyasztást, ezáltal üzemanyag-költségcsökkenést; másrészt kisebb légszennyezést is okoz.

A cikkben egy esettanulmány kerül bemutatásra egy adott helikopter FRP kompozit padlólemezének optimalizálására. A Gép folyóirat ugyanezen számának előző cikkében [1] már ismertettük egy FRP szendvicsszerkezet általunk kidolgozott optimáló módszerét, amelynek a gyakorlatban való alkalmazására egy konkrét esettanulmányt mutatunk be ebben a cikkben. A [2,3] publikáció tartalmazza az esettanulmányban vizsgált szendvicsszerkezet szerkezeti elemeinek anyagjellemzőit.

Az esettanulmányban az egycélűfüggvényes optimalizálás során a célfüggvény: W_{min} – a minimális tömeg. Az optimalizálás eredménye: a $t_{c,opt}$ – az optimális magvastagság, valamint a $t_{f,opt}$ – a

fedőlemezek optimális vastagsága. Az optimáló módszer alkalmazása megerősítette, hogy jelentős súlycsökkenés érhető el az Excel Solver (GRG Nonlinear Algorithm) és a Matlab (Interior Point Algorithm) szoftverekkel kapott – FRP fedőlemezekből és FRP méhsejtmagból álló – helikopterpadló szendvicselemeznél.

2. TÖMEGOPTIMÁLÁS AZ EXCEL SOLVER ALKALMAZÁSÁVAL

Az 1. táblázat a helikopterpadló szendvicselemez tömegoptimalizálásának eredményeit mutatja be. A szendvicselemez hatszögletű cellájú FRP kompozit méhsejtmagból és FRP kompozit fedőlemezekből áll. Az optimalizálást Excel Solver program (GRG Nonlinear Algorithm) felhasználásával végeztük el.

1. táblázat. Az Excel Solver programmal (GRG Nonlinear Algorithm) kapott szerkezetoptimalizációs eredmények. Az optimális helikopterpadló szendvicselemez kompozit méhsejtmagból, valamint különböző rétegszámú és szálorientációjú FRP kompozit fedőlemezekből áll.

A fedőlemez típusai:	Rétegek száma és szálorientációi:	W_{min} (kg)	$t_{f,opt}$ (mm)	$t_{c,opt}$ (mm)
(1) Szőtt üveg-szál fenollal	4 (0°, 90°, 90°, 0°)	22,133	1	136
(2) Szőtt üveg-szál epoxival	4 (0°, 90°, 90°, 0°)	22,133	1	136
(3) Szőtt szén-szál epoxival	2 (0°, 90°)	14,486	0,6	95
(4) Hibrid rétegek	4 (0°, 90°, 90°, 0°)	15,475	1,1	85

3. TÖMEGOPTIMÁLÁS A MATLAB ALKALMAZÁSÁVAL

A 2. táblázat a helikopterpadló szendvicselemezének tömegoptimalizációs eredményeit mutatja be, amely FRP kompozit méhsejtmagból és FRP kompozit fedőlemezekből áll. Az optimalizálás eredménye a

* végzett doktorandusz, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

** professzor, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

*** docens, Miskolci Egyetem Gyártástudományi Intézet

Matlab szoftver alkalmazásával (*Interior Point Algorithm*) került meghatározásra.

2. táblázat. A Matlab programmal (*Interior Point Algorithm*) kapott szerkezetoptimalási eredmények. Az optimális helikopterpadló szendvicselemeze kompozit méhsejtmagból és különböző rétegszámú és szálorientációjú kompozit fedőlemezekből áll.

A fedőlemezek típusai:	Rétegek száma és szálorientációi:	W_{min} (kg)	$t_{f,opt}$ (mm)	$t_{c,opt}$ (mm)
(1) Szőtt üveg-szál fenollal	4 (0°, 90°, 90°, 0°)	22,127	1	136
(2) Szőtt üveg-szál epoxival	4 (0°, 90°, 90°, 0°)	22,127	1	136
(3) Szőtt szén-szál epoxival	2 (0°, 90°)	14,473	0,6	95
(4) Hibrid rétegek	4 (0°, 90°, 90°, 0°)	15,475	1,1	85

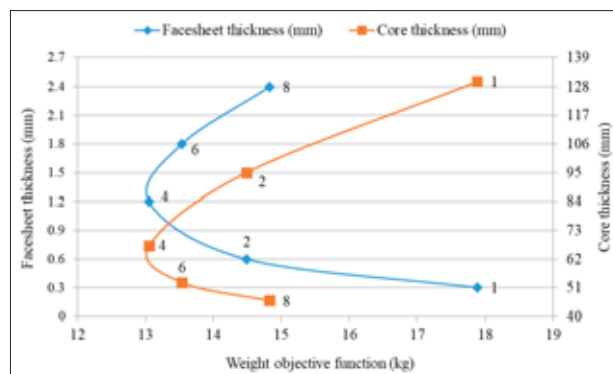
4. A MATLAB ÉS AZ EXCEL SOLVER ALKALMAZÁSÁVAL ELÉRT OPTIMÁLÁSI EREDMÉNYEK ÉRTÉKELÉSE

A 2. és a 3. fejezetekben bemutatott 1. és 2. táblázat a vizsgált helikopterpadló optimális szendvicselemeze az adatait mutatja be. A táblázatok adatai alapján megállapítható, hogy a Matlab és az Excel Solver programokkal ugyanazon adatokkal rendelkező szendvicsszerkezetet lehetett optimálisnak definiálni, tehát mindkét programmal ugyanaz az optimális szerkezet adódott.

Így a vizsgált helikopterpadló optimális szendvicselemeze a felső és az alsó fedőlemeze is 2 darab (0°, 90°) szállirányú, szőtt szénszál epoxigyanta rétegből (amelyek vastagsága: $t_{f,opt} = 0,6$ mm), valamint közöttük egy méhsejtmagból (amelynek vastagsága: $t_{c,opt} = 95$ mm) áll. Ez biztosítja a minimális tömegű szerkezetet. A helikopter padló optimális szendvicselemeze minimális tömege pedig 14,5 kg. A fentiek alapján megállapítható, hogy az optimális szendvicsszerkezet paraméterei ($t_{f,opt}$; $t_{c,opt}$), valamint az újonnan megalkotott optimális konstrukció számított tömege (W_{min}) is megegyezik a Matlab és az Excel Solver szoftver alkalmazása esetén (1. és 2. táblázat).

Az 1. ábra grafikusán mutatja be az FRP fedőlemezek és az FRP méhsejtmag optimális vastagságának kapcsolatát a minimális tömeg esetén az 1. és a 2. táblázat adatai alapján.

Összegezve megállapítható, hogy az általunk újonnan kidolgozott optimalizációs módszer megbízható, mivel az új, optimális konstrukció optimális paraméterei mind a Matlab, mind az Excel Solver szoftver alkalmazása esetén azonosak (az 1. és a 2. táblázat).



1. ábra. A fedőlemezek és a mag optimális vastagságának kapcsolata a minimális tömeg esetén.

Az optimalizációs módszer helyességéből adódóan az optimális szendvicsszerkezet mind a 9 tervezési feltételnek megfelel. Ennek elméleti ismertetése az [1] publikációban már bemutatásra került.

• Az esettanulmányban a vizsgált optimális szerkezet esetén a 9 tervezési feltétel közül a következő 4 tervezési feltétel számított értékeinek kisebbnek kell lenniük, mint a vonatkozó maximálisan megengedett értékeknek:

1. Lehajlás (δ): maximális megengedett érték: 25 mm // számított érték: 24,949 mm.
2. A fedőlemez normál feszültsége x -irányban ($\sigma_{f,x}$): maximális megengedett érték: 785,5 MPa // számított érték: 211,7 MPa.
3. A mag nyírófeszültsége (τ_c): maximális megengedett érték: 2,28 MPa // számított érték: 0,338 MPa.
4. A fedőlemez normál feszültsége y -irányban ($\sigma_{f,y}$): maximális megengedett érték: 687 MPa // számított érték: 54 MPa.

• Az esettanulmányban az optimális szerkezet számított értékeinek nagyobbak kell lenniük a vonatkozó minimálisan megengedett értékeknél az alábbi 5 tervezési feltétel esetén:

5. Merevség ($D_{11,x}$): minimális megengedett érték: 174,6 kN·m // számított érték: 179,4 kN·m.
6. Kihajlás (P_b): minimális megengedett érték: 64,86 kN/m // számított érték: 766,61 kN/m.
7. Nyírási tönkremenetel (P_{cr}): minimális megengedett érték: 53,51 kN // számított érték: 7064,12 kN.
8. Héjgyűrődés (P_{wr}): minimális megengedett érték: 64,86 kN/m // számított érték: 285,72 kN/m.
9. Méhsejt horpadás (σ_{fib}): minimális megengedett érték: 785,2 MPa // számított érték: 1296,9 MPa.

A fenti adatok alapján megállapítható, hogy a megalkotott optimális szendvicsszerkezet mind a kilenc tervezési feltételnek megfelel.

5. A KOMPOZIT SZENDVICSSZERKEZET TOVÁBBI ELŐNYEI

5.1. A tervezési feltételekkel kapcsolatos biztonsági tényezők

A biztonsági tényezők nagyon fontosak a tervezőmérnökök számára, mivel releváns mérőszámok, amelyeket figyelembe kell venni az alkatrészek vagy a szerkezetek tervezésekor. A biztonsági tényező a maximális feszültség vagy terhelés és a fellépő feszültség vagy terhelés hányadosa. A helikopter padló szendvicslemeze – amely FRP kompozit méhsejtmagból és az előzőekben már említett 4 különböző típusú FRP kompozit fedőlemezekből áll – tervezési feltételeinek biztonsági tényezőit a 3. táblázat mutatja be.

3. táblázat. Biztonsági tényezők a helikopterpadló szendvicslemezeének tervezési feltételeihez.

Feltételek	A biztonsági tényező (FoS) a 4 különböző fedőlemezhez kapcsolódik			
	Szött üvegszál fenollal (0°, 90°, 90°, 0°)	Szött üveg-szál epoxival (0°, 90°, 90°, 0°)	Szött szén-szál epoxival (0°, 90°)	Hibrid rétegek (0°, 90°, 90°, 0°)
$D_{11,x}$	1,018	1,018	1,027	1,03
δ	1	1	1	1
σ_f	4,173	6,258	3,71	4,05
τ_c	9,608	9,608	6,731	3,984
σ_f	10,302	15,741	12,71	15,582
$P_{b,cr}$	Nem aktív feltétel			
P_{cr}	1,812	1,208	1,3	1,585
$P_{wr,cr}$	2,808	1,671	1,652	3,995
$\sigma_{f,cr}$	1,812	1,208	1,3	1,585

4. táblázat. A szendvicslemez éves üzemanyag- és karbonmegtakarítása.

1. Üzemanyag-megtakarítás	Ár	Egység
A szállításhoz szükséges üzemanyag tömege +1 kg/h esetén	0,04	kg
A szállításhoz szükséges üzemanyag tömege +1 kg/1 év esetén	200	kg
Üzemanyagköltség/1000 kg	993	USD
Üzemanyagköltség a szállításhoz +1 kg/1 év esetén	199	USD
A helikopterpadló optimális szendvicslemezeének tömege	14,473	kg
2. Szén-dioxid megtakarítás		
Termelt széndioxid/1 kg üzemanyag	3,1	kg
Termelt széndioxid szállításhoz 1 kg/1 év	620	kg
A széndioxid tonnánkénti költsége	40	USD

5.2. Az éves üzemanyag- és szén-dioxid megtakarítás

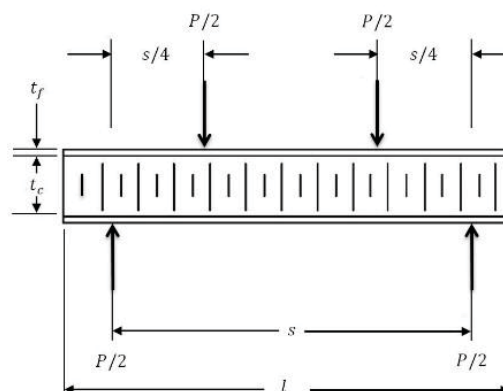
Az IATA (Nemzetközi Légi Szállítási Szövetség) adatai szerint az éves 1 kg hozzáadott hasznos tömeg szállításához szükséges üzemanyag tömege 200 kg. Az 1000 kg-ra jutó éves költség pedig kb. 993 USD. Ezért az 1 kg hozzáadott tömeg szállításának a költsége 1 évre kb. 199 USD. Az üzemanyag kilogrammonként termelt karbonkibocsátása kb. 3,1 kg. Az 1 kg/év szállítása során keletkezett karbon pedig kb. 620 kg. A CO₂/tonna költsége kb. 40 USD, amint azt a 4. táblázat mutatja.

6. A SZENDVICSELEMEZ NUMERIKUS ELEMZÉSE A DIGIMAT-HC PROGRAMMAL

A Digimat-HC program egy megbízható eszköz a négypontos hajlító tesztek modellezésére. A szoftver alkalmazása pontos és rugalmas a méhsejt magszerkezetű szendvicsszerkezetek elemzéséhez is. A kutatás a helikopterpadló szendvicslemezei modelljeinek numerikus szimulációját is tartalmazza. A helikopterpadló méhsejt-szendvics modelljének méreteit az 5. táblázat mutatja be (2. ábra).

5. táblázat. A helikopterpadló méhsejtvázás szendvicsmodelljeinek méretei.

Dimenzió	Méhsejt Fedőlemez Erő		
	Hossz	Fesztáv	Szélesség
Fedőlemez	l	s	b
	(mm)	(mm)	(mm)
(1) Szött üvegszál fenollal			
(2) Szött üvegszál epoxival			
(3) Szött szén-szál epoxival	1500	1400	825
(4) Hibrid rétegek			
		t_c	t_f
			P
			(N)

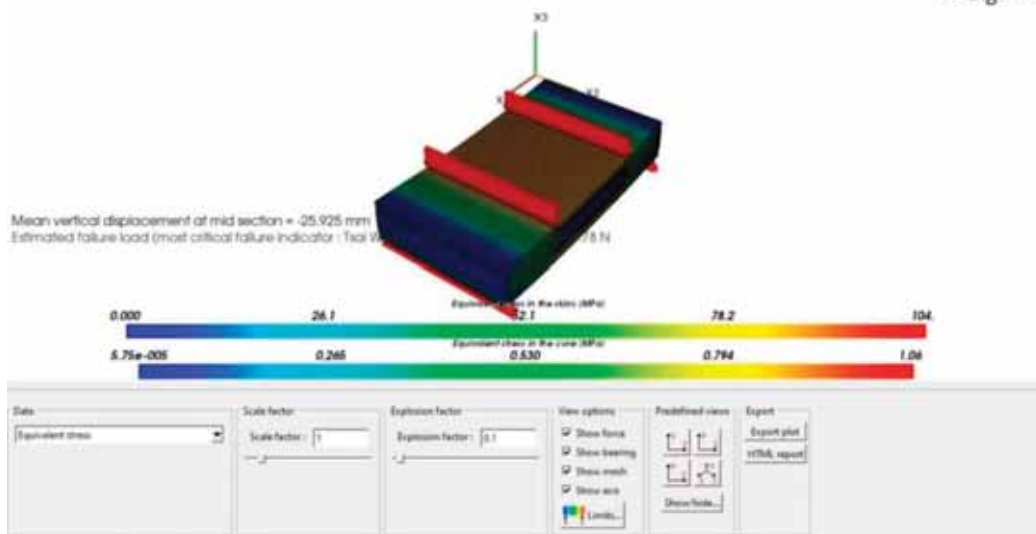


2. ábra. A méhsejtvázás szendvicslemez négypontos hajlítóvizsgálata a Digimat-HC programmal.

A négyponos hajlítóvizsgálatot a Digimat-HC szoftver alkalmazásával végeztük el. A szimuláció

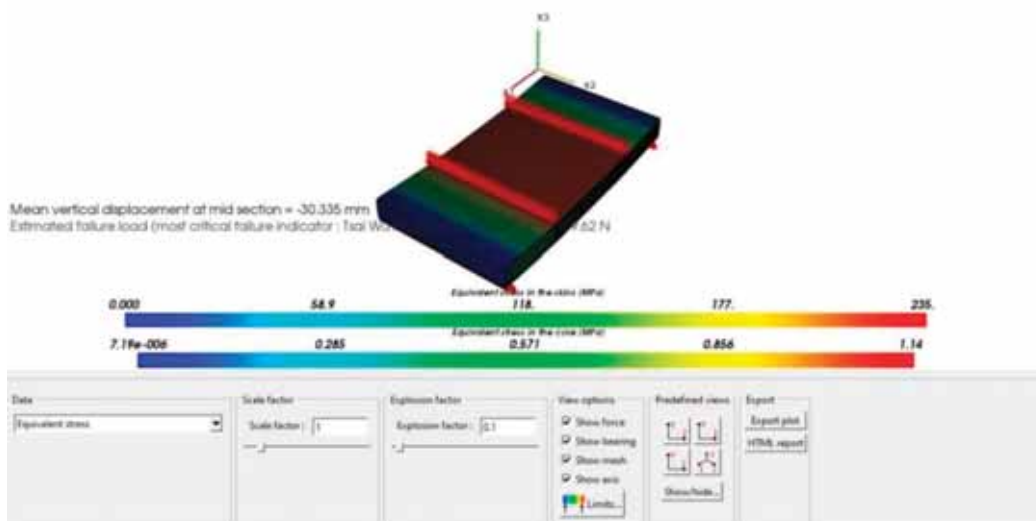
eredményeit a helikopter padlójának optimális méreteivel a 6. táblázat tartalmazza.

Digimat



3. ábra. A helikopterpadló szendvicselemezének négyponos hajlítóvizsgálatának numerikus modellje. A szendvicsszerkezet áll: FRP méhsejtmagból ($t_c = 136$ mm) és epoxigyantás üvegszál-szövetes fedőlemezekből ($t_f = 1$ mm).

Digimat



4. ábra. A helikopterpadló szendvicselemezének négyponos hajlítóvizsgálatának numerikus modellje. A szendvicsszerkezet áll: FRP méhsejtmagból ($t_c = 95$ mm) és epoxigyantás szénszál-szövetes fedőlemezekből ($t_f = 0,6$ mm).

6. táblázat. A helikopterpadló méhsejtes szendvicsszerkezetének numerikus eredményei a Digimat-HC programmal.

δ - a szerkezet függőleges középhajlása;
 σ_{skin} - egyenértékű héj feszültség;
 τ_c - egyenértékű magnyírófeszültség.

A különböző héjak optimális kialakítása	δ (mm)	σ_{skin} (MPa)	τ_c (MPa)
Szött üvegszál fenollal	25,925	104	1,06
Szött üvegszál epoxival	25,925	104	1,06
Szött szénszál epoxival	30,335	235	1,14
Hibrid rétegek	31,541	198	1,03

7. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JÖVŐBENI KUTATÁSOK

Egy új – FRP fedőlemezekből és FRP méhsejtmagból összeállított – szendvicsszerkezet

optimalizációs módszerét dolgoztuk ki. Az új optimalizációs módszer alkalmazásával meghatározható a helikopter padlójének optimális anyagösszetétele és szerkezete, amely a minimális tömegű szendvicsszerkezetet biztosítja. A módszerben kilenc tervezési feltételt vettünk figyelembe, amelyek az alábbiak: a lehajlás; a fedőlemez feszültsége (hajlító terhelés és végterhelés); a merevség; a mag nyírófeszültsége; a héjfeszültség; a kihajlás; a nyírási deformáció; a héjgyűrődés és a méhsejt horpadása. Az optimalizálás során az FRP fedőlemezek optimális rétegösszetétele négy különböző típusú FRP kompozit réteg rétegekombinációjából lett meghatározva [szőtt üvegszálak fenolgyantával; szőtt üvegszálak epoxigyantával; szőtt szénzsálak epoxigyantával és a hibrid rétegek (vagyis a szőtt üvegszál-epoxi és a szőtt szénzsál-epoxi rétegek kombinációja)].

Az új optimalizációs módszer gyakorlati alkalmazhatóságát egy esettanulmány bemutatásával is igazoltuk. Az esettanulmányban a helikopter padlólemez szendvicselemezőnek optimális szerkezete FRP kétrétegű, szőtt szénzsálás epoxigyantás fedőlemezekből (a szálak orientációja keresztirányú (0° , 90°); 0,6 mm vastagságú) és FRP méhsejtes magból (95 mm vastagságú) áll. Az optimális szerkezet minimális tömege 14,473 kg.

Az egycélfüggvényes tömegoptimalizációs feladat a MATLAB szoftver IPA (Interior Point Algorithm) algoritmusával és az Excel Solver szoftver GRGNA (Generalized Reduced Gradient Nonlinear Algorithm) algoritmusával került megoldásra. A fedőlemezek optimalizálása során a Laminator szoftvert is alkalmaztuk. A helikopterpadló optimális szendvicselemezőinek numerikus modelljeit a Digimat-HC szimulációs szoftverrel építettük fel.

Az általunk újonnan kidolgozott, kilenc tervezési feltételt figyelembe vevő optimalizációs módszer megbízhatóságát és alkalmazhatóságát egy esettanulmánnyal igazoltuk azzal, hogy az új optimalizációs szendvics konstrukció szerkezeti elemeinek jellemzőire kapott eredmények azonosak lettek a Matlab és az Excel Solver szoftver alkalmazása esetén is (1. és 2. táblázat). Továbbá a kidolgozott optimalizációs módszer megbízhatóságát a Digimat-HC végelelemes szoftver alkalmazásával is igazoltuk (6. fejezet), mivel a szerkezet végelelemes analízisének szimulációs eredményei is megerősítik az alkalmazott tervezési feltételek teljesülését.

A kutatás fő hozzáadott értéke az, hogy egy teljesen FRP kompozit szendvicsszerkezet optimalizációs módszere került kidolgozásra. A megalkotott FRP kompozit szendvicsszerkezet – mind az anyagösszetétel, mind a szerkezeti kialakítás tekintetében – jóval előnyösebb, mint a jelenleg alkalmazott hagyományos helikopter padlólemezek.

Ez azt jelenti, hogy az újonnan tervezett teljesen FRP szerkezet – alacsony sűrűsége miatt – jelentős súlymegtakarítást, ezáltal kisebb üzemanyag-fogyasztást és üzemanyagköltséget, valamint kisebb környezeti terhelést is eredményez, mint a hagyományos szerkezetek. Ebből adódóan az általunk kidolgozott optimalizációs módszerrel tervezett teljesen FRP szendvicsszerkezetek széles körben alkalmazhatók a gyakorlatban a szállító járművek szerkezeti elemeiként.

A szakirodalom szintézise alapján megállapítható, hogy a szakirodalomban ugyan számos tervezési és optimalizációs módszer áll rendelkezésre a légi járművek szerkezeti elemeinek optimalizására, azonban a teljesen FRP szendvicsszerkezetekre vonatkozóan nem lelhető fel optimalizációs módszer. Ezért az általunk kidolgozott optimalizációs módszer hiánypótló.

Összegzésként megállapítható, hogy adott mérnöki alkalmazásokhoz szükséges szerkezetek kialakításához a megfelelő anyagösszetevők meghatározása is alapvető fontosságú. A jövőbeni kutatásaink során – a teljesen FRP szendvicsszerkezetekre vonatkozóan – az általunk már kidolgozott optimalizációs módszer további gyakorlati alkalmazási lehetőségeit vizsgáljuk, pl. a közúti, vízi vagy légi közlekedési járművek más szerkezeti elemei esetén is. Ezen kívül további tervezési feltételek és más típusú FRP kompozit anyagok alkalmazását is vizsgálni fogjuk a szerkezet-optimalizációk során.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatta K 134358 projekt keretében.

9. IRODALOM

- [1] Alaa Al-Fatlawi, Jármai Károly, Kovács György: Helikopter kompozit padlólemeze optimalizálásának elméleti alapjai, GÉP, 2002, 2, 30–37.
- [2] Hexcel Composites Publication No. AGU 075b, Honeycomb Sandwich Design Technology. 2000. Available online: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/Honeycomb_Sandwich_Design_Technology.pdf (accessed on 10 June 2021).
- [3] Product Data of Fibreglass/Phenolic Honeycomb Publication ATU 122b. 2007. Available online: https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HRP_eu.pdf (accessed on 23 April 2021).

OPTIMALIZÁLT BORDÁSLEMEZ PARAMÉTERVÁLTOZÁSAINAK HATÁSA A SAJÁTÉRTÉKEKRE

DEPENDENCE OF EIGENVALUES ON PARAMETER CHANGES OF OPTIMIZED STIFFENED PLATES

Dr. Virág Zoltán, Dr. Szirbik Sándor

ABSTRACT

This paper deals with the modal analysis and buckling stability of stiffened plates under longitudinal compression with simple supported conditions. The main objective of the finite element analysis is to investigate some behaviors of these thin-wall structures. The structure of stiffened plate is widespread, from which the version used in this paper has already been optimized for uniaxial compression, some design variables and the cost of welding, and the objective function to be minimized is defined as the material cost. The effect of stiffener damage caused by corrosion can be investigated in FE models of the optimized stiffed plate structure. The buckling shape modes for damaged structures can be compared with the damaged-free ones so that the changes in load capacity can be predicted. Furthermore, we have investigated that the various steel grades of the base plate and stiffeners are given thus assuming that the plate parts (the base plate and ribs) are described with different Young's modulus, while all other material properties in our simulations remain the same. The eigenfrequencies show noticeable differences when the modulus of elasticity is changed. Therefore, it is important that the structure is properly designed and made from proper materials.

1. BEVEZETÉS

A terhelést elszenvető lemezekkel kapcsolatos problémák számos alkalmazási helyen így az építészeti, repülőgépipari, autóipari és tenger-hajózási szerkezeteken is megjelennek. Az egytengelyű vagy biaxiális nyomásnak, hajlításnak, nyírásnak, oldalirányú nyomásnak, hidrosztatikus nyomásnak, koncentrált vagy egyenletesen eloszló statikus, dinamikus terhelésnek kitett és élettartamuk során sokszor magas hőmérsékleten is használt lemezeket ezért célszerű megerősíteni különféle keresztmetszetű merevítőkkal, ami a teherbíróképesség megnövelésének legcélravezetőbb módja. Ezáltal – általában – a megerősített

lemezek rezgéstani tulajdonságai is kedvezőbbé válnak.

Modal analízis során előállított saját körfrekvenciák és vonatkozó rezgések alapján a szerkezeteken további, dinamikus hatásokat is figyelembe vevő vizsgálatok lehetségesek. A sajátértékfeladatok megoldását a numerikusan pontosabban elvégezhető sajátértékszámítással érdemes kezdeni, majd a sajátértékekhez (saját körfrekvenciákhoz) tartozó sajátvektorok (rezgések) előállításával folytatni. A szerkezetek sajátértékfeladatainak numerikus megoldására szolgáló bevett eljárás az alter iteráció és a Lánosz módszer. Ezek közül, ha a rezgéstani feladat szabadságfoka nagy, vagy a feladat jellege ezt indokolja, akkor a numerikusan általában hatékonyabb Lánosz módszer választása célravezetőbb szoftverek alkalmazásakor [1], ahol a megoldás részeként a sajátrezgések képi megjelenítésén a maximális elmozdulás helye a színskálán általában piros színnel jelölt, nagysága pedig egységnyinek választott.

E számítások közvetlen haszna a gerjesztésnek kitett szerkezetek esetén a sajátfrekvenciák valamelyikével egybeeső gerjesztési frekvencia okozta rezonanciakatasztrófa megelőzése, mivel az a valós szerkezet esetén a leggyengébb alkotórészének törésében jelentkezhet gátolva így azok üzemszerű működését. A rezonanciakatasztrófa lehetséges veszélyei miatt különféle ipari területeken végeznek is erre vizsgálatokat, pl. bányákban alkalmazott kotrógépeknél is [2]. A lemezszerkezet károsodásai, vagy a tervezett paraméterektől eltérő megvalósítása a szerkezetnek, a sajátértékek változását eredményezik, amely kedvezőtlen lehet.

2. BORDÁKKAL MEGERŐSÍTETT LEMEZ GEOMETRIÁJÁNAK OPTIMÁLÁSA

A feladat megoldása során figyelembe vettük a bordázott lemez horpadási feltételét (horpadási görbén a lemez gyártása során megmaradó hegesztési feszültséget és a szerkezet kezdeti alakpontatlanságának hatását), az alaplemez horpadási feltételét (alaplemez

*egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Bányászati és Geotechnikai Intézet

**egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Műszaki Mechanikai Intézet

bordák közötti helyi horpadására felírva), a bordák helyi horpadását (a határkarcsúsággal történő változtatását) és az alakváltozási feltételt (lemez teljes hosszán végigfutó hegesztésekből származó alakváltozás nagyságának korlátozását a lemezhosszúságához viszonyítva).

A bordáslemez az előzőek tekintetbe vételével optimalizált, ahol a minimalizálandó célfüggvény az anyagköltség volt. A rögzített paraméterek: $B = 6000$ mm alaplemez szélesség, $L = 4000$ mm alaplemez hosszúság, $N = 1,2 \times 10^7$ N bordairányú axiális nyomóerő, $E = 2,1 \times 10^5$ MPa Young modulus, $\rho = 7,85 \times 10^{-9}$ t/mm³ sűrűség, $f_y = 235$ MPa folyáshatár. Magát az optimalizást Excel Solver NLP programmal végeztük, amely gradiens módszer alkalmaz. Az optimalizási eljárás során ismeretlenek tekintett az alaplemez t_f és a borda t_s vastagsága, h_s bordamagasság, illetve a bordák száma $\varphi - 1$, melyek értékei csak bizonyos határon belül mozoghatnak. A költségfüggvény a gyártási sorrendnek megfelelően került megállapításra, azaz először a 6 m × 4 m méretű alaplemez 3 m × 1,5 m méretű lemezekből tompavarrattal összehegesztett, majd ezután történik a merevítők alaplemezhez történő rögzítése sarokvarratokkal [3]. Az első fázis

$$T_{W1} = 2 (8 \rho B L t_f)^{0,5} + 1,3 C_W (a_W)^n L_{W1} \quad (1)$$

hegesztési ideje megadható, ahol a_W (mm) a hegesztési varrat méretét jelöli és $L_{W1} = 3L + B$. SAW tompavarratok esetén $t_f = 4 - 15$ mm méretnél $C_W(a_W)^n = 0,1346 \times 10^{-3} (t_f)^2$ és $t_f = 15 - 40$ mm esetén pedig $C_W(a_W)^n = 0,1033 \times 10^{-3} (t_f)^{1,904}$ módon számítható. Ezáltal ismertek a hegesztési idők az a_W varratméret függvényében a hosszirányú sarokvarrat lefelé állása esetén. A második fázis hegesztési ideje a következő:

$$T_{W2} = 3 [\varphi (\rho B L t_f + \rho (\varphi - 1) L A_S)]^{0,5} + 1,3 \cdot 0,3394 \times 10^{-3} (a_W)^2 L_{W2}, \quad (2)$$

ahol A_S jelöli a borda területét, $a_W = 0,5 t_s$, továbbá $a_{Wmin} = 4$ mm esetén $L_{W2} = 2(\varphi - 1) L$ érvényes. Az anyagköltség megadható a

$$K_M = k_M \rho [B L t_f + (\varphi - 1) L A_S] \quad (3)$$

számítási képlettel, a teljes költség pedig a

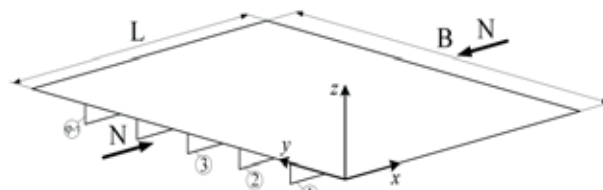
$$K_M / k_M = \rho [B L t_f + (\varphi - 1) L A_S] + k_F (T_{W1} + T_{W2}) / k_M \quad (4)$$

módon számítható ki.

Nemzetközileg is használható megoldások érdekében az anyagköltség-tényezőnél (acél) $k_M = 0,5 - 1,2$ \$/kg, gyártásnál rezsiköltséggel együtt $k_F = 15 - 45$ \$/munkaóra. Így k_F / k_M arány 0 - 1,5 kg/min tartományban változhat [4, 5].

3. BORDÁZOTT LEMEZ REZGÉSTANI VIZSGÁLATA VÉGESELEM-MÓDSZERREL

Optimalás után a választott bordáslemez kialakítást a kiszámított geometriai adatokkal és egyszerű (simple supported) megtámasztással ($t_f = 5$ mm, $t_s = 10$ mm, $h_s = 140$ mm és $\varphi = 29$) végeselemes vizsgálatokkal elemezzük. Először az optimalt kialakításhoz képest például korróziós károsodások [6] által kieső bordák elvételével modellezett eseteken keresztül a károsodás lemezterhelhetőség megváltozására gyakorolt hatását [7] vizsgáljuk.



1. ábra. A vizsgált bordázott lemez

Megnézzük továbbá azt a körülményt is, ha az alaplemez és borda acélminőségeiben eltérést mutatkozik [8]. A kitűzött feladat a sajátértékek numerikus meghatározásával oldható meg. Előfeszített esetekben az ilyen jellegű számítások két lépésben végezhető el. Első lépésben kerül sor az alkalmazott terhelés hatását nemlinearitás mellett figyelembe vevő terhelt alak kiszámításra, majd ezt a második lépésben felhasználva, a felterhelt eset geometriáján kerül sor a sajátérték kinyerésére. A terhelt alak átvitele okán ilyen feladatokban a lineáris végelemek használata indokolt. A meghatározott és növekvő sorrendbe állított első néhány domináns sajátértékhez tartozó sajátvektor ezután kerül meghatározásra. A megoldások a bordáslemez geometriájától és az anyagminőségtől függenek, melyeket az alkalmazott alátámasztás döntően befolyásol. Az eljárás tetszőleges bordakeresztszemet mellett használható [9]. Mivel a szerkezet előfeszített az előírt N bordairányú nyomás, amely értelemszerűen elhangolja a sajátfrekvenciákat az előfeszítés nélküli esettől, is figyelembe vett. A vizsgált szerkezet kialakítása az 1. ábrán látható. Az ábrán jelölt a bordák sorszámozása is.

A numerikus mechanika végelem-módszere a szerkezet pontos geometriai modelljének geometriailag egyszerű alakú, elegendő számú kicsiny elemre történő felosztásán alapul. A gyakorlatban jól használható végeselemes elemcsaládok adott számú oldalélelől és általában azokon elhelyezkedő csomópontokból álló elemeket tartalmaznak. A szerkezet modelljében az egyes végelemek a valóságos kapcsolódásoknak megfelelően illeszkednek egymáshoz az elemek határain kijelölt csomópontokban tett, illetve az illeszkedő csomópontok elmozdulásaiban történő előírások felhasználásával. Héjmodellt alkalmazva a merevítők és az alaplemez középfelülete is végelemek-

re osztott az analízishez. A végeelemes eljárások alkalmazása rezgéstani feladatokban elméleti háttérrel tekintve jól kidolgozott és gyakorlati problémák megoldásában [1] is jól használható eszköz.

Az egyszerűség végett a bordáslemez végeelemes modellezéséhez egy széleskörben használatos, hagyományos elemcsaládot választottunk, egy lineáris, 4 csomópontú, S4R jelű héjelemet, mely a vizsgált feladatokban már megfelelő pontosságot biztosít 70 mm átlagos elemméret megválasztása mellett elérhető globális elemszám mellett. A végeelemes modellhez rendelt lineáris anyagtörvényeket, a borda, illetve alaplemez tulajdonságait a feladatkitűzésében rögzítetteknek megfelelően írtuk elő.

Elsőként a maximális terhelés (a kritikus kihajlási terhelés) került megbecsülésre a szerkezeti instabilitás vagy lemezhorpadás elkerülése érdekében. Az Abaqus szoftver [1] segítségével, héjelemek alkalmazása mellett, lineáris perturbációval történtek az előfeszített lemezszerkezet ezen vizsgálatai. Az 1. táblázatban az első oszlop mutatja a bordáslemez kieső bordáinak sorszáma a sorszámozás az 1. ábra alapján értelmezhető. Jól látszik a táblázatból, hogy a lemez teherviselőképességének csökkenése, az új stabil alakba történő átptattanás egyre kisebb kritikus erő mellett következik be.

1. táblázat. A károsodások miatt kieső bordák hatása a sajátértékekre.

No.	λ_1	λ_2	λ_3
	2739,2	2830,2	3064,8
1	1486,8	1508,5	1586,0
2	1868,5	1905,6	1965,9
3	1872,1	1907,0	1970,6
1-2	652,00	663,30	740,83
2-3	809,32	849,38	869,69
1-2-...-28	6,1876	22,891	29,452

A táblázat megmutatja egyszerű kézi számítások után, hogy két borda valamely okból történő elvesztése már a kritikus erőnek az előírt N alá csökkenését okozza. Az egyszerűség kedvéért a becsült kritikus kihajlási terhelést általában az első sajátértékből 2739,2 stb. adjuk meg, amely 1 N/mm léptéktényezővel számított. A szerkezetek érzékenységvizsgálatához azonban legtöbbször számos elemzést kell még elvégeznünk, ahol az első néhány sajátértékhez tartozó kihajlási alakot kell felhasználni geometriai imperfekcióként. Ez azt jelenti esetünkben, hogy a merevített lemez idealizált geometriáját egy bizonyos léptékkel a kihajlási alakokból származó elmozdulásokkal zavarjuk meg a stabilitásvesztés modellezése céljából.

Az optimált bordáslemez többféle lemezvastagságú acéllemezből kell elkészíteni, ezért elképzelhető, hogy azok anyagminőségükben eltérnek. Egyszerűsítve a feladatot kiindultunk abból, hogy az acélminőségek rugalmassági modulusa 190 - 210 GPa lehet, így szá-

mítási sorozatokat végeztünk 190, 200 és 210 GPa értékekre az alaplemez és bordák tekintetében.

2. táblázat. Sajátkörfrekvenciák változatlan borda (210 GPa) és változó alaplemez anyagminőség függvényében.

Modus sorszáma	Alaplemez Young modulusa [GPa]		
	210	200	190
1.	89,083	87,041	84,833
2.	93,016	91,303	89,676
3.	102,44	101,81	101,42
4.	116,23	116,67	117,51
5.	130,19	131,31	132,97

Az első számítási sorozatban csak az alaplemez Young modulusának módosítása történt meg miközben a merevítőbordák anyagát változatlan, azaz 210 GPa nagyságú modulussal számoltuk. A második számítási sorozatban az alaplemez Young-modulusát változtatlanul, 210 GPa értékűnek hagyva a bordák anyagát leíró modulust változtattuk meg. A Poisson-szám értéke pedig minden vizsgált esetben 0,25 értékben változatlan maradt. Az első öt saját körfrekvenciát a 2. és 3. táblázat tartalmazza.

A 2. táblázatban látható módon az összetartozó sorszámu saját körfrekvenciák csökkenése arányos és összhangban van az alaplemez anyagát leíró rugalmassági modulus csökkenésével a merevítőbordák változatlan értékű modulusa mellett.

3. táblázat. Sajátkörfrekvenciák változatlan alaplemez (210 GPa) és változó borda anyagminőség függvényében.

Modus sorszáma	Borda Young modulusa [GPa]		
	190	200	210
1.	80,866	85,156	89,083
2.	84,779	89,005	93,016
3.	92,366	97,493	102,44
4.	103,85	110,24	116,23
5.	116,27	123,48	130,19

A 3. jelű táblázatban az összetartozó sorszámu saját körfrekvenciák csökkenése a 2. táblázatban látott módon arányos és összhangban van a bordák anyagát leíró rugalmassági modulus csökkenésével az alaplemez változatlan rugalmassági modulusa mellett, de szerkezeti kialakítás okán a csökkenés mértéke jóval nagyobb mértékű lesz.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

Optimalizált axiális erőhatásnak kitett bordáslemez vizsgálatát mutattuk be, amely során első feltevésünk a lemezki alakítás üzemszerű működése során fellépő károsodások hatásának stabilitásvesztési vizsgálataihoz kapcsolódott. Leegyszerűsítve a problémát a numerikus modellezés során bordákat vettünk ki a végeelemes modellből és így határoztunk meg a stabili-

tásvesztéshez tartozó sajátértékeket, amelyekhez tartozó kihajlási alakok az érzékenységvizsgálatokban használatosak. Ehhez hasonló sajátértékproblémára vezet annak modellezése is, ha a szerkezet két fő alkotóeleme (az alaplemez és a merevítőbordák) különböző acélminőségű lemezből készülnek, amelyeket a legegyszerűbb módon különböző Young modulussal írunk le. A számítási eredmények nagyobb, de arányos eltéréseket mutatnak, ha a merevítők modulusában történik e változtatás. A lemezszerkezet megfelelő tervezésén túlmenően tehát a megfelelő anyagminőség is fontos. A dinamikus terhelések merevített lemezekre gyakorolt hatása a modal analízis eredményeit használó szuperpozíciós technikával tovább vizsgálható.

5. IRODALOM

- [1] Abaqus 6.13 online documentation. Dassault Systems 2015.
- [2] Popescu F. D., Radu S. M., Andras A., Kertesz (Brînaş) I.: Simulation of the frequency response of the ERC 1400 Bucket Wheel Excavator boom, during the excavation process, *New Trends in Production Engineering*, Vol. 2, Issue 1, (2019) pp. 153-167.
- [3] Farkas József, Jármái Károly: *Fémszerkezetek innovatív tervezése*, Gazdász-Elasztik Kiadó és Nyomda, 2015, 592 old.
- [4] Károly Jármái: Newer manufacturing technologies and their costs in automotive structures; a review, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9529-5_41, pp. 478-485.
- [5] Alaa Al-Fatlawi, Károly Jármái and György Kovács, Optimization of a Totally Fiber-Reinforced Plastic Composite Sandwich Construction of Helicopter Floor for Weight Saving, Fuel Saving and Higher Safety, *Polymers*, 2021, 13(16), 2735. 20 p. <https://doi.org/10.3390/polym13162735>
- [6] Rahbar-Ranji A., Niamir N., Zarookian A.: Ultimate strength of stiffened plates with pitting corrosion, *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.* 7, 2015. pp. 509-525.
- [7] Szirbik S., Virág Z.: Numerical investigation of optimized stiffened plates with damaged stiffeners, *Annals of the University of Petrosani: Mechanical Engineering* 22, 2020. pp. 55-62.
- [8] Szirbik S., Virág, Z.: Finite element analysis of an optimized hybrid stiffened plate, *MATEC Web Conf* 342, 2021. pp. 06003.
- [9] Virág Z., Szirbik S.: Modal Analysis of Optimized Trapezoidal Stiffened Plates under Lateral Pressure and Uniaxial Compression, *Applied Mechanics* 2(4), 2021. pp. 681-693.

MEGTERMÉKENYÍTÉSI OPTIMÁLÓ ALGORITMUS TESZTELÉSE A CEC2015 KÖRNYEZETBEN ÉS ALKALMAZÁSA NAGYMÉRETŰ PROBLÉMÁKRA

TESTING A FERTILIZATION OPTIMIZATION ALGORITHM IN THE CEC2015 ENVIRONMENT AND APPLYING IT TO LARGE-SCALE PROBLEMS

Hazim Nasir Ghafil*, Shaymaa Alsamia** és Dr. Jármay Károly***

ABSTRACT

This paper presents the fertilization optimization algorithm, a new optimization method based on Levy's flight and random search in a search space. Based on the fertilization of the egg in mammalian reproduction, this algorithm is biologically inspired. In CEC2015, the algorithm's performance was compared to that of other optimization algorithms using time-consuming benchmarks and large-scale optimization problems. The fertilization optimization algorithm outperformed other optimization algorithms in many cases, and the study and comparison results are encouraging for the use of the fertilization optimization algorithm in other potential applications.

1. BEVEZETÉS

Története során az optimáló algoritmusokat ihlette a természet vagy az ember által létrehozott jelenségek, mely által inspirált matematikai formulák kerültek bevezetésre, amelyekkel különböző területek optimálási problémáit lehetett megoldani a tudományok területén. Konkrétabban, az optimáló algoritmusokat arra használták, hogy megtalálják a maximumát vagy minimumát egy célfüggvénynek. Széles körű alkalmazásuk van az iparban [1] és a mérnöki tudományokban, a robotikában [2] és a szerkezeteknél [3]. Az optimáló módszer fejlesztőket jobban érdeklik a jelenségek, amelyek olyan új módszer kifejlesztésére inspirálhatják őket, melyekkel megbízhatóbbak, gyorsabbak lesznek, vagy képesek megtalálni a meglévő problémákra a legjobb megoldásokat.

Az egyik inspirációs motor az állatraj, madárcsapat, halraj és rovarok, amelyek a rajintelligencia [4, 5] módszerek kifejlesztéséhez vezettek. Ez a kifejezés lehet az egyedek egy csoportja között felhalmozódó és megosztott tudásként definiálható, és ez a fajta intelligencia nem érhető el egyetlen egyed által. Példák

a rajintelligenciára Particle Swarm Optimization (PSO) [6], Artificial Bee Colony (ABC) [7], és Grey Wolf Optimálás (GWO) [8]. Nem minden biológiailag inspirált algoritmus rajintelligencia; a baktériumok és az invazív gyomok optimálása nem követi a raj szabályait. Ebben a cikkben egy biológiailag ihletett algoritmus a megtermékenyítési folyamatból a szaporodási traktusban az emlősök vonatkozásában származik. Az új algoritmus neve Megtermékenyítési Optimáló (Fertilization Optimization FO) algoritmusnak nevezik. A számításgépes benchmarkok a CEC2015-ben található [9] a kísérletek során. Ezekben a matematikai optimálási problémákon keresztül az FO-t más metaheurisztikákkal hasonlítottuk össze. Figyelemre méltó, hogy a FO nagy teljesítményt mutatott és számos esetben megelőzött számos más algoritmust. A matematikai optimálási problémák sokfélesége és nehézsége, amelyeken a FO sikeresen át tudott jutni, bizonyította a megtermékenyítő algoritmus megbízhatóságát a matematikai optimálásban. Röviden, a FO algoritmus a következőképpen írható le.

Minden megoldásnak van egy pozíciója (X) és sebessége (v) a keresési térben. Minden egyes iterációnál a sebesség csökkent egy bizonyos delta értékkel.

$$v^{t+1} = \delta v^t, \quad 0 < \delta < 1, \quad (1)$$

$$V_i^{t+1} = V_i^t e^{-\frac{1}{v^{t+1}}}, \quad (2)$$

ahol t az optimálási folyamat iterációinak száma. A megoldások a keresési térben a Lévy-féle repülés segítségével mozognak L és a megoldás frissítése a következő egyenlet szerint történik:

$$X_i^{t+1} = L(X_i^t - V_i^t), \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (3)$$

ahol i a megoldáskomponensek indexe, és n az össz változószám (3). Az átlagos érték a legjobb X_{first}^t első,

* doktorandusz, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Gépészmérnöki Tanszék, Mérnöki Kar, Kufai Egyetem, Irak

** adjunktus, Szerkezeti és Vizsgadálkodási Tanszék, Mérnöki Kar, Kufai Egyetem, Irak

*** professzor, Miskolci Egyetem Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet

a közepesen legjobb X_{middle}^t középső és legrosszabb megoldás X_{end}^t vége szintén hatással lehet a megoldás frissítési folyamatára:

$$X_i^{t+1} = \frac{X_{first}^t + X_{middle}^t + X_{end}^t}{3} \quad (4)$$

$$X_{ij}^{t+1} = X_{ij}^t - V_{ij}^t e^{\frac{-1}{v^{t+1}}} + L(X_i^t - V_{ij}^t) - \frac{X_{first}^t + X_{middle}^t + X_{end}^t}{3}, \quad (j = 1, 2, \dots, m), \quad (5)$$

ahol m a változók száma a javasolt megoldásnál, a pszeudokód pedig az 1. kódlistán látható.

Az (1)-(4) egyenletek kombinációja adja a keresést, az FO algoritmus keresőmotorját:

1. kódlista Az FO algoritmus pszeudokódja

A probléma paramétereinek meghatározása (változók száma, célfüggvény, feltételek)
 Az algoritmus paramétereinek meghatározása (populáció mérete, maximális iteráció, sebességcsökkentési együttható, csillapítás).
 A populáció véletlenszerű pozícióinak és sebességeinek inicializálása
 A legjobb költség inicializálása
 Ismétlés 1-től a maximális iterációszámig
 Új megoldás meghatározása
 Ismétlés 1-től a populáció számáig
 Az (5) egyenlet segítségével számítsuk ki az új megoldás új pozícióját.
 Megállás, ha a maximális populációszámot elértük
 A régi megoldás egyesítése az új megoldással
 A megoldások rendezése
 Válassza ki a populáció első megoldását
 Válassza ki a populáció közepén lévő megoldást
 Válassza ki a populáció utolsó megoldását
 A rendezett csoport első megoldása a legjobb megoldás
 A legjobb megoldás költsége a legjobb költség.
 A legjobb költség frissítése
 Leállítás az iterációk maximális számának elérésekor

A FO algoritmus forráskódját a MATLAB 2016 használatával fejlesztették ki, és a következő helyről tölthető le: https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/103970-fertilization-optimization-algorithm-fo/?s_tid=mlc_lp_leaf

Az alkalmazott tesztfüggvények a következők:

Magasan kondicionált elliptikus függvény

$$f_1(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^D (10^6)^{\frac{i-1}{D-1}} x_i^2$$

Szivar függvény

$$f_2(\mathbf{x}) = x_1^2 + 10^6 \sum_{i=2}^D x_i^2$$

Diszkosz függvény

$$f_3(\mathbf{x}) = 10^6 x_1^2 + \sum_{i=2}^D x_i^2$$

Rosenbrock-féle függvény

$$f_4(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^{D-1} (100(x_i^2 - x_{i+1})^2 + (x_i - 1)^2)$$

Ackley-féle függvény

$$f_5(\mathbf{x}) = -20 \exp \left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{D} \sum_{i=1}^D x_i^2} \right) - \exp \left(\frac{1}{D} \sum_{i=1}^D \cos(2\pi x_i) \right) + 20 + e$$

Weierstrass függvény

$$f_6(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^D \left(\sum_{k=0}^{kmax} [a^k \cos(2\pi b^k(x_i + 0.5))] \right) - D \sum_{k=0}^{kmax} [a^k \cos(2\pi b^k \cdot 0.5)]$$

$a = 0.5, b = 3, kmax = 20$

Griewank-féle függvény

$$f_7(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^D \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^D \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$$

Rastrigin-féle függvény

$$f_8(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^D (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10)$$

Módosított Schwefel-féle függvény

$$f_9(\mathbf{x}) = 418.9829 \times D - \sum_{i=1}^D g(z_i), z_i = x_i + 4.209687462275036e + 002$$

$$g(z_i) = \begin{cases} z_i \sin(|z_i|^{1/2}) & \text{if } |z_i| \leq 500 \\ (500 - \text{mod}(z_i, 500)) \sin\left(\sqrt{|500 - \text{mod}(z_i, 500)|}\right) - \frac{(z_i - 500)^2}{10000D} & \text{if } z_i > 500 \\ (\text{mod}(|z_i|, 500) - 500) \sin\left(\sqrt{|\text{mod}(|z_i|, 500) - 500|}\right) - \frac{(z_i + 500)^2}{10000D} & \text{if } z_i < -500 \end{cases}$$

Katsuura függvény

$$f_{10}(\mathbf{x}) = \frac{10}{D^2} \prod_{i=1}^D \left(1 + i \sum_{j=1}^{32} \frac{|2^j x_i - \text{round}(2^j x_i)|}{2^j} \right)^{\frac{10}{D^{1.2}}} - \frac{10}{D^2}$$

HappyCat függvény

$$f_{11}(\mathbf{x}) = \left| \sum_{i=1}^D x_i^2 - D \right|^{1/4} + \left(0.5 \sum_{i=1}^D x_i^2 + \sum_{i=1}^D x_i \right) / D + 0.5$$

HGBatFunction

$$f_{12}(\mathbf{x}) = \left| \left(\sum_{i=1}^D x_i^2 \right)^2 - \left(\sum_{i=1}^D x_i \right)^2 \right|^{1/2} + \left(0.5 \sum_{i=1}^D x_i^2 + \sum_{i=1}^D x_i \right) / D + 0.5$$

Bővített Griewank-féle plusz Rosenbrock-féle függvény

$$f_{13}(\mathbf{x}) = f_7(f_4(x_1, x_2)) + f_7(f_4(x_2, x_3)) + \dots + f_7(f_4(x_{D-1}, x_D)) + f_7(f_4(x_D, x_1))$$

Bővített Scaffer-féle F6 függvény

$$g(x, y) = 0.5 + \frac{(\sin^2(\sqrt{x^2 + y^2}) - 0.5)}{(1 + 0.001(x^2 + y^2))^2}$$

$$f_{14}(\mathbf{x}) = g(x_1, x_2) + g(x_2, x_3) + \dots + g(x_{D-1}, x_D) + g(x_D, x_1)$$

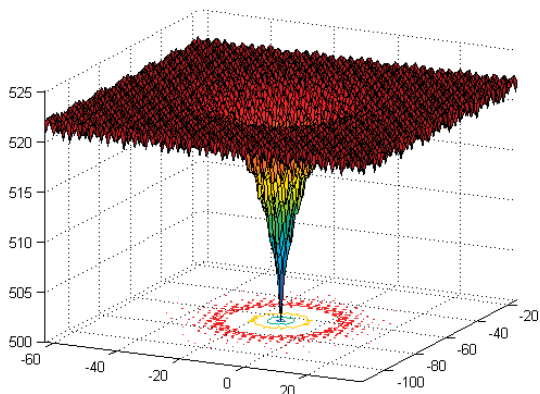
M_i: forgásmátrix: Minden függvényhez és minden alapfüggvényhez különböző forgatási mátrix van hozzárendelve.

Eltolt és elfordított Ackley-féle függvény

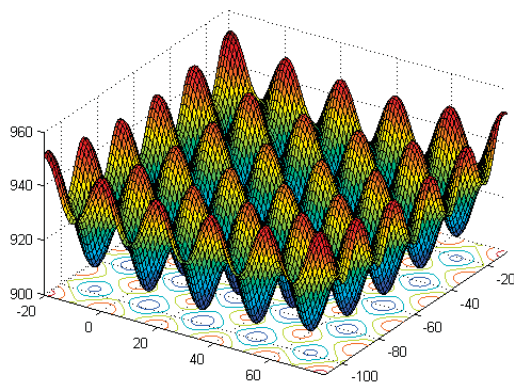
$$F_3(\mathbf{x}) = f_5(\mathbf{M}_3(\mathbf{x} - \mathbf{o}_3)) + F_3^*$$

Eltolt és elfordított Rastrigin-féle függvény

$$F_4(\mathbf{x}) = f_8\left(\mathbf{M}_4\left(\frac{5.12(\mathbf{x} - \mathbf{o}_4)}{100}\right)\right) + F_4^*$$



1. ábra Az eltolt és elfordított Ackley-féle függvény, ábrája



2. ábra. Az eltolt és elfordított Rastrigin-féle függvény ábrája

1. táblázat A CEC2015 időigényes benchmark problémái F1-F9

CEC2015	Típuszám	Leírás	f_{\min}
Unimodális függvények	F1	Forgatott hajlított szivarfüggvény	100
	F2	Forgatott korongfüggvény	200
Egyszerű multimodális függvények	F3	Eltolt és elforgatott Weierstrass-függvény	300
	F4	Eltolt és elforgatott Schwefel-függvény	400
	F5	Eltolt és elforgatott Katsuura-függvény	500
	F6	Eltolt és elforgatott HappyCat függvény	600
	F7	Eltolt és elforgatott HGBat függvény	700
	F8	Eltolt és elforgatott, kibővített Griewank plusz Rosenbrock-függvény	800
	F9	Eltolt és elforgatott, kibővített Scaffer F6 függvény	900

2. EREDMÉNYEK ÉS ÖSSZEHASONLÍTÁS

Azokat a CEC2015 benchmark függvényeket, amelyeket a 1. és 2. táblázatok tartalmaznak, ebben a tanulmányban a teljesítmény vizsgálatára használtuk fel az FO algoritmus teljesítményének vizsgálatához. A futtatási feltételek a CEC2015 kísérletben a következők: változószám 10, populáció méret 10, maximális iterációk száma 1000 és 20 független futtatás minden esetben. Először a FO algoritmust hasonlítottuk össze a

Hibrid részecske raj optimalizáló algoritmus és a FireFly algoritmussal (*HPSOFF*) [10], valamint a Hybrid Firefly és Particle Optimization (*HFPSO*) algoritmussal [11]. A 3. és 4. táblázat mutatja az összehasonlítás eredményeit az átlagos megoldások és a standard *FO*, *HPSOFF* és *HFPSO* közötti összehasonlításban.

A 3. táblázatban az átlagos megoldások és a standard *FO*, *HPSOFF* és *HFPSO* közötti eltérés kerül megadásra.

2. táblázat A CEC2015 időigényes benchmark problémái F10-F15

Típus	No.	Leírás	f_{\min}
Hibrid függvények	F10	Hibrid függvény 1 ($N = 3$)	1000
	F11	Hibrid függvény 2 ($N = 4$)	1100
	F12	Hibrid függvény 3 ($N = 5$)	1200
Összetett függvények	F13	Összetett függvény 1 ($N = 5$)	1300
	F14	Összetett függvény 2 ($N = 3$)	1400
	F15	Összetett függvény 3 ($N = 5$)	1500

3. táblázat Az FO algoritmus standard szórásai értékei a CEC2015 függvényekre a HPSOFF és a HFPSO algoritmusokkal összehasonlítva

No.	HPSOFF	HFPSO	FO
F1	3.4292E+07	6.6375E+06	0E+00
F2	1.2383E+04	1.5696E+04	1.9569E-06
F3	1.5636E+00	1.4189E+00	7.0195E-02
F4	3.0718E+02	3.9950E+02	1.8913E+00
F5	8.2275E-01	5.7466E-01	2.0303E+02
F6	1.4097E-01	1.4584E-01	7.1663E-10
F7	9.3694E-01	2.5433E-01	6.1138E+00
F8	2.8927E+00	4.0866E+00	4.7333E+04
F9	2.3372E-01	2.6387E-01	4.6656E-13
F10	2.9730E+05	3.3036E+05	8.8424E+04
F11	1.9652E+00	2.6814E+00	0E+00
F12	9.5565E+01	1.0221E+02	2.9857E-01
F13	2.5959E+01	2.8341E+01	3.3013E+01
F14	5.0554E+00	5.8221E+00	2.8957E+02
F15	1.8650E+02	1.0398E+02	6.8567E+00

4. táblázat Az FO algoritmus átlagértékei a CEC2015 függvényekre a HPSOFF és a HFPSO algoritmusokkal összehasonlítva

No.	HPSOFF	HFPSO	FO
F1	4.8387E+07	1.3768E+07	7.0974E+07
F2	3.8331E+04	3.8542E+04	1.1254E+10
F3	3.0845E+02	3.0671E+02	3.2049E+02
F4	1.7084E+03	1.3159E+03	4.8685E+02
F5	5.0273E+02	5.0250E+02	2.1652E+03
F6	6.0063E+02	6.0054E+02	1.6116E+06
F7	7.0087E+02	7.0060E+02	7.5666E+02
F8	8.0740E+02	8.0773E+02	1.6292E+05
F9	9.0388E+02	9.0393E+02	1.0413E+03
F10	3.5402E+05	3.3099E+05	6.8481E+04
F11	1.1067E+03	1.1074E+03	1.4195E+03
F12	1.4517E+03	1.3983E+03	1.3391E+03
F13	1.6333E+03	1.6452E+03	1.3908E+03
F14	1.6053E+03	1.6021E+03	1.5594E+04
F15	1.8365E+03	1.9233E+03	2.0528E+03

5. táblázat Az FO algoritmus átlag szórása a CEC2015 függvényekre a PSO, FF és az FFPSO alg. összehasonlítva

No.	PSO	FF	FFPSO	FO
F1	1.3549E+08	2.8945E+08	4.9786E+09	0E+00
F2	1.5114E+04	9.7404E+03	4.6261E+08	1.9569E-06
F3	1.3259E+00	1.2487E+00	1.6124E+00	7.0195E-02
F4	3.5521E+02	3.2112E+02	2.6203E+02	1.8913E+00
F5	6.3611E-01	5.9796E-01	9.3430E-01	2.0303E+02
F6	2.8490E-01	5.8361E-01	1.3580E+00	7.1663E-10
F7	1.8947E+00	5.8077E+00	3.3329E+01	6.1138E+00
F8	2.7690E+01	1.7256E+02	2.7423E+05	4.7333E+04
F9	3.2749E-01	2.3842E-01	1.7883E-01	4.6656E-13
F10	1.9786E+05	6.5054E+05	7.7896E+07	8.8424E+04
F11	2.9153E+00	2.4020E+00	6.7179E+01	0E+00
F12	1.1574E+02	9.1615E+01	4.3894E+02	2.9857E-01
F13	1.9141E+01	2.9519E+01	9.8971E+02	3.3013E+01
F14	4.5254E+00	3.5980E+00	4.2292E+01	2.8957E+02
F15	1.4570E+02	7.4514E+01	1.0567E+02	6.8567E+00

- F16: Rastrigin: $f(x) = 10n + \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)]$, Range = [-5.12, 5.12], $F_{min} = 0$;
- F17: $f(x) = \sum_{i=1}^{n-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (1 - x_i)^2]$, Range = [-2.048, 2.048], $F_{min} = 0$;
- F18: $f(x) = -a \exp\left(-b \sqrt{\frac{1}{d} \sum_{i=1}^d x_i^2}\right) - \exp\left(-b \sqrt{\frac{1}{d} \sum_{i=1}^d \cos(cx_i)}\right) + a + \exp(1)$, Range = [-32.768, 32.768], $F_{min} = 0$;
- F19: $f(x) = \sum_{i=1}^d \frac{x_i^2}{4000} - \prod_{i=1}^d \cos\left(\frac{x_i}{\sqrt{i}}\right) + 1$, Range = [-600, 600], $F_{min} = 0$.

6. táblázat Az FO algoritmus átlagértékei a CEC2015 függvényekre a PSO, FF és az FFPSO algoritmusokkal összehasonlítva

No.	PSO	FF	FFPSO	FO
F1	2.4553E+08	4.3059E+08	1.6287E+10	7.0974E+07
F2	3.8112E+04	3.3304E+04	1.4957E+08	1.1254E+10
F3	3.0779E+02	3.0773E+02	3.1455E+02	3.2049E+02
F4	2.2534E+03	1.5473E+03	3.1120E+03	4.8685E+02
F5	5.0277E+02	5.0293E+02	5.0350E+02	2.1652E+03
F6	6.0089E+02	6.0092E+02	6.0673E+02	1.6116E+06
F7	7.0193E+02	7.0586E+02	8.0586E+02	7.5666E+02
F8	8.1583E+02	8.6344E+02	2.7632E+05	1.6292E+05
F9	9.0391E+02	9.0395E+02	9.0451E+02	1.0413E+03
F10	2.9540E+05	5.3162E+05	5.1186E+07	6.8481E+04
F11	1.1088E+03	1.1080E+03	1.2198E+03	1.4195E+03
F12	1.4620E+03	1.3995E+03	2.1953E+03	1.3391E+03
F13	1.6415E+03	1.6437E+03	3.0005E+03	1.3908E+03
F14	1.6076E+03	1.6111E+03	1.6770E+03	1.5594E+04
F15	1.9149E+03	1.9269E+03	2.1840E+03	2.0528E+03

Az 5. táblázat a szórás összehasonlítását mutatja a FO, a PSO, az FFPSO algoritmus [12] és a FireFly (FF) algoritmus között, míg a 6. táblázat az összehasonlítást mutatja, az átlagos megoldási eredmények összehasonlítását ugyanezen algoritmusok között.

A 7. és 8. táblázat nagyméretű optimálási feladatok számítási eredményeit mutatják az F16 és F17, valamint az F18 és F19 feladatokra.

A FO algoritmus kevésbé hatékony a magas fokú multimodális benchmarkokon, és ez a viselkedés látható a következő példákban is a statisztikai eredményeken. A kísérleti eredmények azt mutatják, hogy a FO algoritmus hatékonyabb a nagy léptékű optimálásnál mint kis léptékben. A viselkedés nagy és kis léptékű problémákon való viselkedés külön tanulmányt igényel, amely irányt mutathat a jövőbeni munkára. Röviden, a FO algoritmus stabil és gyors lehet konvergencia, unimodális optimálási problémákon, valamint a hatékonysága jelentős a nagy léptékű problémáknál.

3. ÖSSZEFOGLALÁS

A megtermékenyítési optimálási algoritmus egy erőteljes biológiailag ihletésű algoritmus, amelyet matematikai optimálási problémáknál vizsgáltunk. Utánozza a kölcsönhatást a spermiumok és a méh között a petesejt megtermékenyítése során. A statisztikai eredmények 19 tesztfüggvényen; CEC2015-ös időigényes tesztfeladat gyűjteményen, benchmarkon került bemutatásra, valamint egymódusú, többmódusú, kis léptékű, és nagy léptékű problémákon mutattuk be a javasolt algoritmus hatékonyságát számos optimáló algoritmussal összehasonlítva. A FO algoritmus vizsgálatai során az FO algoritmus teljesítménye nagy léptékű problémákon jobbnak bizonyult, mint a kis léptékű problémákon nyújtott teljesítménye. A statisztikai eredmények azt mutatják, hogy a FO algoritmus stabil, kisebb szórással, STD-vel és adott esetben a legjobb megoldással rendelkezik, mint nyolc más versenyképes algoritmus. A FO algoritmus bizonyította, hogy erőteljes az unimodális függvényekre, és ígéretes alkalmazásokat kínál a

7. táblázat Nagyméretű optimalizációs feladat eredményei az F16 és F17 feladatokra

Algoritmus	Függvény	F16	F17
ALO	Best	1.2463E+04	9.6145E+04
	Worst	1.5088E+04	2.6251E+05
	Mean	1.3352E+04	1.2072E+05
	STD	5.7343E+02	2.5922E+04
BOA	Best	0.0000E+00	9.9873E+02
	Worst	1.1460E-10	9.9894E+02
	Mean	3.3526E-12	9.9885E+02
	STD	1.5967E-11	4.6350E-02
GWO	Best	6.3429E+03	3.3616E+03
	Worst	7.4800E+03	7.2573E+03
	Mean	6.9049E+03	4.8800E+03
	STD	2.6947E+02	8.9692E+02
PSO	Best	1.4774E+04	4.2109E+05
	Worst	1.7302E+04	4.6887E+05
	Mean	1.6192E+04	4.5065E+05
	STD	6.4158E+02	1.0330E+04
SCA	Best	5.1110E+02	1.2307E+05
	Worst	4.6834E+03	3.0827E+05
	Mean	1.7431E+03	2.3237E+05
	STD	9.1819E+02	3.8524E+04
DDAO	Best	2.2573E-01	9.9897E+02
	Worst	6.4277E+03	1.4620E+03
	Mean	5.7423E+02	1.0382E+03
	STD	1.0834E+03	8.9853E+01
BA	Best	1.2667E+04	5.4067E+04
	Worst	1.7947E+04	4.3425E+05
	Mean	1.4585E+04	1.8689E+05
	STD	1.3142E+03	7.7892E+04
TSA	Best	6.3653E+03	1.2015E+04
	Worst	1.4767E+04	5.2552E+04
	Mean	1.0217E+04	2.7948E+04
	STD	2.1618E+03	9.2913E+03
FO	Best	0.0000E+00	9.9890E+02
	Worst	0.0000E+00	9.9899E+02
	Mean	0.0000E+00	9.9896E+02
	STD	0.0000E+00	2.2892E-02

8. táblázat Nagyméretű optimalizációs feladat eredményei az F18 és F19 feladatokra

Algoritmus	Függvény	F18	F19
ALO	Best	1.9469E+01	9.8149E+03
	Worst	2.0307E+01	1.4948E+04
	Mean	1.9750E+01	1.1345E+04
	STD	2.4107E-01	1.4212E+03
BOA	Best	1.2957E-08	2.0416E-06
	Worst	6.1917E-07	5.9821E-04
	Mean	5.9824E-08	5.5767E-05
	STD	9.7536E-08	1.2535E-04
GWO	Best	9.1437E+00	6.8521E+02
	Worst	1.2941E+01	1.4847E+03
	Mean	1.0128E+01	9.7278E+02
	STD	9.8562E-01	1.8400E+02
PSO	Best	1.7001E+01	8.1418E+02
	Worst	1.7812E+01	1.0013E+03
	Mean	1.7356E+01	9.2068E+02
	STD	1.6680E-01	4.4017E+01
SCA	Best	7.0434E+00	2.0794E+03
	Worst	1.9671E+01	1.2949E+04
	Mean	1.6601E+01	8.3566E+03
	STD	3.2924E+00	2.5246E+03
DDAO	Best	2.4380E-02	1.3322E+00
	Worst	9.5690E+00	6.0214E+02
	Mean	3.3104E+00	8.4837E+01
	STD	2.1546E+00	1.5768E+02
BA	Best	1.9362E+01	1.0246E+04
	Worst	2.1148E+01	2.8739E+04
	Mean	2.0312E+01	1.7242E+04
	STD	4.7706E-01	4.9752E+03
TSA	Best	6.4128E+00	3.1366E+02
	Worst	1.2601E+01	3.3672E+03
	Mean	9.0431E+00	1.0870E+03
	STD	1.5954E+00	5.1949E+02
FO	Best	8.9617E-13	0.0000E+00
	Worst	2.4986E-07	7.2283E-07
	Mean	5.0366E-09	1.4257E-08
	STD	3.4971E-08	1.0120E-07

következő területeken: folytonosan differenciálható célfüggvények és nagyméretű optimalizálás. A FO algoritmus gyors és egyszerű, és képes hatékonyan átugorni a keresési tér lokális pontjait, és továbbléphet a globális ponthoz.

4. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A bemutatott kutató munka részben a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) támogatásával a K 134358 nyilvántartási számú projekt keretében valósul meg.

5. IRODALOM

- [1] H. N. Ghafil and K. Jármái, "Research and application of industrial robot manipulators in vehicle and automotive engineering, a survey," in *Vehicle and Automotive Engineering 2, Lecture Notes in Mechanical Engineering*, K. Jármái and B. Bolló, Eds, Springer, 2018, pp. 611–623.
- [2] H. N. Ghafil and A. H. Mohammed, "A virtual reality environment for 5-DOF robot manipulator based on XNA framework," *Int. J. Computer Appl.*, vol. 113, no. 3, pp. 33–37, 2015.
- [3] H. N. Ghafil and K. Jármái, "Kinematic-based structural optimization of robots," *Pollack Period.*, vol. 14, no. 3, pp. 213–222, 2019.

- [4] E. Figueiredo, M. Macedo, H. V. Siqueira, C. J. Santana, Jr, A. Gokhale, and C. J. A. Bastos-Filho, "Swarm intelligence for clustering- A systematic review with new perspectives on data mining," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 82, pp. 313–329, 2019.
- [5] P. Sulek and T. Kinczer, "Expert control system of shipping operation on the Gabcikovo project," *Pollack Period.*, vol. 14, no. 1, pp. 139–150, 2019.
- [6] S. Alsamia, D. S. Ibrahim, and H. N. Ghafil, "Optimization of drilling performance using various metaheuristics," *Pollack Period.*, vol. 16, no. 2, pp. 80–85, 2021.
- [7] H. Ghafil and K. Jármai, "Comparative study of particles warm optimization and artificial bee colony algorithms," in *Multiscience XXXII. MicroCAD International Multidisciplinary Scientific Conference*, Miskolc-Egyetemváros, Hungary, Sep. 5–6, 2018, pp. 1–6.
- [8] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey wolf optimizer," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 69, pp. 46–61, 2014.
- [9] J. J. Liang, B. Y. Qu, P. N. Suganthan, and Q. Chen, "Problem definitions and evaluation criteria for the CEC2015 competition on learning-based real-parameters in gle objective optimization," Tech. Rep. 201411A, Comput. Intell. Lab. Zhengzhou Univ. Zhengzhou China Nanyang Technol. Univ. Singapore, vol. 29, pp. 625–640, 2014.
- [10] S. Arunachalam, T. A. Bhomila, and M. R. Babu, "Hybrid particles warm optimization algorithm and firefly algorithm based combined economic and emission dispatch including valve point effect," in *International Conference on Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing, Swarm, volutionary, and Memetic Computing. SEMCCO 2014. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 8947, B. Panigrahi, P. Suganthan, and S. Das, Eds, Springer, 2014, pp. 647–660.
- [11] P. Kora and K. S. R. Krishna, "Hybrid firefly and particle swarm optimization algorithm for the detection of bundle branch block," *Int. J. Cardiovasc. Acad.*, vol. 2, no. 1, pp. 44–48, 2016.
- [12] I. B. Aydilek, "A hybrid firefly and particle swarm optimization algorithm for computationally expensive numerical problems," *Appl. Soft Comput.*, vol. 66, pp. 232–249, 2018.
- [13] S. Mirjalili, "The ant lion optimizer," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 83, pp. 80–98, 2015.
- [14] M. Pelikan, D. E. Goldberg, and E. Cant_u-Paz, "BOA: The Bayesian optimization algorithm," in *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference*, vol. 1, Orlando Florida, Jul. 13, 1999, pp. 525–532.
- [15] S. Mirjalili, "SCA: a sine cosine algorithm for solving optimization problems," *Knowledge-Based Syst.*, vol. 96, pp. 120–133, 2016.
- [16] H. N. Ghafil and K. Jármai, "Dynamic differential annealed optimization: New metaheuristic optimization algorithm for engineering applications," *Appl. Soft Comput.*, 2020, Paper no. 106392.
- [17] X. S. Yang, "A new metaheuristic bat-inspired algorithm," in *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization Studies in Computational Intelligence*, vol. 284, J. R. Gonz_alez, D. A. Pelta, C. Cruz, G. Terrazas, and N. Krasnogor, Eds, Berlin, Heidelberg: Springer, 2010, pp. 65–74.
- [18] S. Kaur, L. K. Awasthi, A. L. Sangal, and G. Dhiman, "Tunicate swarm algorithm: A new bio-inspired based metaheuristic paradigm for global optimization," *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 90, 2020, Paper no. 103541.

HIDEGALAKÍTÁSI PROBLÉMÁK, A LÖVEDÉKKÖPENY HÚZÁSI TECHNOLÓGIÁJÁBAN

COLD FORMING PROBLEMS IN BULLET METAL JACKET DRAWING TECHNOLOGY

Leitold András

ABSTRACT

The design of a projectile manufacturing technology used on an assembly machine belonging to a unique projectile construction is presented. The projectile, the most important component of the cartridge, ultimately carries the energy that needs to be delivered as accurately as possible. The characteristics of the projectile affect the properties of the cartridge.

- *projectile construction (full metal jacket, jacketed hollow point)*
- *bullet weight, uniformity*
- *the diameter of the projectile*
- *the thickness of the bullet casing*
- *inaccuracy of geometric dimensions*

Currently, the main goal of our development is to maintain the required shape and accuracy of the casing, all by creating the appropriate manufacturing technology steps. The uniformity of the thickness of the projectile sheath is very important because it affects the balance of the projectile. If the thickness of the projectile casing is not uniform, the projectile loses its optimal geometric shape, and such a projectile, leaving the barrel, begins a rotational motion, thus losing its irregular trajectory, thereby losing its accuracy.

1. BEVEZETÉS

A lövedékkonstrukciónk megválasztása elsősorban a felhasználási körülményektől függ. Az általunk gyártott lövedék célcsoportja, elsősorban versenylövék, céllövék. Az általuk használt lövedékek rendszerint teljes köpenyűek. A versenylövedékek főbb jellemzőihez tartozik, a nagyon szoros tűréshatár és az egyöntetűség. Kimagasló ballisztikai koefficiense miatt, röppályájuk lapos, szélérzékenységük kicsi. Ezek eredményeként, pontosságuk még nagy távolságon is kiváló. A prototípusgyártás megkezdéséhez, a 9x19 mm LUGER lőszer került kiválasztásra, amely minden valószínűséggel a világ leghíresebb és legnépszerűbb pisztolytölténye, annak ellenére, hogy a századforduló táján fejlesztették ki. A löszert 1902-ben George Luger tervezte, amely fejlesztési munka a Parabellum fedőnevet kapta. Az eredeti kifejezés Platontól ered, s így hangzik:

„Si vis pacem, para bellum”, magyar fordításban: „Ha békét akarsz, készülj a háborúra”. 1904-ben a haditengerészet, és ezt követően 1908-ban a német hadsereg hivatalos szolgálati fegyveréhez rendszeresített lőszer lett. Elsődleges fejlesztési céljuk az volt, hogy a .30 Luger (7,85mm) a híres Pistol – 08-nál egy sokkal erősebb töltényt, és fegyvert alkossanak. A történelem során, talán nincs még egy olyan katonai töltény, amelyet pisztolyokban, géppisztolyokban ilyen széles körben használtak volna. Népszerűsége pedig rohamosan nőtt, miután az amerikai fegyvertártók, elsősorban a Colt, és a Smith and Wesson elkezdte gyártani az 50-es évek elején. Ma nincs a világon olyan számottevő fegyver és lőszergyár, amely ne gyártaná ezt a kalibert. A katonai felhasználás mellett, ezen felül jelentős a sportcélú felhasználás is. Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy a világ „rendelkezésére áll” egy közel 100 éves múltú fegyver/töltény kombináció, amely szerte a világon rendkívüli népszerűségnek örvend mind civil, mind katonai területen. [1]

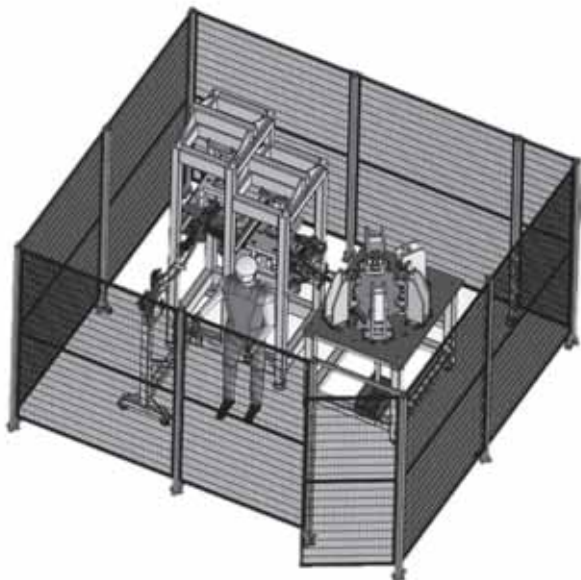
A lövedék, a töltény legfontosabb alkotóeleme, végezetül a lövedék hordozza azt az energiát, amelyet a lehető legnagyobb pontossággal célba kell juttatni. A lövedék nagyon sok jellemzője hat a töltény tulajdonságaira.

- a lövedék konstrukciója (teljes köpeny, üreges)
- a lövedéksúly, egyöntetűsége
- a lövedék átmérője
- a lövedékköpeny vastagsága
- a geometriai méretek pontatlansága

Jelenleg fejlesztésünk legfőbb célja, hogy a köpeny előírt alakhelyességét, valamint pontosságát betartsuk, mindezt a megfelelő gyártástechnológiai lépések létrehozásával. A lövedékköpeny vastagságának egyöntetűsége azért nagyon fontos, mert a lövedék egyensúlyára van hatással. Ha a lövedékköpeny vastagsága nem egyöntetű, akkor a lövedék elveszti optimális geometriai formáját, és az ilyen lövedék a fegyvercsövet elhagyva rotációs mozgásba kezd, nem szabályos röppályán halad, ezáltal elveszti pontosságát.

2. GYÁRTÓEGYSÉG KIALAKÍTÁSA

A lövedékgyártó berendezést, két alapegységre bontottuk szét. Az első a mélyhúzó egység, ami a köpeny többlépéses húzásáért felelős, a másik pedig a lövedék összeszerelő, amely folyamat végén készreszerelt lövedékek esnek ki a gépből. Első sorban, a lövedékszerelő egység kiszolgálásáért felelős köpenygyártó aegységet tervezzük meg. Az alábbi képen (1.kép) a gyártóberendezés látható.



1. kép Gyártóberendezés

A gép konstrukcióját a hidegalakító szerszámok fogják meghatározni. A technológia lépéseinek létrehozása előtt definiáltunk pár alapkövetelményt, amit a gép tervezése során maximálisan figyelembe vettünk. Többek között, hogy ne kelljen kezelni félgyártmányokat, műszak végére ne legyenek félkész termékek; csak az ólommag és a rézköpeny hidegalakításához szükséges szalag. Ennek az eljárásrendnek és gyártási technológiának nem kell raktározni a félgyártmányainkat. Fontos elkerülni a húzott darabok lágyítását, pácolását, illetve tisztítását. Gyakorlatban, az egyes húzási lépcsők között, az anyagban keményedés lép fel, alakítási ellenállása nő. Ha ez eléri a szakítószilárdságot, akkor szakadás, repedés következik be. A ridegedés megszüntetése, valamint az anyag normalizálása és feszültségmentesítése céljából hőkezelik. Lágyításkor a felület oxidálódik, azon reve képződik, amely a pácolással távolítható el. Utána a darabokat hideg, majd forró vízben öblítik és fűrészporban szárítják. [2][3] Ezek a folyamatok jelentősen bonyolítják és drágítják a gyártást. Kezdeként összeszedtük azokat a lépéseket, amelyek különböző kiinduló anyagokból való sajtoláskor szükségesek. Amennyiben kiinduló alapanyagunk a szalag, akkor alábbi lépésekkel kell számolnunk.:

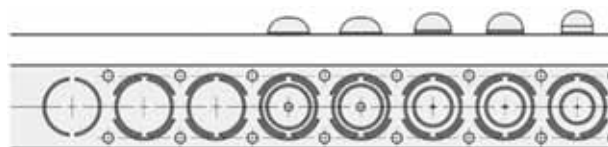
- lecsévézés tekercsből

- egyengetés
- tisztítás
- kenés
- adagolás a szerszámhoz
- elhelyezés ellenőrzése
- többlépéses sajtolás

A félkésztermékekkel az alábbi lépések járnak.:

- beöntés tartályba/berakás tárba
- adagolás fészekbe
- megfogás
- behelyezés a megfelelő helyre
- fészkek közötti átadás (műveletek közötti mozgatás)
- lemezek sorozatsajtolása

A folyamat során két szerszám konstrukció elképzelés közül kell választanunk, ami alapvetően befolyásolni fogja a műveleti sorrendet. Az egyik lehetőség egy transzfer szerszámsor, ami vágó-húzó és egyes húzású szerszámokból áll. A másik lehetőség pedig ez oellett sávós, sávfelszabadításos szerszám/eljárás. Kis méretű húzott darabokat 5mm végső átmérőig oellett eljárással, nagyobbakat 5-30 milliméterig gyakrabban bevágó eljárással készítenek. Mivel a sáv szélességét jóval nagyobbra kell választani, mint amennyire húzott darabhoz szükség volna, ezért ez a művelet nagyobb alapanyag felhasználással jár. A terítéket, a két oldalán keskeny híd köti össze a szalagsávval, így a húzandó teríték a szalagban marad. A húzás folyamán a hidak is elmozdulhatnak, miközben a szalag szélessége is csökken [5] Az alábbi képen (2.kép) egy sávfelszabadításos sávterv látható.

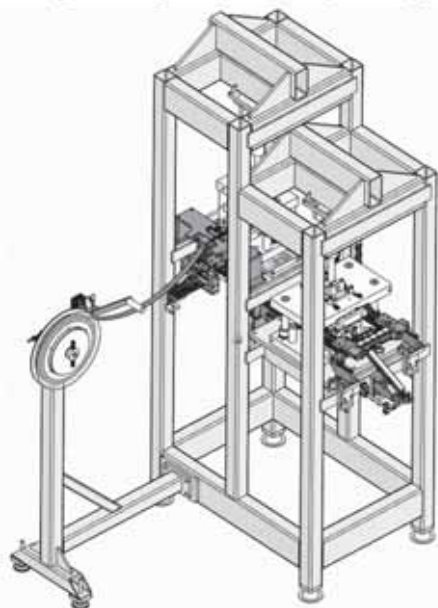


2. kép Sávfelszabadításos sávterv

A rendelkezésre álló információk alapján feltételeztük, hogy a lövedék geometria kialakításánál még problémákba ütközhetünk. Ezért a technológiai lépéseket, először egy külön erre a célra létrehozott prototípus szerszámokban próbáltuk ki. Ahhoz, hogy ezeket a szerszámokat, és technológiát egyszerűen és nagyobb átalakítások nélkül implementálni tudjuk, a transzfer szerszámok használata mellett döntöttünk, így a szerszámház, és a húzási fokozatokhoz tartozó alakítóelemeket is fel tudjuk használni.

3. MÉLYHÚZÓ EGYSÉG

Az alábbi képen (3.kép) látható a mélyhúzó egység



3. ábra Mélyhúzó egység

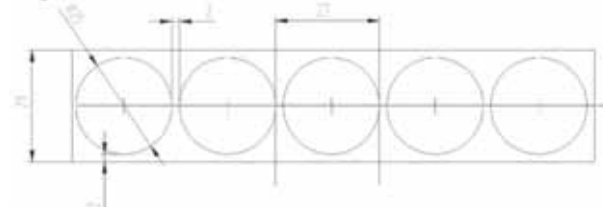
Első lépésként a szerszámhoz kell eljuttatnunk a szalagot. Tervezés közben a lemez alapanyag felhasználáshoz illeszkedő lépéseket vettük sorra. A lecsévélést, az előtolást, kenést, illetve a szerszámhoz adagolást egy egységbe építve terveztük meg, egyengetést, tisztítást nem alkalmazunk. Teljesítményt növelni, illetve selejtet csökkenteni úgy lehet, ha a kenőanyag megválasztásával egyidejűleg figyelembe vesszük a szerszámkonstrukciót, a húzósebességet, a lemezzel szemben támasztott követelményeket, annak szilárdságát, nyúlását, összetételét és felületkezelését, végül a kenőanyag fizikai és vegyi tulajdonságait. A kenőanyagoknak, a szerszám és a munkadarab között kell elválasztó csúszóréteget alkotni, amely a szerszám és a munkadarab közötti közvetlen érintkezést meggátolja, továbbá az egymáson csúszó felületek súrlódási ellenállását csökkenti. Ezzel a technológiával elkerülhető a berágódás, a megszakadás és a feltapadás. A választásunk egy növényi, polimer alapú folyékony kenőanyagra esett, amely a következő tulajdonságokkal rendelkezik: alacsony viszkozitású, jelentős mértékben csökkenti a súrlódást, így növelve a szerszám élettartamát és alkalmas minimálkenésre.

A hatékonyság érdekében beépítettünk egy permetező minimálkenő rendszert, amellyel a kenőanyagot – szabályozott nyomás mellett – továbbítja a tartályból a fúvókához. A koordinálási lehetőségekkel beállítható a permetsugár hossza és szórásképe. A megkent szalag tovább halad az első szerszámunk felé, ami egy együttes körbevágó-húzó szerszám. Innen a félgyártmányt, vákuum segítségével lefelé eltávolítjuk a szerszámából és a transzfer egység, a félgyártmányok adagolását segítő

szintre hozzuk le. A megfogó elveszi a félgyártmányt és előtolás irányában lép egyet a sorozatszám irányába. A transzfer megfogók előtolása ugyanakkora, mint a sorozatszámokban lévő alakító állomások egymástól elhelyezett távolsága. Szükség esetén lehetőségünk van még egy kenő egységet beépíteni erre a szakaszra. A sorozatszám minden művelet után kiemeli a félgyártmányokat a transzfer egység szintjére. Miután megtörténik az utolsó alakítás, egy csúszdán leengedjük a köpenyt, amely így eljut a lövedékszerelő gép első állomásáig, ahol egy ülékbe kerül. Ezen az állomáson történik meg az ólommag beültetése, a köpeny körbevágása és peremezése, majd végül a lövedék kaliberezése.

3.1. Első kísérlet

A kezelhetőség – továbbá a félgyártmány kezelése – miatt, egysoros sávtervet hoztunk létre, amelyhez szükség volt a teríték meghatározására. Először a készterméket vizsgáljuk meg, valamint a későbbiekben azt is meghatározzuk, hogy milyen munkálatok lesznek a köpenyünkkel. Az előbb ismertetett okok miatt, a köpenyt egy szoknyarésszel bővítettük ki. A lövedék összeszerelésnél ez a szoknya rész tartja bent a köpeny és a belesajtolt lövedéket az ülékbe. Ezen felül erre a megoldásra, a továbbítás közben felmerülő hibák kivédésének érdekében – mint például a hidegalakító állomásaiban megbillen a félgyártmány – szükség van. A peremezéshez egy vágott élre van szükségünk, hogy méretben is megfelelő legyen. Amint a teríték rendelkezésre áll, a szükséges hídszélességek alkalmazásával létrehozuk a sávtervet. Az alábbi képen (4.kép), a sávterv látható



4. kép Sávterv

A technológia kiindulópontja tehát egy sík lemez, amelyet anyagszétválasztás nélkül üreges testé alakítunk. Az edény külső alakjának megfelelő húzógyűrűn a termék belső méretének megfelelő bélyeggel nyomjuk át az anyagot. A húzás folyamán anyagáramlás indul, az anyag megvastagszik, vagy roncsolódni igyekszik. A húzó, zömítő, hajlító igénybevételek mellett az anyagáramlás csak úgy jöhet létre, ha az igénybevétel meghaladja az anyag folyási határát. A ráncgátló alkalmazásával, a falvastagság növekedést bizonyos mértékben szabályozni lehet. [5]

A húzási fokozatokra csak gyakorlati adatok állnak rendelkezésünkre.

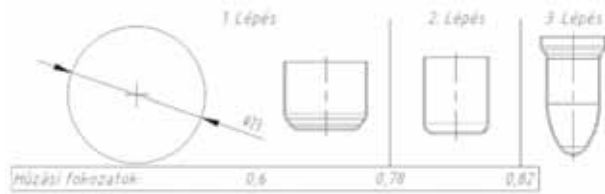
Elméleti számítása nehéz, mert sok tényező befolyásolja [3].:

- munkadarab anyagminősége
- munkadarab anyagának szerkezete
- lemez vastagsága
- szerszám anyaga és kenése
- húzórés nagysága
- húzóbélyeg és húzógyűrű nagysága
- munkadarab alakja

A szerszám tervezés lépései:

- húzási fokozatok számítása.
- mélyhúzóres meghatározása
- húzógyűrűk és a bélyeg lekerekítésének meghatározása
- első húzáshoz szükséges ráncgátló erő nagysága
- húzáshoz szükséges erő
- húzógyűrűk, húzótüskék méretezése
- húzóres tőrése

Az alábbi képen (5.kép), az első technológiai sorrendterv található.



5.kép Első technológiai sorrend

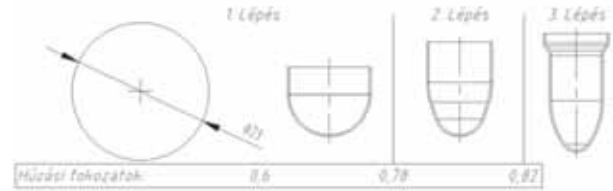
Az együttes húzó-kivágó szerszámnál (1.lépés) terítékvágással és a második húzásnál, a próbák során nem volt selejtes félgyártmány. A harmadik lépésnél, a harmadik átmérő redukálásánál, a lövedék hegyénél található geometria (ovigál) kialakítása közben a köpeny elszakadt. Így elkezdünk tovább gondolni a sorrendendet. A lépés számot nem szerettük volna növelni. Az alábbi képen (6.kép) látható a prototípus szerszámban legyártott lépések.



6.kép Prototípus minták, az első technológiai sorrendből

3.2. Második kísérlet

A második technológiai sorrendtervünk alapján, már az első lépéstől beletartuk félgyártmányunk aljába a problémás geometriai forma kialakításához szükséges anyagmennyiséget, hogy ott, már csak alakra kelljen formázni. Az átmérő redukálása -a lépésszám megtartása miatt- minden lépésben benne maradt. A módosított technológiai sorrendterv, az alábbi képen (7.kép) látható.



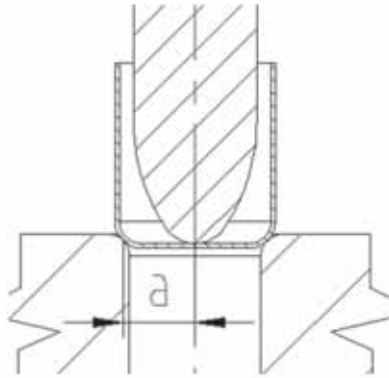
7.kép Második technológiai sorrend

Ebben az esetben a második lépésnél elszakadt a köpenyünk. Megpróbáltunk a ráncgátló nélküli mélyhúzásoknál használt kúpos és tratrixgyűrűket alkalmazni. Bár a folyamatunkon segített, de az utolsó lépésben a köpeny továbbra is szakadt. A teszt eredményei, az alábbi képen (8.kép) láthatóak.



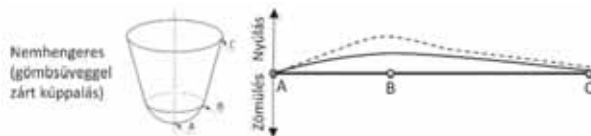
8.kép Prototípus minták, a második technológiai sorrendből

Az csúcs kialakításakor, húzásakor a bélyeg nem érint nagy alakítást gátló felületet. Először a félgyártmányt csak középen érinti, ahol igen kis felületen, a lemez és a bélyegfelület között lép fel súrlódás, ami az alakítást gátolja. Az alábbi ábrán (1.ábra) „a” szélességen belül, az érintetlen lemez gátlás nélkül nyúlhat és ráncok képződhetnek. Ez okozhatja a szakadást esetünkben is.



1.ábra Továbbhúzás

A bélyeg további lefelé haladásakor az „a” szakasz szélessége csökken. A ábrán továbbá látható a húzógyűrű, bélyeg és a félgyártmányunk. Nem messze a fenék közepétől, illetve a félgömb alak legalsó pontjától kezdődően az anyag minden irányban nyúlik. Az alábbi képen (9 kép) láthatóak a nemhengeres test nyúlási viszonyai [2] A számottevő sugárirányú nyúlás mellett megfigyelhető kisebb mértékű érintőirányú nyúlás is, ami „B” -nél a legnagyobb. Innen kezdve csökken és a palást szélé felé negatív lesz, ami nyúlással ellentétben, zömítő igénybevételnek felel meg. [2]

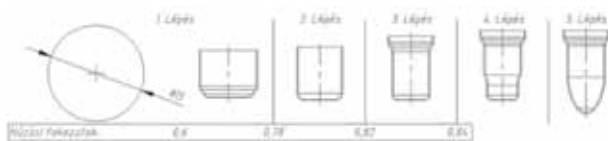


9.kép Nemhengeres test nyúlási viszonyai

Rá kellett jönnünk, hogy nem fog működni az átmérő redukálás és alakra formálás egy technológiai lépésben.

3.3. Harmadik kísérlet

Az alábbi képen (10.kép) látható, az eddigi tapasztalatok alapján módosított technológiai lépéseink.



10.kép Harmadik technológiai sorrend

A technológia szétszedése és a lépésszám növelése sikerrel járt, hiszen a köpeny elérte a kívánt geometriát. A negyedik lépéssel továbbra is az volt a cél, hogy bevigyük az csúcs kialakításához szükséges anyagmennyiséget. Az utolsó lépésben már nem történt átmérő csökkentés, csak alakítás. A prototípus szerszámba épített tesztek után megtervezhettük a végleges szerszámkonstrukciókat.

Az alábbi képen (11. kép) láthatóak, a véglegesített szerszámban elkészített lépések.



11.kép Véglegesített szerszámból kiesett darabok

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A mélyhúzáskor fellépő hibák rendszerint nem önmagukban, hanem összetetten jelentkeznek, így ezek kiküszöböléséhez is több hibát kell javítani. A fellépő hibák lehetnek:

- szerszámhibák
- anyaghibák
- technológiai hibák

A húzáskor képződő selejt egyik leggyakrabban előforduló oka, a húzások nem megfelelő lépcsőzése, tehát hibák a munka előkészítésében. A továbbhúzások megtakarítása, illetve a húzások számának csökkentése érdekében az anyagnak sokszor túlzott jelentőséget tulajdonítanak. A húzások messzemenő csökkentése a megtakarításhoz jelentősen hozzájárul különösen, ha drága a szerszám. Egy húzási fokozatnak a megtakarítása igencsak jelentős, ezáltal megtérülhet a jól mélyhúzható lemez költsége. A lépcsőzés nemcsak technológia, hanem gazdasági kérdés is. [3][4]

A felmerülő technológiai problémák miatt, fontos volt a próbaszerszám elkészítése is. Az eddigi kísérletek alapján sokkal gazdaságosabb és gyorsabb lenne egy sávfelszabadító technológiával működő szerszám, ezzel együtt a lövedék összeszerelő ciklusideje is jobb lenne.

6. IRODALOM

- [1] Székely Dénes, A lőpor és a töltény. Tradeorg Nyomda Kft., Fűzfőgyártelep, 2000
- [2] Oehler (Kaiser) Vágó-, sajtoló-, és húzószerszámok. Magyar Könyvkiadó, Budapest, 1971
- [3] Hack Emil, Jaszovszky Sándor, Smóling Kálmán, Szerszámkészítés. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1976
- [4] T.Golatowski, Lemezek sorozatsajtolása. Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1977
- [5] Jáki Imre, Szerszámok és készülékek gyártása. Nemzeti Munkaügyi Hivatal Szak- és Felnőttképzési Igazgatóság, Budapest, 2014

VOC SZELEPSZÁR TÖMÍTÉS TESZTPAD

VOC VALVE STEM SEALING TEST BENCH

*Behofsits Antal**

ABSTRACT

There is a lot of application, where it is indispensable to know that the valve is properly seal, and no harmful materials can get outside of the system. The Szelenca KFT had a chance by an application to build a test bench, which can analyze different valve stem's sealing. In the following I will present you our product.

hagyományos hidraulika olajjal, a másik a tesztközeggel, ami estünkben alkohol.

A hidraulikus rendszerek elemei kiválasztásánál fontos szempont volt a műszaki megfelelésen túlmenően a könnyű beszerezhetőség, az ipari szabványoknak való megfelelés, illetve a bontható beépíthetőség.

1. BEVEZETÉS

A Szelenca KFT. elnyert egy kutatás – fejlesztési pályázatot, amelynek tárgya a „VOC (illékony szerves vegyületek) szivárgás csökkentése speciális tömítésteztelés útján”. A projekt során olyan tesztpad kifejlesztésére került sor, aminek segítségével valós üzemelési környezethez közelálló paraméterek (közeg, nyomás, hőmérséklet) mellett lehet vizsgálni a szelepszárak VOC szivárgását.

A kutatás-fejlesztési projekt kivitelezése során, a végső mérőpad elkészülését több prototípus előzte meg.

2. A BERENDEZÉS RÉSZEI

A berendezés három fő részre bontható:

- Váz, szerelvény beszorító, mozgató szerkezet
- Mérőfolyadék nyomásrendszer
- Elektronikus mérő és adatgyűjtő rendszer

A szelepszár tömítés szivárgás tesztpad végleges elrendezése a képen látható. A befogó szerkezet és a meghajtás körül található a berendezés tartószerkezete. A szerkezetet körben 10mm vastag burkolat, előlről pedig kétszárnyú plexi ajtó zárja el a kezelőtől, így a mozgó alkatrészek elleni védelem biztosított.

3. HIDRAULIKUS RENDSZEREK

A tesztpad két különböző hidraulikus rendszerrel rendelkezik. Az első a tesztközeg szállítására, tárolására, és a tesztekhez szükséges nyomás kialakítására szolgál, a másik a vizsgálandó szelep gyors befogására szolgáló befogó karimák összeszorítását végzi. A két rendszer egymástól független, eltérő közeggel működik. Az összeszorító hidraulika



1.Kép: A kész berendezés

4. MÉRÉS ISMERTETÉSE

A vizsgálni kívánt szerelvény befogása két vízszintes lemez közé szerelt függőleges támasztó fal között történik. A támasztó falra egyik oldalon az előfeszítést biztosító hidraulikus munkahenger, a másik oldalon pedig az előfeszítés ellenőrzésére tervezett erőmérő cella van felszerelve. A munkahenger egyik oldalról az ellenkarimán keresztül nyomja a szelepet a másik ellenkarimára, ami az erőmérő cellára támaszkodik. A szelep és az ellenkarimák közti tömítést rugalmas lapostömítések biztosítják. Az ellenkarima az alsó vízszintes lemezre szerelt lineáris vezetékeken szabadon fut. Ennek köszönhetően a tesztberendezés DN200-as méretig képes a szerelvények befogására.

A szelepek sokfélesége miatt a meghajtás úgy lett megtervezve, hogy az orsó-kézikerék-hajtás kapcsolat

* Gépészmérnök, Szelenca KFT.

függőleges és vízszintes irányban két szabadságfokban mozgatható legyen. A hajtómű a kereten egy lineáris elmozdulást megengedő vezetéken került elhelyezésre. A lineáris vezeték és a hajtómű közé egy hegesztett tartó konzol került. A hajtómű frekvenciaváltó segítségével kézi és gépi működtetést is képes szimulálni.

A tesztberendezésben az alábbi állapotjelzők mérésére szolgáló műszerek kaptak helyet: Nyomásmérő; Erőmérő cella; Hőmérséklet mérő szenzorok.

A szerelvények fűtéséről három darab, egyenként 200W-os teljesítményű fűtőbetét gondoskodik.

A berendezés fő célja a szivárgás mérése. Ez koncentrációmérésből származtatható. A tesztközeg az API szabványok által javasolt metán veszélyessége miatt etanol.

A térfogatáramból és a koncentrációból egyszerűen és pontosan számítható a szivárgási ráta. A módszer pontossága a koncentrációmérő műszer pontosságától függ, azzal egy nagyságrendbe esik. A VOC koncentráció és a szivárgási ráta összekapcsolására több módszer is létezik. Az egyik lehetőség az LDAR (Leak Detection and Repair) programok nagy részében használt, az Egyesült Államok Környezetvédelmi Ügynöksége (EPA) által kidolgozott 21-es módszer (Method 21 [8]), és az ahhoz kapcsolódó korrelációs megközelítés. A módszer a pontforrások körüli koncentráció mérésén alapul. A koncentráció és a szivárgási ráta közötti összefüggést leíró korrelációs egyenlet összes paramétere a pontforrás típusának a függvénye. A korrelációs számítás módját itthon az MSZ EN 15446:2008 [6] szabvány írja elő. A 2007. november 30-án jóváhagyott Európai Szabvány szerint a korreláció a vizsgálati értékek és az emissziós értékek között leírható a következőképpen:

$$ER = A (SV)^B$$

Ahol:

- ER: emissziós érték

- SV: vizsgálati érték

- Az „A” és a „B” értékeket az alábbi táblázat adja meg.

A táblázat a műszer méréshatárának megfelelő max. értékeket is tartalmazza, továbbá az átlagos emissziós faktort [kg/h] az US EPA alapján. Az átlagos emissziós faktor az a hibaérték, amivel számolhatunk, abban az esetben, ha a mérés nem lehetséges. Üzemi LDAR programokban rendszerint a fenti korrelációs módszert alkalmazzák.

Az állandó mintavételről egy membránszivattyú gondoskodik. A minta áthalad a katalitikus szenzoron, aminek a jelét egy jelátalakító elektronika küldi tovább

a PLC-nek. A távadó 0-10.000 ppm etanolra került kalibrálásra.

A szivárgási rátát a mintavételi adatokból számítottuk, figyelembe véve a feltételezett atmoszférikus nyomást zárt térben, a térfogatot, a közeg móltömegét, a koncentráció növekedését és a zárt tér hőmérsékletét.

A vezérlő program a Siemens Totally Integrated Automation Portal v13 (TIA Portal) szoftverével készült el. A TIA Portal natívan kezeli az összes STEP7 PLC-t és modult, amit használ a gép, valamint tartalmazza a WinCC-t, amivel a megjelenítő képernyőket (HMI – Human Machine Interface) hozza létre. Az adatok rögzítése a WinCC szoftveren belül történik. Az adatok naplózása a mérés indításával egyidejűleg indul.

A szoftver az alábbi változókat méri:

- Ciklusok száma
- Tesztközeg nyomás
- Tömszelence ház hőmérséklet
- Előfeszítés, azaz a hidraulikus nyomásérték a megfelelő karimalezáráshoz

A HMI-n a nyitás-zárás ciklusszám, és a hőmérsékleti ciklus beállítását követően a tesztelés automatikus. Az adatokat a berendezés naplózza egy megadott hálózati elérési útvonalra. A szivárgási határérték elérésekor a mérés megáll, majd a tömszelence lehúzását követően kézi indítással folytatható.

Az adatok kiértékelését követően jegyzőkönyvet készít belőle a software.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Egy megfelelően kiválasztott szelep nagymértékben befolyásolhatja a kibocsátási szinteket, a környezetvédelmi teljesítményt és a költségeket. Jó adatok hiányában a végfelhasználó csak találgathat, hogy a szelep hogyan is fog hosszú távon, számos ciklust követően, nagy igénybevétel mellett működni az üzemi állapotban. Ha a felhasználók olyan tesztelést igényelnének, amelyek kiemelhetik az egyes gyártók egyes termékei közötti VOC-teljesítménybeli különbségeket, az új igényeket kielégítve jobban törekednének a megfelelő tömítésrendszer kiválasztására. A VOC kibocsátás a mai technológiával jelentősen csökkenthető lenne, egészen addig a pontig, ahol szinte minden szelep meg tudna felelni.

Forrás	Közeg	A	B	Max. érték, 10.000 ppm	Max. érték, 100.000 ppm	Átlagos emissziós faktor
Szelep	Gáz	2,29 x 10 ⁻⁶	0,746	0,064	0,140	0,0268
Szelep	Könnyű folyadék	2,29 x 10 ⁻⁶	0,746	0,064	0,140	0,0109
Szivattyútömítés	Bármilyen	5,03 x 10 ⁻⁵	0,610	0,074	0,160	0,114
Csatlakozó	Bármilyen	1,53 x 10 ⁻⁶	0,735	0,028	0,030	0,00025
Perem	Bármilyen	4,61 x 10 ⁻⁶	0,703	0,085	0,084	0,00025
Nyitott vég	Bármilyen	2,20 x 10 ⁻⁶	0,704	0,030	0,079	0,0023
Egyéb	Bármilyen	1,36 x 10 ⁻⁵	0,589	0,073	0,110	változó

6. SUMMARY

A properly chosen valve can significantly reduce the emission level. It is also more budget friendly option. Without proper data, it is almost impossible to predict the long term behaviour of the valve stem's sealing.

With this test bench we are capable of making a comparison between multiple sealing solutions, so we can give the customer which suits him the best.

7. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A KFI-16_1-2016-0149 számú projekt a Nemzeti és Innovációs Alapból biztosított támogatással, a VÁLLALATOK K+F+I TEVÉKENYSÉGÉNEK TÁMOGATÁSA pályázati program finanszírozásában valósult meg.



8. IRODALOM

- [1] Method 21 8/3/2017 1 – US EPA
- [2] MSZ EN 15446:2008 [6]

JEGYZET

A series of 35 horizontal dotted lines for taking notes.

JEGYZET

Dotted lines for writing content.

CONTENTS

1. INVESTIGATION OF TUMBLE RATIO IN TWO DIFFERENT ENGINE VALVE CONSTRUCTIONS

László Kovács, Dr. Szilárd Szabó, Dr. Betti Bolló5

To underline the superior parameters of the newly designed valve system comparative numerical simulations were conducted in order to define the tumbling action inside the cylinder using poppet valve and Swinging Valve arrangements. Keeping the flow parameters identical results showed marked improvements in the tumbling action which is a prerequisite of successful employment of the extra lean working principle in stratified charging engines.

2. HEAT PUMP IN THE FUTURE

Gábor Hornyák, Péter Bozsay11

Heat pump systems offer economical alternatives for recovering heat from a variety of sources for a range of industrial, commercial and residential applications. Improving the performance, reliability and environmental impact of heat pumps is an ongoing challenge for professionals. This article describes recent advances in heat pump systems, their implementation and application, and their potential and benefits.

3. OPTIMIZATION OF TRANSMISSION LINE TOWER WITH EVOLUTIONARY AND FEM TECHNIQS

Nagy Szilárd, Dr. Károly Jármái, Dr. Attila Baksa17

The optimization of the pylon is shown in this paper. The optimization is made by using flower pollination algorithm. The objective function is mass of the structure. The design constraints are static stress, local buckling and buckling. The unknowns are the typical dimensions of the circular hollow section truss. Parametric inspections have been made changing yield strength of material and the number of grid divisions. The results show that the use of higher yield strength steels, do not imply a lighter structure.

4. OPTIMAL DESIGN OF FRAME STRUCTURES FOR DIFFERENT LOADS

Dr. Máté Petrik, Dr. Károly Jármái24

This paper deals with the optimal sizing of frame structures with rigid corner connections. The optimization has been carried out with different loads, but in comparable load ranges, where the optimization objective function is the minimum steel mass. The results show that for beams subjected to bending, higher strength steels, require smaller cross-sectional areas, but for beams subjected to compression, due to the phenomenon of buckling, the steel grades investigated require practically the same geometric dimensions.

5. THEORETICAL BACKGROUND OF THE COMPOSITE HELICOPTER FLOOR OPTIMISATION

Dr. Alaa Al-Fatlawi, Dr. Károly Jármái and

Dr. György Kovács30

The research objective was to design a novel optimization approach for a helicopter floor made entirely of FRP composite material. The optimization process involved examining 46 distinct layer combinations of four different FRP layers (woven glass fiber with phenolic resin; woven glass fiber with epoxy resin; woven carbon fiber with epoxy resin; hybrid composite) and four different FRP honeycomb core structural elements. The face sheets were constructed using a variety of different layer counts and fiber orientations including cross-laminated, angled, and multidirectional.

6. CASE STUDY FOR THE OPTIMIZATION OF COMPOSITE HELICOPTER FLOOR

Dr. Alaa Al-Fatlawi, Dr. Károly Jármái and

Dr. György Kovács38

The optimization procedure of a composite floor system has been shown. Nine design constraints have been considered: deflection; face stress (bending load, end load); stiffness; flexure; core shear stress; shell buckling; in-cell buckling; and shear buckling. The single-objective weight optimization problem was solved using Matlab's Interior Point Technique, Excel Solver's nonlinear Generalized Reduced Gradient (GRG) algorithm, and Laminator software. The numerical simulation of ideal sandwich plates was shown using the Digimat-HC program. The totally FRP composite sandwich structure optimization has been shown through a case study.

7. DEPENDENCE OF EIGENVALUES ON PARAMETER CHANGES OF OPTIMIZED STIFFENED PLATES

Dr. Zoltán Virág, Dr. Sándor Szirbik43

This paper deals with the modal analysis and buckling stability of stiffened plates under longitudinal compression with simple supported conditions. The effect of stiffener damage caused by corrosion can be investigated in FE models of the optimized stiffed plate structure. The buckling shape modes for damaged structures can be compared with the damaged-free ones so that the changes in load capacity can be predicted. The eigenfrequencies show noticeable differences when the modulus of elasticity is changed. Therefore, it is important that the structure is properly designed and made from proper materials.

8. TESTING A FERTILIZATION OPTIMIZATION ALGORITHM IN THE CEC2015 ENVIRONMENT AND APPLYING IT TO LARGE-SCALE PROBLEMS

Hazim Nasir Ghafil, Shaymaa Alsamia and

Dr. Károly Jármái47

This paper presents the fertilization optimization algorithm, a new optimization method based on Levy's flight and random search in a search space. In CEC2015, the algorithm's performance was compared to that of other optimization algorithms using time-consuming benchmarks and large-scale optimization problems. The fertilization optimization algorithm outperformed other optimization algorithms in many cases.

9. COLD FORMING PROBLEMS IN BULLET METAL JACKET DRAWING TECHNOLOGY

Leitold András55

The design of a projectile manufacturing technology used on an assembly machine belonging to a unique projectile construction is presented. The projectile, the most important component of the cartridge, ultimately carries the energy that needs to be delivered as accurately as possible. Deep-drawing errors usually do not occur on their own but in a complex way, so more errors need to be fixed to correct them.

10. VOC VALVE STEM SEALING TEST BENCH

Behofsits Antal60

Szelence Ltd. won a research and development tender for the reduction of VOC (volatile organic compound) leakage through special seal testing. During the project, a test bench was developed, which can be used to examine the VOC leakage of the valve stems under parameters close to the real operating environment (medium, pressure, temperature). During the implementation of the research and development project, the completion of the final measuring bench was preceded by several prototypes.

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. Jármái Károly

Dr. Péter József

Dr. Szabó Szilárd

Deputy

Dr. Barkóczy István

Bányai Zoltán

Dr. Beke János

Dr. Bukoveczky György

Dr. Czitán Gábor

Dr. Danyi József

Dr. Gáti József

Dr. Horváth Sándor

Dr. Illés Béla

Dr. Kalmár Ferenc

Dr. Orbán Ferenc

Dr. Pálinkás István

Dr. Patkó Gyula

Dr. Péter László

Dr. Penninger Antal

Dr. Szabó István

Dr. Szántó Jenő

Dr. Szűcs Edit

Dr. Tímár Imre

Dr. Tóth László

DEAR READER,

Research is being carried out at the University of Miskolc in the framework of the 4th Centre of Excellence on **Innovative Automotive, Energy and Mechanical Engineering Design and Technologies**. The Centre aims to develop research potential through research that implements innovative modelling, design and technological processes, in line with the European Union's ambition to stimulate innovation and the application and development of the most efficient environmentally friendly technologies. The Centre of Excellence aims to develop and extend the results achieved. A collection of articles from colleagues associated with the Scientific Groups on Experimental and Numerical Studies in Fluid Mechanics and Thermal Engineering and on Optimal Design of Engineering Structures and Frames is published in this issue.

In 2016, the University of Miskolc launched a new course in automotive engineering, which has created new challenges. New PhD students, some of whom came to us under the Stipendium Hungaricum, have also given a boost in certain areas. We intend to present these new directions and results partly also in this issue of the journal.

Most of the articles are related to the departments of the Institute of Energy Engineering and Chemical Machinery. The technical spectrum is very broad: power engineering, valves, heat pumps, honeycomb vehicle panels, stiffened plates, frame structures, lattice supports, optimization algorithms.

The research work described in the articles was partly carried out as part of the EFOP-3.6.1-16-2016-00011 project "University of Youth and Innovation - Innovative Knowledge City - Institutional Development of the University of Miskolc for Smart Specialisation" - in the framework of Széchenyi 2020 - with the support of the European Union and co-financed by the European Social Fund. This issue of the journal also serves this objective, to ensure that the doctoral process of pre-doctoral students preparing to graduate is successful.

The last two articles are not part of the publication output of the Center of Excellence of the University of Miskolc.

Prof. Dr. Károly Jármái
leader of the Center of Excellence

Managing Editor: Vesza József. Editor's address: 3534 Miskolc, Szervezet utca 67.

Phone: +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Published by the Scientific Society of Mechanical Engineering, 1147 Budapest, Czobor u. 68., Postal address: 1371, Bp, Pf. 433

Phone: +36-1/202-0656, Fax: +36-1/202-0252, E-mail: mail@gteportal.eu, Web: www.gteportal.eu

Web: http://www.gepujsag.hu * Kereskedelmi és Hitelbank: 10200830-32310236-00000000

Publisher: Dr. Bárdos Krisztina, Managing Director

Gazdász Nyomda Kft. 3534 Miskolc, Szervezet u. 67. Phone: +36-30/9-450-270 • e-mail: mail@gepujsag.hu

Distributed to subscribers by Magyar Posta Zrt, Postal address: 1900 Budapest

Subscription: subscription can be ordered at any Hungarian post office, from postmen, from the link: www.posta.hu WEBSHOP (https://eshop.posta.hu/storefront/), via e-mail: hirlapelofizetes@posta.hu, by phone: +36-1/767-8262, or mail to: MP Zrt. 1900 Budapest

Subscription: subscription can be ordered from overseas and to overseas at Batthyány Kultur-Press Kft., H-1013 Budapest, Attila út 2/A/III/14.

T: +36 1 201 88 91, +36 1 212 53 03, E-mail: batthyany@kultur-press.hu

Domestic subscription prices are: HUF 1,260 a single copy and HUF 2,520 a double copy.

INDEX: 25 343 ISSN 0016-8572

The published articles have been reviewed.

The publication is supported by the National Cultural Fund of Hungary

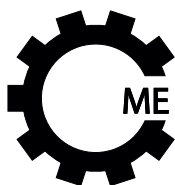


Az ExNB
Tanúsító Intézet és
a Miskolci Egyetem együttműködésével:



www.dustlab.eu

Kutató- és vizsgáló laboratórium porok, gázok,
gőzök, hibrid keverékek potenciális robbanási
tulajdonságainak vizsgálatára



GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR **ME-GÉIK**

A Gépészmérnöki és Informatikai Kar országosan elismert, vezető szerepet tölt be a műszaki- és informatikai képzési területen.

A kar kiemelt célja, hogy gyakorlatorientált képzést és versenyképes tudást biztosítson hallgatóinak. Mind a műszaki, mind az informatikai képzéseket magas szakmai színvonal jellemzi.

A kar majd minden alap- és mesterképzési szakján lehetőség van duális képzésben történő részvételre is, melynek nagy előnye, hogy a hallgatók párhuzamosan részesülnek egyetemi oktatásban és tesznek szert komoly szakmai gyakorlatra.

TÖBB MINT 2500 HALLGATÓ | **TÖBB MINT 100 DUÁLIS PARTNER** | **65 LABORATÓRIUM** | **38 SPECIALIZÁCIÓ** | **7 SZAKIRÁNYÚ TOVÁBBKÉPZÉSI SZAK** | **12 ALAPSZAK** | **11 INTÉZET** | **6 MESTERSZAK** | **2 DOKTORI ISKOLA**

