

A Miskolci Egyetem Habilitációs Füzetei

Műszaki-természettudományi Habilitációs Bizottság

Fémszerkezetek optimális méreteinek meghatározása

Tudományos munkásság áttekintő összefoglalása

Írta

Dr. Jármay Károly

okl. gépészmérnök, Eur. Ing., a műszaki tudomány kandidátusa
egyetemi docens

aki a Műszaki Tudományág Gépészmérnöki Tudományok Tudományszakán
habilitáció elnyerésére pályázik

Miskolc

1994

I. BEVEZETÉS, TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK

Az optimalálás tudatosan, vagy tudatalatt minden emberi tevékenységet áthat. Az emberek célokat tűznek maguk elé és a külső feltételekhez igazodva, esetleg a maguk érdekei szerint módosítva, próbálják elérni azokat. A műszakiak szakmájuk gyakorlása során sokkal inkább kötöttek mind a cél(ok), mind a feltételek tekintetében. Igazodniuk kell ahhoz az ismeretszinthez, melyen a szerkezetanalízis elvégezhető, igazodniuk kell ahhoz a gyártási szinthez, melyen a szerkezet legyártható, végül de nem utolsósorban igazodniuk kell ahhoz a környezethez, ahol a termék értékesíthető. Ezen területeken fokozódó igény jelentkezik a termelés racionalizálása, az adott ismeretszint melletti gazdaságossá tétele terén. A szervezési, irányítási, technológiai, értékesítési, stb. területek mellett a szerkezettervezés fejlettsége meghatározó szerepet játszik. Ugyanakkor folyamatosan finomodnak azon eljárások, melyekkel a szerkezet viselkedése jobban leírható.

A szerkezettervezés területén az anyag- és energiatakarékosságra, a tervezés megbízhatóságára és időigényének csökkentésére irányuló törekvések jelentősen befolyásolják a termék gazdaságosságát, versenyképességét.

Az optimalálás azt jelenti, hogy a lehető legjobb eredményt érjük el adott körülmények között. Az optimális méretezés módszerei a gazdaságos szerkezetek méretezésének hatékony eszközei, amikor különböző költségtényezők mellett történik az optimalálás, vagyis a célfüggvények a szerkezet költségtényezőiből tevődnek össze. Általában a gazdaságos szerkezetet minimális költség, illetve tömeg jellemzi, vagy bármely más jellemző, amit a tervező fontosnak tart (pl. gyártási idő, élettartam, alakváltozás, stb.).

Az optimaláló módszerek eredete visszanyúlik Newton, Lagrange és Cauchy idejébe. Az optimalálásnál a differenciál-számító módszerek kifejlődését Newton és Leibnitz munkássága tette lehetővé. A variációszámítás alapjait Bernoulli, Euler, Lagrange és Weierstrass fektette le. A feltételes optimalásra a Lagrange-féle multiplikátor módszere bevezetésével kerülhetett sor.

A modern optimaláló módszerek eredete Cilley (1900) és Michell (1904) munkáihoz fűződik, melyet többek között Prager (1957), Cox (1965) és Hemp (1973) fejlesztett tovább és melyekből kialakultak a ma analitikusnak nevezett módszerek. A Dantzig (1948) által kidolgozott szimplex módszer jelentős előrelépés volt a lineáris programozás területén. A Bellman (1957) által kifejlesztett dinamikus programozás elősegítette a feltételes optimaláló módszerek fejlődését. A Kuhn és Tucker (1951) féle optimalitási kritérium fontos alapjává vált a nemlineáris programozás későbbi fejlődésének.

A feszültségre kihasznált szerkezet (fully stressed design) méretezési módszere széles körben elterjedt az 50-es években (Cox 1965) és napjaink fejlettebb algoritmusai is támaszkodnak rá. A 60-as évek elején Zoutendijk (1960), Rosen (1960) és Powell (1965) eredményei voltak jelentősek a nemlineáris optimalálás területén. Hooke és Jeeves (1961)

kidolgozták hatékony algoritmusukat, melyet aztán Rosenbrock (1960), Pappas (1980) és mások továbbfejlesztettek.

A szimplex módszer továbbfejlesztéseként dolgozta ki Box (1965) algoritmusát a nemlineáris optimalás témakörében. Ebben az időben jelent meg Fiacco és McCormick (1968) a SUMT módszerrel, mely deriváltak számításával és büntető függvényekkel hatékony módszernek bizonyult a nemlineáris feladatok megoldására.

A 60-as években sorra kidolgozott matematikai programozási módszerek kihasználták azokat a lehetőségeket, melyeket az elterjedő, akkor nagy sebességűnek tekinthető számítógépek jelentettek a nagy mennyiségű numerikus számítás elvégzése és komplex feladatok megoldása terén. A matematikai programozás témakörébe tartozó lineáris programozás, integer programozás, dinamikus és geometriai programozás mellett a nemlineáris programozás egy speciális eset.

Számos stratégiát dolgoztak ki nemlineáris programozási problémák megoldására, de sokkal több algoritmust ismertettek, mint amennyit sikeresen alkalmaztak. Az alkalmazhatóságig kidolgozott algoritmusok köre korlátozott. A számítógépek további fejlődése és az egyre növekvő igények a problémák élethűbb megfogalmazását és szélesebb körben sikeresen alkalmazható programok kifejlesztését serkentik.

A legtöbb valós problémának számos megoldása van. Az optimalás feladata, hogy a lehetséges megoldások közül a legjobbat határozza meg bizonyos célfüggvény és feltételrendszer esetén, olyan hatékonyságra törekedve, hogy bizonyos közelítések és elhanyagolások révén elfogadható időn belül megoldáshoz jusson.

Jelentős koncepció kialakító és szemlélet formáló szerepet játszott a szerkezetoptimalás területén Schmit (1960), aki egyik kidolgozója volt a nagy szerkezetek optimalására is alkalmas ACCESS programrendszernek (Schmit és Miura 1978).

A 70-es években jelentek meg a nagy végesesleges SAP programrendszert felhasználó optimaló programrendszerek (Kiusalaas, Reddy 1977) DESAP néven, melyek az optimalitási kritérium módszerét használták fel. Az évtized végen jelent meg az ún. duál módszeren alapuló algoritmus (Schmit, Fleury 1979), valamint más kvadratikus konvergenciával rendelkező módszerek, az SQP Sequential Quadratic Programming (Schittkowski 1980) az MMA Method of Moving Asymptotes (Svanberg 1991a). Napjainkban folyik ezen algoritmusokra épülő programrendszerek kidolgozása illetve felhasználása (Niku-Lari (ed) 1986). Főként az alakoptimalás témaköre fejlődik dinamikusabban az utóbbi években, konferenciákat is rendeztek e témakörben (Benett, Botkin(ed) 1985), de hasonlóan intenzív kutatás folyik az érzékenységi vizsgálatok témakörében (Haug, Choi, Komkov 1986) a kedvező szerkezeti méretek megválasztására.

A többcélűfüggvényes optimalás matematikai módszerei visszanyúlnak a múlt század végéhez, főként Pareto (1876) munkásságához. Az optimaló módszerek fejlődése során a század második felében kezdett kibontakozni a többcélűfüggvényes optimalás témaköre (Sion

1958). Az egycélűfüggvényes optimaló módszerek számítógépi adaptálásával megnyílt a lehetőség, hogy a célfüggvények önálló optimumai felhasználásával valamely matematikai módszerrel többcélűfüggvényes optimumot határozzanak meg (Roy 1971, Yu, Zeleny 1975, Salukvadze 1974).

Több áttekintő tanulmány jelent meg elősegítve a felhalmozódott nagymennyiségű anyag ismertetését és rendszerezését (Lev 1981, Stadler 1979, 1984, Levy, Lev 1987).

A 80-as években lelassult az a lendület, mely az optimalásnál új és új algoritmusok kifejlesztését eredményezte. A hangsúly áttolódott az alkalmazásra, olyan analitikus és numerikus módszerek kifejlesztésére, melyek adott szerkezeteknél vagy szerkezet típusoknál végzik el meglévő optimaló módszerek alkalmazásával illetve továbbfejlesztésével a hatékony optimalást (Gallagher, Zienkiewicz 1977, Siddall 1972, 1982, Carmichael 1981, Farkas 1984, Osyczka 1984, 1992, Rao 1984, Vanderplaats 1984, Scales 1985, Kirsch 1994). Továbbá úgy alakították át az algoritmusokat, hogy személyi számítógépen is hatékonyak legyenek (Gaggero, Wilson 1984, Mosley, Spencer 1985).

Hazánkban az 50-es évek végétől folyik az optimalis méretezés művelése (Pelikán 1957, Peredy 1959). A 60-as években kezdett a szerkezetméretezésben elterjedni (Farkas 1967, Kaliszky 1968). A 70-es évek elejéig az analitikus, illetve a grafoanalitikus optimalás volt a meghatározó, majd a számítógépek elterjedésével a hangsúly áttevődött a numerikus optimalásra. Farkas József iskolát teremtett, számos egyetemi doktori és kandidátusi értekezés készült nála az optimalis méretezés alkalmazásaként (például Rácz 1984, Tímár 1985, Orbán 1987). Magamat is ide számítom. Páczelt, Szabó (1994) foglalkozott az optimalis alkalmazásával érintkezési feladatoknál. A többcélűfüggvényes optimalás területén Vásárhelyiné és Lógó János munkája jelentős [Vásárhelyiné, Lógó (1986)].

Az optimalis méretezés nemzetközi és az 50-es évek végétől a hazai szakirodalomban is nyomon követhető eredményeinek hazai alkalmazása elmaradást mutat. Ennek egyik oka a számítógépi hardver-lemaradásból adódik, mivel a numerikus optimalás erősen számítógépcentrikus. Másik oka, hogy az optimalis méretezés szemlélete nem terjedt el kellőképpen, pedig a matematikai optimaló módszerek a műszaki gyakorlat szinte minden területén eredményesen alkalmazhatók és ezzel jelentős költség-, tömeg-, stb. megtakarítás érhető el.

További előnye az optimalis méretezésnek, hogy rendszerezett célfüggvény és méretezési feltételrendszer kidolgozását igényli. A végesesleges módszerrel való összekapcsolása kiszélesíti az optimaló módszerek alkalmazási körét.

A gyakorlati eredmények igazolják az optimalis méretezés hatékonyságát, a korszerű méretezés, az anyag- és energiatakarékosság pedig szükségessé teszi e módszerek széleskörű elterjesztését és alkalmazását. Az Engineering Optimization (főszerkesztő Prof. Templeman, UK) és a Structural Optimization folyóiratok (főszerkesztő Prof. Rozvany, D) jelentik ezen témakör két kiemelkedő folyóiratát, de sok más neves folyóirat is kisebb-nagyobb

mértékben kapcsolódik a szerkezet-optimalizációhoz (Computers & Structures, Computers in Industry, Engineering with Computers, stb.). Az optimalizációhoz kötődő folyóiratok nagy száma, a nemzetközi konferenciák, valamint az ilyen témájú szakkönyvek mutatják a szerkezetoptimalizálás elterjedtségét, sikerességét és fontosságát.

II. A TUDOMÁNYOS TEVÉKENYSÉG ÖSSZEFOGLALÁSA

Az 1987-ben összeállított, 1988-ban benyújtott és megvédett kandidátusi értekezésem öt fő területet tartalmazott.

- Személyi számítógépre kidolgozott döntéstámogató programrendszer kidolgozása öt egycélfüggvényes (Complex, Hillclimb, Direct search-feasible directions, Flexible tolerance, Direct random search eljárások) és hét többcélfüggvényes optimáló módszerrel (min-max, súlyozott min-max, kétféle globális kritérium, súlyozott globális kritérium, egyszerű súlyozás, normált súlyozás). Matematikai tesztfeladatokkal vizsgáltam a programrendszer megbízhatóságát.

- Síkbeli, változó gerincmagasságú, hegesztett I-szelvényekből készített egyhajós, daruzott, sarokmerev csarnokkeret méretezését feszültség-, alakváltozás-korlátozási, öv- és gerinclemez-horpadási, kifordulási, valamint geometriai méretkorlátozási feltételek esetén három célfüggvény - kerettömeg, 1 m^2 -re jutó kerettömeg, keretköltség - mellett valószínűsítettem meg (1. ábra). A keretszerkezet igénybevételeinek és alakváltozásának meghatározását végelemes alprogram illesztésével oldottam meg.

- Megvalósítottam a szimmetrikus, bordázott, hegesztett szekrényszelvényű kétfőtartós futódaru hídfőtartóinak gazdaságos méretezését. A méretezést feszültség-, lehajlás-korlátozási, öv- és gerinclemez-horpadási, fáradási, valamint geometriai méretkorlátozási feltételek mellett, négy célfüggvény - hídtömeg, hegesztési-, felületelőkészítési-, összköltség esetén dolgoztam ki.

- Analitikus vizsgálatok alapján kidolgoztam a háromrétegű szendvicstartók gazdaságos méretezését feszültség-, lehajlás-korlátozási, rezgéscsillapítási, öv- és gerinchorpadási és geometriai méretkorlátozási feltételek esetén, négy célfüggvény - fedőlemezek, maganyag térfogata, ragasztási felület, összköltség - mellett.

- Analitikus vizsgálatok alapján kidolgoztam a műanyagbeton tartók gazdaságos méretezését a rétegek normál- és nyírófeszültség-korlátozási, a tartó lehajlás-korlátozási, valamint geometriai méretkorlátozási feltételei mellett, öt célfüggvény (műanyagbeton-, acéllemez-, felületelőkészítési-, valamint összköltség minimum és tartóhossz maximum) esetén.

Tudományos tevékenységem célja az értekezés kidolgozása után is változatlanul kettős volt: egyrészt az interaktív döntéstámogató programrendszer folyamatos továbbfejlesztése személyi

számítógépen, mely hatékonyan alkalmazható szerkezetek optimális méretezésére, *másrészt konkrét gyakorlati szerkezetek méretezésének végigvitele* gyártási szempontokat is (pl. hegeszthetőség, hegesztési sorrend, ragasztási technológia, stb.) figyelembe véve. A legyártott szerkezetek tesztelése révén további módosítások, átalakítások megvalósítása.

Az első területen egycélfüggvényes optimáló algoritmusok adaptálását, átdolgozását és továbbfejlesztését végeztem el úgy, hogy azok a programrendszerbe beépíthetők legyenek. Az egycélfüggvényes és a többcélfüggvényes optimáló algoritmusok összekapcsolása szükséges a megalapozott döntés-előkészítési folyamat megvalósításához. A programrendszer és a gazdaságos szerkezetméretezés logikai struktúrájának összekapcsolása a méretezés rendszerezettebb és tudatosabb végigvitelét teszi lehetővé.

A kutatás célja volt különféle szerkezettypusoknál: futódaru bordázott szekrényszelvényű főtartói, profilos fedőrétegű szendvicstartók, bordázott lemezek, műanyagbeton kitöltésű tartók, rácsos csőszerkezetek, a gazdaságos szerkezetméretezés folyamatának bemutatása és végigvitele. A tervezők számára eredmények bemutatása, következtetések levonása.

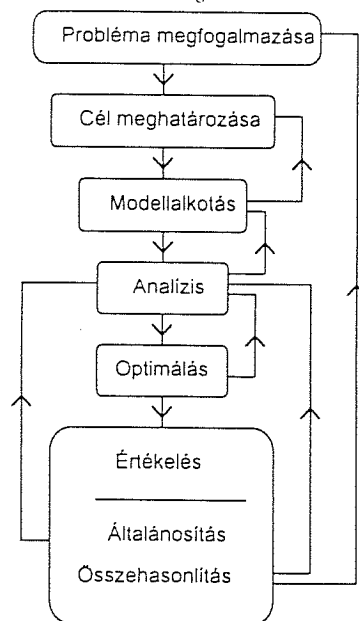
A méretezés analízis fázisában több szerkezettypusnál, például szendvicstartó, műanyagbeton, futódaru bordázott főtartója, az elméleti alapok részletesebb vizsgálata volt szükséges, illetve számos statikus és dinamikai méréssel a számítások igazolása, ezért a kutatás célkitűzései között szerepelt ilyenfajta mérések elvégzése is.

Fontos szempont volt a kutatás során, hogy a méretezés a járatos méretek (pl. lemezvastagság) kiválasztásáig terjedjen, vagyis előre megadott diszkrét értéksorok felhasználásával közelebb vigyen a legyárthatósághoz.

A második területen elsősorban ipari megbízás keretében végeztünk kutatómunkát különféle présgépek öntött acél, vagy alumínium vázának hegesztett lemezszerkezetűre való áttervezése során, ami azt az előnyt is jelentette, hogy a szerkezetet legyártották, vagy átalakították (az igények szerint) és ellenőrző mérésekre volt lehetőség. Némelyik terméket nagy szériában külföldre exportálták. Ezek a szerkezetméretezések egy hosszabb folyamat termékei, részben az értekezést megelőző, részben követő időszakból származnak, de az értekezésbe a meglévő eredmények nem kerültek beépítésre. Mivel a megrendelő "szolgálati használatra" minősítve kérte a munkát, ezért ezek korlátozott publikálási lehetőséget jelentettek. Magukat a megvalósult szerkezeteket ugyanakkor sikeres műszaki alkotásoknak tekintem.

A kutatás módszere a gazdaságos szerkezetméretezés kidolgozott műveleti struktúrájába illeszkedő interaktív döntéstámogató programrendszer felhasználásán, illetve statikus és dinamikai mérések elvégzésén alapszik. A mérések célja a számítások helyességének igazolása.

A gazdaságos szerkezetek méretezésének folyamata több fázisra tagolható. Az egyes fázisoktól lényegesen függ a méretezés során adódó szerkezet. A gazdaságos szerkezetméretezést hét fő fázison keresztül valószínűsítettem meg:



Az utóbbi két fázis az értékelés fő elemeit jelenti.

A numerikus optimálásnál három fő módszercsoport alakult ki:

1). Feltétel nélküli optimálás

Ezen eljárások kerültek először kidolgozásra az 50-es, 60-as években. A gyakorlati problémák túlnyomó részénél közvetlenül nem használhatók, de alapjául szolgáltak a nemlineáris optimáló algoritmusok fejlesztésének.

2). Optimálás lineáris feltételekkel

Ezek az optimáló módszerek régebbi eljárásai közé tartoznak. Adott esetben gyenge nemlinearitás esetén is alkalmazhatók.

3). Optimálás nemlineáris feltételekkel

Az általunk is vizsgált azon eljárások, melyek a felmerülő gyakorlati problémák túlnyomó részét képesek kezelni. A nemlineáris feltételek általában egyenlőtlenségi feltételek, de egyes módszerek lehetőséget adnak egyenlőségi és egyenlőtlenségi feltételek egyidejű figyelembevételére is.

Az optimálás főbb fogalmi körei

Célfüggvénynek tekintjük azt a függvényt, melynek a minimumát keressük. Ez lehet a változók lineáris vagy nemlineáris függvénye. A szerkezetoptimálás vizsgált témaköreiben

jelentheti a szerkezet tömegét, költségét (anyag-, hegesztési-, felületelőkészítési-, ragasztási költség stb.), alakváltozását, élettartamát, illetve bármilyen más jellemzőt, amit a tervező fontosnak tart.

Változónak tekintjük általában a szerkezet méreteit, a lemezvastagságot, a lemezszélességet, de a szelvényterület, az inercianyomaték, a tartóhossz, vagy az anyagminőség is lehet változó.

Implicit méretezési feltételek jelentik azokat az előírásokat, melyeket a szerkezetnek teljesítenie kell. Ezek általában a szerkezet valamilyen mechanikai jellemzői: feszültség, alakváltozás, lemezhorpadás, sajátfrekvencia, rezgéscsillapítás, stb. Ezek a feltételek általában a változók nemlineáris függvényei.

Explicit méretezési feltételek jelentik az ún. méretkorlátozási feltételeket, tehát a változók értékei csak egy bizonyos reális tartományon belül mozoghatnak. Pl. lemezvastagságkorlátozási, gyártási, hegesztéstechnológiai feltételek:

Az interaktív, döntéstámogató programrendszer alkalmas a műszaki gyakorlatban előforduló

$f_i(x^*) = \min f_i(x)$	$i = 1, 2, \dots, P$	(1)
$x \in X$		
$g_j(x) \geq 0$	$j = 1, 2, \dots, M$	(2)
$h_l(x) = 0$	$l = 1, 2, \dots, L$	(3)

típusú feltételes szélsőértékfeladat megoldására, ahol

$f_i(x)$	a célfüggvények vektora,
$g_j(x)$	az egyenlőtlenségi feltételek,
$h_l(x)$	az egyenlőségi feltételek,
x	a változók vektora,
x^*	az optimum helye,
X	a megengedett tartomány, ahol a változók vektora elhelyezkedhet.

Egycélfüggvényes optimálásnál az optimum a célfüggvénynek a megengedett tartományon felvehető szélsőértékét jelenti, többcélfüggvényes optimálásnál az optimum ún. Pareto optimum, melynél egyik célfüggvény értéke sem csökkenthető szigorúan úgy, hogy a többi értéke ne növekedjék. A megoldás legtöbbször nemcsak egy pontból áll, hanem bizonyos tulajdonságú pontok együttese.

A programrendszer tíz különféle egycélfüggvényes optimáló algoritmust alkalmaz, melyek az egyes feladatoknál nem egyforma hatékonyságúak, ezért is célszerű többet is felhasználni.

Az alkalmazott hét többcélfüggvényes optimáló algoritmus szintén eltérő hatékonyságú az egyes feladatoknál, ezért együttes alkalmazásuk előnyös.

Matematikai és műszaki tesztfeladatokkal, valamint különféle szerkezetek gazdaságos méretezésének végigvitelével szemléltettem a gazdaságos szerkezetméretezés műveleti

struktúrájának, valamint a vele összekapcsolt interaktív döntéstámogató programrendszer alkalmazásának előnyeit, azt, hogy rendszerezettebb és kiterjedtebb vizsgálatok révén a döntés-előkészítési folyamat alaposabb végigvitele lehetséges.

A programrendszert IBM PC/AT 486 kompatibilis számítógépen dolgoztam ki, illetve adaptáltam Silicon Graphics Indigo workstation-re is. A továbbfejlesztéseket is Fortran és C nyelveken végeztem.

III. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. DÖNTÉSTÁMOGATÓ PROGRAMRENDSZER TOVÁBBFEJLESZTÉSE

A gazdaságos szerkezetméretezés logikai struktúrájának és az interaktív döntéstámogató programrendszernek az összekapcsolásával az (1-3) egyenletekkel felírható műszaki feladatoknál megvalósítható a gazdaságos szerkezet méretezése. Ennek keretében az alábbiakat végeztem el:

1.1. Továbbfejlesztettem a kandidátusi értekezésemben kidolgozott interaktív döntéstámogató programrendszert, személyi számítógépen, mely széleskörűen alkalmazható szerkezetméretezéshez kapcsolódó döntés-előkészítési folyamatok hatékony és gyors megvalósítására. A programrendszerben összekapcsolásra kerültek a többcélű függvényes és az egycélű függvényes optimálás algoritmusai. 19 ezzel a témával foglalkozó cikkem jelent meg, részben társszerzőkkel. Mivel a saját hivatkozások száma limitált, ezért az [1,4,8,9,10,16,17] publikációimat emelném ki, saját rész 100%. A kandidátusi értekezés óta megjelent 66 publikációm mindegyike valamely optimáló módszer (módszerek) alkalmazását, vagy összehasonlításukat jelentette.

1.2. Többcélű függvényes optimálásra hét különféle algoritmust alkalmaztam: a min-max eljárást, a globális kritérium módszerének két különböző változatát, a súlyozott min-max eljárást, a saját kifejlesztésű súlyozott globális kritérium módszerét, az egyszerű súlyozás és a normál súlyozás módszereit oly módon, hogy ún. kevert feladatoknál, amikor minimum- és maximumkeresés egyidejűleg szükséges, akkor is alkalmazhatóak [1,2,3,5,8,9], saját rész 100%.

1.3. További egycélű függvényes optimáló algoritmusokat adaptáltam, illetve melynek mérete megengedte beépítettem az interaktív döntéstámogató programrendszerbe. A kandidátusi értekezésben kidolgozott programrendszerben a Box-féle (1965) Complex algoritmus, a Himmelblau-féle (1971) rugalmas toleranciák módszere, a Rosenbrock-féle (1960) Hillclimb

algoritmus, a Weisman-féle (1968) direkt-véletlen kereső módszer, a Pappas-féle (1980) direkt kereső- megfelelő irány módszere szerepelt. Új módszerként adaptáltam a Davidon-Fletcher-Powell módszert (DFP), Powell (1965), a Feasible Sequential Quadratic Programming (FSQP, CFSQP, Zhou, Tits 1993) módszert, a Method of Moving Asymptotes (MMA, Svanberg 1991) módszert, a Backtrack (Walkner 1960) módszert, valamint a Sequential Unconstrained Minimization Technique (SUMT, Fiacco, Mc.Cormick 1968) módszert.

Átalakítottam a beépített algoritmusokat úgy, hogy ugyanazon célfüggvény- és feltételrendszert kezeljék, így a számítás során változtatni lehet a felhasznált algoritmust. Azon algoritmusoknál, amelyeknél szükséges volt, olyan átalakítást végeztem hogy nem megfelelő kezdőpontból is tudjanak indulni, továbbá, hogy ha kerekítellen és így a gyakorlat számára közvetlenül nem használható értékeket határoznak meg, akkor egy pótlólagos eljárással, előre megadott diszkrét értéksorok alapján a szerkezet diszkrét optimális méreteit határozzák meg. A programrendszer kidolgozása során a cél nem új optimáló eljárások kidolgozása volt, hanem meglévő eljárásoknak a műszaki felhasználásra alkalmassá tétele.

1.4. A továbbfejlesztett programrendszert konkrét műszaki feladatok megoldására használtam fel. A műszaki feladatok különféle fémszerkezetek, futódaruhidak, keretszerkezetek, bordázott lemezek, rétegezett szerkezetek, rácsos tartók, nyomott- hajlított rudak, főorsó-csapágy rendszer, kemence falszerkezet optimális méretezését jelentették. A társszerzőkkel történt megállapodás szerint saját rész 75%, Farkas József professzor 15%, Dr. Tompa Sándor 5%, Dr. Szemmelveisz Tamás, Dr. Szemmelveisz Tamásné, Dr. Mikó József együttesen további 5%.

A többcélű függvényes optimálás módszereit röviden ismertetem, hogy a későbbi alkalmazásoknál érthető legyen:

Egyszerű súlyozás módszere

Ez a legegyszerűbb módszer, mely a többcélű függvényes optimálást a célfüggvények összeadásával visszavezeti egycélű függvényes optimálásra.

$$f(x) = \sum_{i=1}^P w_i f_i(x), \quad (4)$$

ahol $w_i \geq 0$ és $\sum_{i=1}^P w_i = 1$; ahol w_i a tervező által megadott súlyozó tényező, amely arányos a célfüggvény fontosságával. Más súlyozó tényezőkkel más megoldás adódik.

Normált súlyozás módszere

Kikerüli az előző módszer hibáját, mely akkor adódik, ha nagy a célfüggvények értéke közötti különbség. A célfüggvények értéke normáltan kerül összeadásra.

$$f(x) = \sum_{i=1}^P w_i f_i(x) / f_i^0, \quad (5)$$

ahol az egycélű függvényes optimum f_i^0 , az ún. ideális optimum, $f_i(x)$ pedig a tényleges célfüggvényvektor.

A min-max eljárás

A min-max optimum úgy adódik, hogy az eljárás célfüggvények relatív eltéréseit határozza meg:

$$z_i'(x) = \frac{|f_i(x) - f_i^0|}{|f_i^0|}, \text{ vagy } z_i''(x) = \frac{|f_i(x) - f_i^0|}{|f_i(x)|}, \quad (6)$$

majd a maximális eltérések közül a minimumot választja ki.

$$z_i(x) = \max \{ z_i'(x), z_i''(x) \}, \quad (7)$$

$$\mu(x^*) = \min \max \{ z_i(x) \}. \quad (8)$$

A súlyozott min-max eljárás

Az előző eljárást súlyozó tényezőkkel kiegészítve kapjuk meg az optimumokat, vagyis a relatív eltéréseket súlyozzuk.

$$z_i(x) = \max \{ w_i z_i'(x), w_i z_i''(x) \}. \quad (9)$$

Globális kritérium módszere

A függvény egyfajta távolságot ad meg a vektroptimum és az ideális optimum f^0 között.

1. típus

$$f(x) = \sum_{i=1}^P [(f_i^0 - f_i(x)) / f_i^0]^Q. \quad (10)$$

Salukvadze (1974) $Q=2$ -t javasol. Q értéke természetes szám lehet, 1,3,4, stb.

2. típus

$$L_P(f) = \left[\sum_{i=1}^P w_i \left| \frac{f_i^0 - f_i(x)}{f_i^0} \right|^Q \right]^{1/Q}, \quad 1 \leq Q \leq \infty \quad (11)$$

Az általánosított súlyozott globális kritérium módszere

A 2. típus esetén, ha $Q=2$, és súlyozó tényezőket vezetünk be, akkor a vektroptimum és az ideális optimum közötti Euklidesi távolságot minimáljuk.

$$L_H(f) = \sum_{i=1}^P [w_i (f_i^0 - f_i(x))^2]^{1/2}, \text{ ahol } 1 \leq Q \leq \infty \quad (12)$$

Az újabban adaptált egycélűfüggvényes optimális módszerei:

A *Davidon-Fletcher-Powell method (DFP)* az egyik legjobb, általánosan használható feltétel nélküli optimálós módszer, mely deriváltakat használ az eljárás működése során. A gradiens és a Hesse-féle mátrix segítségével számítja ki a lépésméreteket. Külső büntetőfüggvényt alkalmaz a feltételek figyelembevételére, vagyis az új célfüggvény meghatározása a következő:

$F(x, r_k) = f(x) + r_k \cdot 1/g_j(x)$; ahol a feltételek megsértése az új célfüggvény értékét változtatja meg drasztikusan. A lépésméreteket köbös interpolációval kerülnek meghatározásra.

A *Backtrack* kombinatorikus optimálós módszer diszkrét értékekkel számol. Szisztematikus keresést végez, ahol a vizsgált variációk számát jelentősen csökkenti a felező eljárás bevezetésével.

A *FSQP - feasible sequential quadratic programming* - módszer CFSQP 1.0 C szubrutinok rendszere, mely "sima" célfüggvények minimálását végzi el "sima" feltételek mellett. Nem megfelelő kezdőpontból is elindul. Az egyenlőségi feltételeket egyenlőtlenségivé alakítja. A vonalmenti keresés Armijo-típusú. Mind deriváltakkal, mind deriváltak nélkül képes elvégezni a számítást. Nagyon gyors, négyzetes konvergenciájú eljárás.

A *SUMT, Sequential Unconstrained Minimization Technique* feltétel nélküli optimálós eljárás, ahol külső büntetőfüggvénnyel vesszük figyelembe a feltételeket, a büntetőfüggvény általában reciprok, vagy logaritmikus alakú.

$$F(x, r_k) = f(x) + r_k \cdot 1/g_j(x); \text{ vagy } F(x, r_k) = f(x) - r_k \cdot \ln g_j(x). \quad (13)$$

Analitikus deriváltak megadását igényli. Utólagos diszkrétizálást igényel.

Az *MMA Method of Moving Asymptotes* az eredeti (1-3)-nak megfelelő feladatot konvertálja az alsó és felső határokból meghatározott aszimptóták közé. Analitikus deriváltakat igényel. Konvergenciája kvadrátikus. Pótlólagos diszkrétizálást igényel.

2. FUTÓDARU HÍDFŐTARTÓ OPTIMÁLIS MÉRTEZÉSE

Számos könyv és cikk foglalkozik hegesztett szekrénytartók méretezésével: például Mel'nikov (1983), Kogan (1975), Farkas (1982, 1986) illetve fáradásával Halász, Platthy (1987). A biztonsági tényezők megválasztása szintén fontos része a tervezési folyamatnak (Iványi 1989, 1991). A vizsgálatok elsődlegesen analitikusak. Mivel a daruknál fontos a méretezés során a szabványok figyelembevétele, ezek pedig változnak, pontosabb leírást adva a szerkezet viselkedéséről, ezért az új előírások beépítése az analízisbe fontos. Farkas professzor foglalkozott ezen szerkezetek optimális méretezésével, de tankönyvébe még nem kerülhettek be a British Standard előírásai, mert akkor jelentek meg, hasonlóan az Eurocode 3 előírásai 1992-ben jelentek meg.

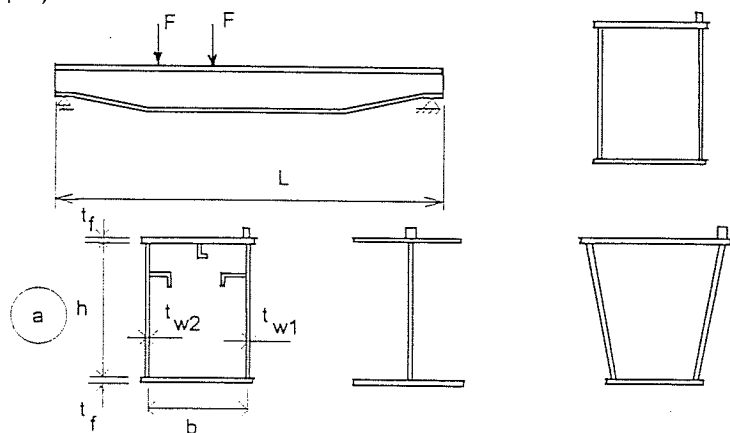
Megvalósítottam a szimmetrikus, bordázott, hegesztett szekrényszelvényű kétfőtartós futódaru hídfőtartóinak gazdaságos méretezését az 1. tételben ismertetett módszerekkel, úgy hogy a gerinclemez merevítővel van ellátva és a két gerincrész horpadása külön vizsgálatot igényelt. Különböző daru hídfőtartó méretezésével 15 cikkem foglalkozik. Jelentősebbként a [3,5,8]-at említeném. Saját rész 80%, Farkas József professzor 15%, további résztvevők 5%. Ennek keretében az alábbiakat végeztem el (1. ábra):

2.1. A méretezést feszültség-, lehajlás-korlátozási, öv- és gerinclemez-horpadási, fáradási, valamint geometriai méretkorlátozási feltételek mellett, négy célfüggvény - hídömeg, hegesztési-, felületelőkészítési-, összköltség esetén dolgoztam ki. A méretezési feltételeknél használtam az MSZ, a TGL, a CSN, majd később a DIN, a British Standard, végül az Eurocode 3. előírásait.

2.2. Elemeztem az egyes célfüggvények egymásra hatását, a változók értékeit egyes Pareto optimumokban.

Szemléltetésül az alábbiakban elvégeztem egy hídfőtartó méretezését a British Standard [5] alapján.

A probléma megfogalmazása: egyszerűen aszimmetrikus, merevített szekrényszelvényű futódaru hídfőtartó optimális méretezése adott fesztáv, terhelés és anyagminőség esetén (1. ábra, 'a' típus).



1. ábra.

A cél meghatározása: az anyagköltségnek, a hegesztési költségnek a felületelőkészítési költségnek és az összköltségnek minimálisnak kell lennie. Ezek a célfüggvények.

A költségtényezők a következők [5] alapján:

Anyagköltség 43-as acél esetén (folyáshatár $R_y = 275$ MPa)

$$k_m = 0.54 \text{ \$}/\text{kg}; \quad C_m = k_m \rho V, \quad (14)$$

ahol ρ a sűrűség, V a térfogat

Felületelőkészítési és festési költség:

$$k_s = 14.1 \text{ \$}/\text{m}^2; \quad C_s = k_s (2 bL + 2 hL), \quad (15)$$

ahol L a fesztáv, h a gerincmagasság, b az övlemezszélesség. Jelölések és keresztmetszet a 2. ábra alapján.

Hegesztési költség:

$$k_w = 16.2 \text{ \$}/\text{kg}, \quad C_w = k_w \frac{a_w^2}{\sqrt{2}} L_w \rho, \quad (16)$$

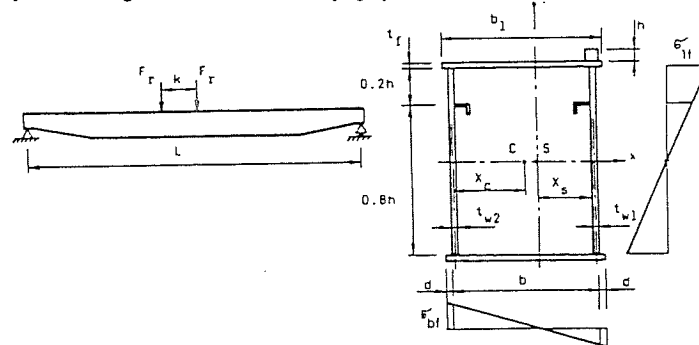
ahol $k_w = 1, 2, 3$ a hegesztés pozíciójától függő nehézségi tényező, L_w a varrat hossza.

Az ECCS (1978) ajánlásait használva $a_w = 5$ mm dolgozó méret és egység hossz esetén $L_w = 1$ m, a hegesztési költség 4.51 \\$, ha $k_w = 2$. Másik lehetőség, ha a hegesztési költségtényezőt megadott határok közt változtatjuk.

Az összköltség az előzők összege.

$$C_t = C_m + C_s + C_w. \quad (17)$$

Modellalkotás: kétfőtartós, szabadon felfekvő, hosszirányban hegesztett szekrénytartó. Terhelés: egyenletesen megoszló az önsúlyból, a kezelőjárda és a sín tömegéből, koncentrált erő a hasznos teherből. Vízszintes terhelés a daruhíd és a futómacska gyorsításából és lassításából adódik. Külszíni daru esetén szélterhelés is van. A szerkezet rugalmas feszültségi tartományon van. A gátolt csavarást elhanyagoljuk.



2. ábra

Analízis a BS 2573 (1983) és 5400 (1982) alapján

Statikus feszültség az alsó övben a tartó közepén kétirányú hajlítás esetén:

$$\frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \leq \alpha_\sigma P_s, \quad (18)$$

ahol W_x és W_y keresztmetszeti tényezők, a bordák inerciáját elhanyagoljuk, M_x és M_y hajlítónyomatékok, α_σ a csoporttényező, P_s a statikus megengedett feszültség.

Az inercianyomatékok:

$$I_x = \frac{h^3(t_{w1} + t_{w2})}{12} + \frac{b t_f}{2} (h + t_f)^2$$

$$I_y = h t_{w1} x_s^2 + h t_{w2} (b - x_s)^2 + \frac{b^3 t_f}{6} + \frac{b t_f}{2} (b - 2x_s)^2, \quad (19)$$

ahol h a gerincmagasság, t_{w1} és t_{w2} a gerincvastagságok, b az öv szélesség, t_f az öv vastagság, d az övlemez túlnyúlása a gerincen.

$$b_1 = b + 2d$$

$$x_s = \frac{h t_{w2} b + b t_f b}{A} \quad (20)$$

$$A = h(t_{w1} + t_{w2}) + 2b t_f.$$

A hajlítónyomatékok:

$$M_x = \frac{L^2}{8} (1.05A + p_r + p_s)g + \frac{F}{2L} (L - \frac{k}{2})^2 \quad (21)$$

$$M_y = 0.3 \frac{z_b}{z_i} \frac{L^2}{8} (1.05A + p_r + p_s)g + \frac{G_i}{8L} (L - \frac{k}{2})^2 + M_w \quad (22)$$

ahol a keréknyomás: $F = (\psi_d H + G_i) / 4$; $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$; $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, H a hasznos terhelés, G_i a macska tömegereje, L a feszítáv, az 1.05-ös tényező a diafragmák tömegét adja közelítőleg, k a macska keréktávja, z_b és z_i a macska össz- és fékezett kerekeinek a száma, p_r és p_s a kezelőjárda és a sín folyóméter tömege, a 0.3-as tényező a tömegerek hatását tükrözi a DIN 15018 (1974) szerint. M_w a szélerőből származó nyomaték.

A szélerő a következő:

$$F_w = \gamma A q C_f \quad (23)$$

a szélerőerősítő tényező C_f függ a aerodinamikai karcsúságtól (L/h) és a szelvényaránytól (h/b), BS szabvány alapján 1.3 és 2.2 közé esik a gyakorlatban. A biztonsági tényező a szerkezet szilárdsági vizsgálatnál $\gamma = 1$, A a szerkezet tényleges frontális területe (m^2).

Egy külszíni normál darunál a szélnyomás $q = 250 \text{ (N/m}^2\text{)}$

Fáradási feszültségre vonatkozó feltétel:

$$\frac{M_x}{W_x} + \frac{M_y}{W_y} \leq P_n \quad (24)$$

ahol P_n a fáradási megengedett feszültség,

$$M_x = \frac{L^2}{8} (1.05A + p_r + p_{sw})g + \frac{F}{2L} (L - \frac{k}{2})^2 \quad (25)$$

$$F_i = \frac{K_p \psi_d H + G_i}{4} \quad (26)$$

K_p spektrum tényező, P_n függ a daru csoportjától és a működési ciklusszámtól (N). Nehézüzemű, $N = 2 \cdot 10^6$ ciklusszámú daru az A7 csoportba tartozik, ekkor $K_p = 0.8$; $\psi_d = 1.3$; $\alpha_d = 0.95$.

Ha a lemezelemek folytonos hosszirányú sarokvarrattal készülnek, akkor $P_n = 167 \text{ MPa}$. Az érték 43, 50 és 55 minőségű acélokra azonos ($R_y = 275; 355; 450 \text{ MPa}$).

A lokális övhorpadási feltétel

Terhelése kétirányú hajlítás (1 index - x, b index - y irányú) az f index a flange-öv rövidítése.

$$m_{cf} + m_{bf} \leq 1, \quad (27)$$

$$\text{ahol } m_{cf} = \frac{\sigma_{1f}}{P_s K_{1f}}; m_{bf} = \left(\frac{\sigma_{bf}}{P_s K_{bf}} \right)^2 \quad (28)$$

A nyírást elhanyagoljuk: $m_{qf} = 0$,

$$\sigma_{1f} = \frac{M_x}{W_x} \quad \sigma_{bf} = \frac{M_y}{W_y} \quad (29)$$

K_{1f} és K_{bf} értékei a karcsúsági tényezőtől függenek. Mivel ez az összefüggés érdemben nem befolyásolja a probléma tárgyalását, de helyigényes, ezért nem részletezem. Az övlemez karcsúsági tényezője:

$$\lambda_f = \frac{b}{t_f} \sqrt{\frac{R_y}{355}} \quad \text{ahol } R_y \text{ a folyáshatár MPa-ban.} \quad (30)$$

Lokális főgerinchorpadási feltétel (a sín alatti), a w index a web-gerinc rövidítése.

Terhelése kétirányú hajlítás (1-x, b-y irányú), nyírás (q index), kontakt nyomás (c index)

$$m_{cw} + m_{bw} + 3 m_{qw} \leq 1, \quad (31)$$

$$\text{ahol } m_{cw} = \sqrt{m_{1w} + m_{2w}}; m_{1w} = \left(\frac{0.8 \sigma_{1w} + \sigma_{bw}}{P_s K_{1w}} \right)^2; m_{2w} = \left(\frac{\sigma_{cw}}{P_s K_{2w}} \right)^2, \quad (32)$$

$$m_{bw} = \left(\frac{0.2 \sigma_{1f}}{P_s K_{bw}} \right)^2; m_{qw} = \left(\frac{\tau}{P_s K_{qw}} \right)^2; \sigma_{bf} \cong \sigma_{bf}. \quad (33)$$

A kontakt nyomás $\sigma_{cw} = \frac{F}{t_w a_w}$; ahol a_w a macskakerék felfekvési hossza a sínen.

A számításnál úgy vesszük figyelembe, hogy a gerinc a szakirodalom által ajánlottan a felső 1/5 magasságában hosszirányú merevítővel van ellátva, a két gerinclemezz rész külön vizsgálendő horpadásra.

A nyírófeszültség jó közelítéssel a következő:

$$\tau = \tau_0 + \tau_1 = \frac{F S_x}{I_x (t_{w1} + t_{w2})} + \frac{(b - x_c) F}{2 A_x t_{w1}}, \quad (34)$$

$$\text{ahol } S_x = \frac{b t_f h}{4} \text{ a statikai nyomaték,} \quad (35)$$

$$A_x = h b. \quad (36)$$

A különféle igénybevételekhez tartozó K_{1w} , K_{2w} , K_{bw} és K_{qw} tényezők a karcsúsági tényezők ismeretében számíthatók.

$$\text{A felső gerincrész hajlításánál: } \lambda_w = \frac{0.2h}{t_{w1}} \sqrt{\frac{R_y}{355}} \quad (37)$$

$$\text{A kontakt nyomásnál: } \lambda_c = \frac{h_w}{t_{w1}} \sqrt{\frac{R_y}{355}} \quad \text{ahol } h_w = 1.9 \sqrt{\frac{a_w h}{5 K_w}}, \quad (38)$$

$$K_w = (3.4 + \frac{2.2h}{5a_d})(0.4 + \frac{a_w}{2a_d}); a_d \text{ a diafragmák távolsága.} \quad (39)$$

A segédgerinc lokális horpadása

A képletek a (27)-(37)-nek megfelelőek, de t_{w1} helyett t_{w2} értékét kell alkalmazni. Itt nincs helyi nyomás.

$$\text{Lehajlási feltétel } w_{\max} = \frac{H / 4 (L - k)}{48 E I_x} (3L^2 - (L - k)^2) \leq w_p, \quad (40)$$

ahol $w_p = L / (800 - 1000)$ a lehajlási határérték.

Optimálás

Négy célfüggvény (anyagköltség, hegesztési költség, felületelőkészítési költség, összköltség) és 16 egyenlőtlenségi feltétel (statikus feszültség, fáradási feltétel, övlemezhorpadás, fő- és segédgerinc horpadás, statikus lehajlás, mint implicit feltételek, valamint 10 explicit feltétel (a változó méretek alsó és felső hatáira) esetén határoztuk meg a szekrényszelvény optimális méreteit.

A számpélda adatai a következők:

$H = 240$ kN; $L = 25$ m, $G_f = 30$ kN, $k = 2.5$ m, sínmagasság $h_r = 50$ mm, $p_r = 80$ kg/m, $d = 20$ mm, $E = 2.06$ GPa, class A7, lehajlási határ $L/1000$, acélminőség Fe 430. Gerincmerezítők mérete 120 mm * 80 mm * 8 mm- es szögacél.

Az eredményeket a 1. táblázat mutatja.

A gerincmagasságnál a diszkrét értékek 20 mm-enként, a lemezvastagságoknál 1 mm-enként, az övlemezszélességnél 10 mm-enként követik egymást.

Általánosítás

A különböző futtatások alapján a levonható következtetések: a döntéstámogató programrendszer hatékonyan használható a daru hídfőtartó méretezésére. A súlyozó tényezők (w_i) változtatásával kapott optimumok lehetőséget adnak a tervezőnek, hogy válogathasson az optimumok között, esetleg más, kevésbé megfogható szempontot (pl. esztétikai) vegyen figyelembe.

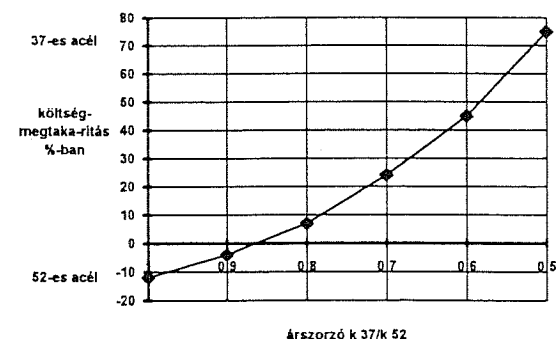
	h	Változók (mm)			t_f	1. Össz- * 10^3 \$	2. Anyag- * 10^3 kg	3. Hegesztési- * 10^3 \$	4. célfüggvény Felületelők. i költség * 10^3 \$	
1. célfgv.	1360	6	5	590	10	5.94	5.26	1.02	1.11	
2. célfgv.	1400	6	5	610	9	5.95	5.18	1.02	1.14	
3. célfgv.	1120	6	5	490	20	6.21	6.27	1.00	0.91	
4. célfgv.	840	16	5	880	20	12.08	10.38	4.89	0.68	
Min.-max.	1060	6	5	660	17	6.42	6.70	1.00	0.86	
Global 1 típus	1040	6	5	580	20	6.43	6.81	1.00	0.85	exp.1.
exp: 2	1320	7	6	350	19	6.64	5.98	1.43	1.07	
exp: 3	1080	6	5	830	13	6.42	6.58	1.01	0.88	
Global 2 típus	1100	8	7	870	11	7.65	7.00	1.89	0.89	exp.3.
Súlyozott										
min.-max.	1120	6	5	610	16	6.23	6.26	1.01	0.91	$w_1=0.7; w_2=0.1$
	900	6	5	880	19	7.27	8.52	0.99	0.73	$w_4=0.7; w_1=0.1$
Súlyozott global										
	1200	6	5	760	11	6.16	5.88	1.01	0.98	$w_2=0.7; w_1=0.1$
	1080	6	5	890	12	6.41	6.53	1.01	0.88	$w_3=0.7; w_1=0.1$
Egyszerű súlyozás										$w_1=w_1=1$
	1260	6	5	500	14	5.92	5.47	1.01	1.02	$w_3=6; w_4=10$
Normált súlyozás										
	1220	6	5	430	18	5.97	5.68	1.01	0.99	$w_1=0.7; w_1=0.1$
	1380	6	5	380	17	6.02	5.52	1.02	1.12	$w_2=0.7; w_1=0.1$
	1180	6	5	880	10	6.24	6.01	1.01	0.96	$w_3=0.7; w_1=0.1$
	880	6	5	860	20	7.32	8.66	0.99	0.72	$w_4=0.7; w_1=0.1$

1. táblázat

Összehasonlítás, paramétervizsgálat

Kimutattam, hogy a négy célfüggvény közül a felületelőkészítési költség hatása jelentős a többi költségre, a híd tömegénél és összköltségénél 30-35%-os, a hegesztési költségnél 480 %-os költségnövekedést is okozhat. Inercianyomaték Magyarázata az, hogy ha az inercianyomaték kisebb, mint a lehajlási feltétel miatt szükséges inercianyomaték a csökkenő gerincmagasság révén, akkor a vastagságot kell megnövelni. A híd tömegére illetve a hídköltségre végzett optimalizálás hatása a másik célfüggvényre kicsi, 3 % körüli növekedést jelent.

Meghatároztam a növelt folyáshatárú acélok alkalmazásának gazdaságosságát. Kimutattam, hogy 52-es acél alkalmazása ($R_y=355$ MPa) az adott terhelés és fesztáv esetén 12 % körüli tömegcsökkenést eredményez (3. ábra). Az ábráról leolvasható, hogy adott költségarány esetén az egyik minőségű acél alkalmazása mennyivel olcsóbb, vagy drágább a másik minőségű acél alkalmazásához képest. Az ok, hogy csak ilyen kicsi a különbség a költségben az 52-es acél alkalmazása esetén az, hogy a lehajlási és a fáradási feltétel nem függenek az anyagminőségtől.



3. ábra.

További megfontolások: korábban elvégeztem daruzott csarnokkeret optimális méretezését. A két szerkezetnél az optimalizálás önállóan is elvégezhető. A daru hídfőtartó és a daruzott csarnokkeret összekapcsolódó gazdaságos méretezése az összetettebb szerkezet többszintes optimalizálását valósítja meg [3].

3. PROFILOS FEDŐRÉTEGŰ SZENDVICSTARTÓK OPTIMÁLIS MÉRETEZÉSE

Szendvicsszerkezeteket először repülőgépeknél alkalmaztak (Bert, Francis 1974). Majd elterjedt a gépiparban és az építőiparban is (Emerson 1974, Hammill, Andrew 1974, Farah, Ibrahim, Green 1977). Statikus vizsgálatokat végzett szendvicselemeknél Allen (1969), Grosskopf, Winkler (1973). Sokan foglalkoztak szendvicselemek stabilitásvizsgálatával (Pearce, Webber 1971, Pomázi 1987), fáradásával (Dwyer 1976).

Szendvicselemek optimalizálásával Tímár (1985) foglalkozott, szendvicstartókkal Markus, Oravsky, Simkova (1974). Profilos fedőrétegű szendvicstartó analízisével Yin, Kelly, Barry (1967). Mi a profilos fedőrétegű szendvicstartók optimális méretezésével foglalkoztunk.

A kandidátusi értekezésben kidolgozott gazdaságos profilos fedőrétegű szendvicstartók méretezését alkalmaztam új anyagok, más geometriájú szerkezetek vizsgálatára az 1. tételben ismertetett módszerek (4. ábra), továbbá statikus és dinamikai mérések szoros összekapcsolásával. 9 cikkem foglalkozik szendvicsszerkezetekkel. Jelentősebbként a [2]-t emlitem. Saját rész 70%, Farkas József professzor 20%, a diplomatervezők és Igaz Antal doktorandusz összesen 10%.

3.1. A kandidátusi értekezésben is végeztem statikus vizsgálatokat, de diplomatervezők, doktorandusz segítségével újabb méréseket végeztünk, újabb anyagokat és szendvicstartókat vizsgáltunk meg. A mérésnél használt Brüel-Kjaer műszerek újabb elemekkel gyarapodtak, pl. kétcsatornás spektrumanalizátor, tesztalapács, vezérgenerátor, melyek pontosabb méréseket tesznek lehetővé. Meghatároztam a profilos szendvicstartók alakváltozását, a feszültségeloszlást a szerkezetben, a rétegek anyagjellemzőit. Kimutattam, hogy a nyírást a magréteg és a fedőprofilok gerinclemeze veszi fel. Igazoltam a mért és a számított értékek egyezését. Például az általam vizsgált szerkezetnél a feszültségeknél az eltérés 1 + 4 % körüli.

3.2. A Brüel-Kjaer rezgésmérő műszerekkel végzett dinamikai vizsgálatokkal meghatároztam a szendvicstartó rezgéscsillapítási tényezőit, sajátfrekvenciáit, feszültségeit, a dinamikus anyagjellemzőket. Igazoltam a mért és számított értékek egyezését. Például a rezgéscsillapítási tényezőnél az eltérés 2 %-on belüli. A tartó rezgéscsillapítási tényezője $\eta = 0,104$ -ig növekszik adott anyag és hőmérséklet esetén, változva a feszültség szint és a sajátfrekvencia függvényében.

3.3. Az analitikus vizsgálatok alapján elvégeztem a háromrétegű szendvicstartók gazdaságos méretezését feszültség-, lehajlás-korlátozási, rezgéscsillapítási, öv- és gerinchorpadási és geometriai méretkorlátozási feltételek esetén, négy célfüggvény - fedőlemezek, maganyag térfogata, ragasztási felület, összköltség - mellett. Meghatároztam a célfüggvények egymásra és a méretekre gyakorolt hatását. A maganyagköltség hatása a legnagyobb a többi célfüggvényre, 80 %-os növekedést is okozhat.

Szemléltetésül az alábbiakban elvégeztem egy profilos fedőrétegű szendvicstartó optimális méretezését [2] alapján.

Probléma megfogalmazása

Háromrétegű szendvicstartó optimális méretezése, jó csillapítóképességre és nagy hajlítási merevségre törekedve.

Cél meghatározása, célfüggvények

Az alumínium profilok anyagköltsége:

$$f_{Al}(x) = (A_1 + A_3) L C_{Al} (\$), \quad (41)$$

ahol $A_1 = 2 h_1 t + 2 b t = A_3$ az 5. ábrának megfelelően, L a fesztáv, $C_{Al} = 400 \text{ \$/m}^3$ a alumínium anyagköltsége (1630 \\$/t), és a sűrűség $\rho_{Al} = 2.7 \text{ kg/dm}^3$.

A maganyag (középső réteg, gumiréteg) anyagköltsége:

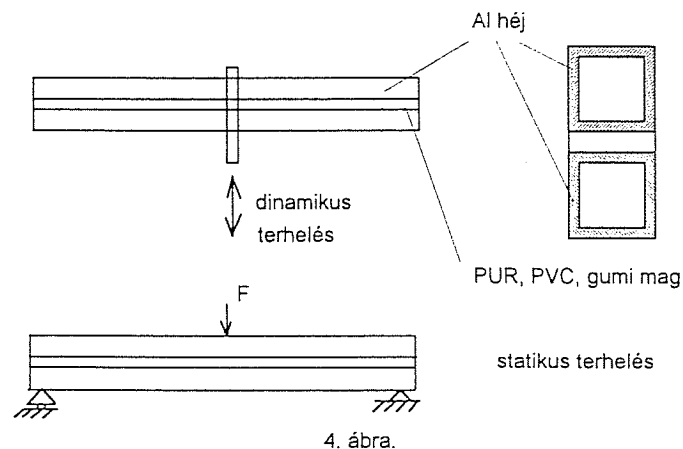
$$f_{co}(x) = L b h_2 C_{co} (\$), \quad (42)$$

ahol $\rho_{co} = 1.25 \text{ kg/cm}^3$ a sűrűség, a $C_{co} = 1000 \text{ \$/m}^3$ a költségtényező (800 \\$/t).

Ragasztási és felületelőkészítési költségek:

$$f_{gl}(x) = 2 L b C_{gl} (\$), \quad (43)$$

ahol $C_{gl} = 20 \text{ \$/m}^2$ a ragasztási költségtényező.



Összköltség, mely az előző három célfüggvény összege:

$$f_o(x) = f_{Al}(x) + f_{co}(x) + f_{gl}(x). \quad (44)$$

Modell alkotás

Az analízis során a Kerwin (1965) és Ungar (1962) modellt használtuk a rétegezett tartóra.

Szerkezet analízis

Szakítógépen először meg kellett mérni a magréteg statikus nyírási rugalmassági modulusát. Példáknál, egy vékony gumirétegnél $G_s = 2.36 \text{ N/mm}^2$. A Young-féle rugalmassági modulus az alumínium fedőrétegeknél $E_{Al} = 70 \text{ MPa}$.

A háromrétegű szendvicstartó statikus viselkedését a Allen (1969) által kidolgozott feltételezésekkel és összefüggésekkel számíthatjuk.

- a mag merevsége elhanyagolható, a fedőrétegek veszik fel a normálfeszültséget, a magban a nyírófeszültség állandónak vehető,
- a magréteg keresztirányú feszültsége elhanyagolható,
- a fedőrétegek nyírási alakváltozása elhanyagolható,

A feszültségekre és a lehajlásra vonatkozó összefüggések ezek alapján a következők:

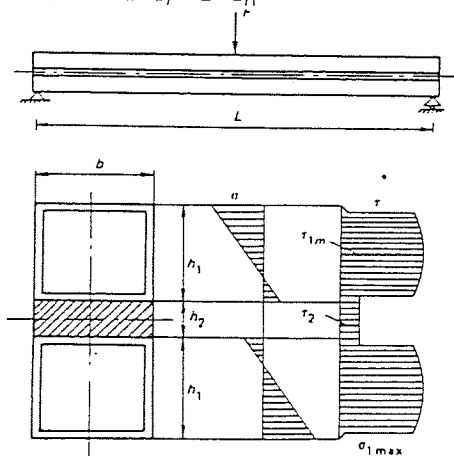
$$\text{maximális lehajlás } w_{\max} = \frac{F_1 L^3}{48 B_f} + \frac{F_1 L}{4 B_2} \left(1 - \frac{F_{f1}}{B_f}\right) S_1, \quad (45)$$

maximális nyírófeszültség a magrétegben:

$$\tau_2 = -\frac{F_1}{2b(h_1 + h_2)} \left(1 - \frac{B_{f1}}{B_f}\right) S_2, \quad (46)$$

maximális normálfeszültség a fedőrétegekben:

$$\sigma_{\max} = B_f \frac{F_1 L}{4} \left[\left(h_1 + \frac{h_2}{2}\right) \frac{S_2}{B_f} + \frac{h_1}{2} \frac{1 - S_2}{B_{f1}} \right]. \quad (47)$$



5. ábra

ahol $B_f = B_{f1} + B_{f2}$ fedőréteg hajlítási merevség; $B_{f1} = 2E_f A_1 \left(\frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2}\right)^2$; maganyag

hajlítási merevség $B_2 = G_s \frac{b H^2}{12}$; inercianyomaték $I_1 = \frac{(h_1 - 2t)^3 t}{6}$; $H_{13} = \frac{h_1 + h_2}{2}$

keresztmetszet-terület $A_1 = 2(h_1 - 2t)t + 2bt$; $S_1 = 1 - \frac{shQ + \beta_1(1 - chQ)}{Q}$; $S_2 = 1 - \sqrt{1 - \beta_1^2}$

$S_3 = 1 - \frac{\beta_1}{Q}$; $Q = \frac{1}{2} \frac{B_{f1}}{L^2 B_2} \left(1 - \frac{B_{f1}}{B_f}\right)^{1/2}$; $a^2 = \frac{B_f B_2}{B_{f1}(B_f - B_{f1})}$; $\varphi = a L$; $\beta_1 = \frac{shQ - (1 - chQ)thQ}{shQthQ + chQ}$

szelvényméretek az 5. ábra alapján. Ezen összefüggéseket Allen egy koncentrált erőre, Grosskopf és Winkler (1973) két koncentrált erőre és megoszló terhelésre vezette le.

$$\text{A fedőrétegekben a nyírófeszültség: } \tau_1 = \frac{1}{2} \frac{F - \tau_2 b h_2}{4t(h_1 - 2t)}. \quad (48)$$

A feszültségeloszlást az 5. ábra mutatja. Sokféle anyagot megvizsgáltunk, különféle összetételű és vastagságú gumirétegeket, különféle PVC habokat, polisztirol habokat, poliizocianát keverék habokat. A mért és számított értékek között jó egyezést kaptunk csakúgy, mint a 2. táblázatban közölt gumiréteg esetén.

A tartó adatai: $L=1500$; $b=h_1=40$; $h_2=5$; $t=2$ (mm); $F=7 \cdot 10^4$ (N).

A szendvicstartó dinamikus vizsgálatát Mead és Markus (1965) alapján végezzük.

$$\frac{\partial^6 w}{\partial x^6} - g_0(1 + Y) \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = \left(\frac{1}{B_{f1}}\right) \left(\frac{\partial^4 p_0}{\partial x^4} - g_0 p_0\right), \quad (49)$$

ahol w a rezgés irányába eső alakváltozás, $p_0 = -m \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + p(x, t)$; szimmetrikus tartó esetén

$g_0 = \frac{2G_d b}{A_f E h_2}$; a geometriai paraméter $Y = \left[\frac{(h_1 + h_2)^2}{2B_{f1}}\right] A_1 E$; G_d a dinamikus nyírási

rugalmassági modulusz, E a Young-féle rugalmassági modulusz.

2. táblázat A mért és számított statikus eredményeket mutatja

F (N)	w_m (mm)	w_c	σ_m (MPa)	σ_c	τ	τ_{hc} (MPa)	τ_{hm}
350	11	14.2	14.36	14.44	0.04	0.59	0.58
613	22	24.9	23.78	25.27	0.07	1.03	0.98
924	38	37.7	35.90	38.11	0.11	1.56	1.51
1177	49	47.9	47.56	48.50	0.14	1.99	1.92
1429	65	58.3	54.74	58.89	0.17	2.42	2.39
1656	72	67.6	64.61	68.29	0.19	2.83	2.79
1888	84	77.0	74.49	77.92	0.22	3.21	3.29
2134	94	87.0	83.46	87.97	0.25	3.65	3.71
2365	105	96.4	94.23	97.48	0.28	4.02	4.36
2609	115	106.4	100.5	107.5	0.31	4.43	4.52
2839	125	115.8	109.4	117.0	0.33	4.82	4.99

A tartó csillapítási tényezőjét jó közelítéssel Ungar (1962) alapján határozhatjuk meg:

$$\eta = \frac{\beta X Y}{1 + (2 + Y)X + (1 + Y)(1 + \beta^2)X^2}, \quad (50)$$

ahol a nyírási paraméter $X = g_0 r_k^2$; $r_k = CL/2\pi$; C függ a peremfeltételtől, szabad végű tartó és első rezgéskép esetén $C=2$.

A dinamikai vizsgálathoz szükséges a beépített anyagok dinamikai jellemzőinek ismerete, melyeket szintén mérésrel határozhatunk meg Jones, Parin (1972) alapján. Nagyon fontos, hogy az anyagjellemzők közel azonos sajátfrekvencián és feszültség szint mellett legyenek mérve, mint ami a tartó rezgetésekor adódik.

A vizsgált gumirétegnél a csillapítási tényező $\beta=0.18$ adódott a mérés alapján, a nyírási paraméter $X=1.898$, a geometriai paraméter $Y=0.04363$; értéküre adódott a számítás alapján. A tartó csillapítási tényezője így $\eta_c = 0.04363$ az Ungar képlet alapján. Oberst (1952) alapján

meghatározhatjuk a Brüel & Kjaer mérőműszerek segítségével az η_m mért értékét a félteljesítményhez tartozó sávzsélesség módszerével. $\eta_m = 0.04369$ - re adódott, ami nagyon jó egyezést mutat ebben az esetben is a számított értékkel.

Az analízis részből következtetésként vonhatjuk le, hogy mind a statikus, mind a dinamikus vizsgálatok jól követhetők méréssel és számítással, az eredmények jó egyezést mutatnak.

	1.	2.	3.	4.célfüggvény	
Változók	Össz klts.	Fedőlem.klts.	Magany.klts.	Ragaszt.klts.	
h_i t_w b_i t_f					
(mm)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)	
1. cfgv.	60; 2; 40; 17	8.48	5.06	1.02	2.40
2. cfgv.	50; 2; 40; 28	8.62	4.54	1.68	2.40
3. cfgv.	80; 7; 30; 5	9.76	17.74	0.23	1.80
4. cfgv.	80; 8; 25; 16	20.89	18.79	0.60	1.50
min-max					
	75; 3; 35; 7	10.70	8.23	0.37	2.10
global 1 exp : 1					
	80; 3; 30; 14	10.66	8.24	0.63	1.80
global 2 exp : 3					
	70; 3; 40; 5	10.94	8.24	0.30	2.40
súlyozott min-max	$w_1 = 0.7; w_i = 0.1$				
	65; 3; 40; 7;	10.66	7.84	0.42	2.40
	$w_2 = 0.7; w_i = 0.1$				
	60; 3; 40; 10;	10.44	7.44	0.60	2.40
	$w_3 = 0.7; w_i = 0.1$				
	80; 3; 35; 5;	10.99	8.63	0.26	2.10
	$w_4 = 0.7; w_i = 0.1$				
	80; 3; 30; 10;	10.49	8.24	0.45	1.80
	$w_i = 0.25$				
	70; 3; 40; 5;	10.94	8.24	0.3	2.40
súlyozott global	$w_1 = 0.7; w_i = 0.1$				
	75; 3; 35; 7;	10.70	8.24	0.36	2.10
	$w_2 = 0.7; w_i = 0.1$				
	60; 3; 45; 6;	10.94	7.84	0.405	2.70
egyszerű súlyozás	$w_1 = w_2 = 1; w_3 = 30; w_4 = 5$				
	80; 3; 35; 5;	10.99	8.63	0.26	2.10
normált súlyozás	$w_1 = 0.7; w_i = 0.1$				
	65; 3; 40; 7;	10.66	7.84	0.42	2.40
	$w_3 = 0.7; w_i = 0.1$				
	80; 3; 35; 5;	10.99	8.63	0.26	2.10

3. táblázat

Optimálás

A méretezési feltételek a következők:

- normálfeszültségi feltétel a fedőrétegben hajlítás esetén:

$$\sigma_{\max} \leq \sigma_{adm} = \frac{R_y}{n_\sigma} = 80 \text{ MPa} ; \text{ ahol } R_y \text{ a folyáshatár, } n_\sigma \text{ a biztonsági tényező } 1.8. \quad (51)$$

- nyírófeszültség-korlátozási feltétel a magrétegben:

$$\tau_{2\max} \leq \tau_{2adm} = \frac{\tau_y}{n_\tau} ; \text{ ahol } n_\tau = 3.0 \quad \tau \text{ értékét statikusan kell mérni.} \quad (52)$$

- lehajlási feltétel:

$$w_{\max} \leq w_{adm} = c_a L , \quad (53)$$

c_a értéke gépészeti szempontból 1/500, 1/1000 között lehet, építészeti szempontból 1/200, 1/300 között. Az 1/400-as értéket választjuk.

- rezgéscsillapítási feltétel,

$$\eta \geq c_\eta \beta ; \text{ ahol } c_\eta = 0.08 \text{ legyen,} \quad (54)$$

vagyis a tartó rezgéscsillapítási tényezője a maganyaghoz viszonyítva ne legyen túl kicsi.

- helyi horpadási feltételek a profilos fedőrétegnél:

$$\delta_{\min 1} \leq \delta_1 = \frac{t}{h_1} ; \quad \delta_{\min 2} \leq \delta_2 = \frac{t}{b} . \quad (55)$$

a gerinc és övlemezre.

$$\delta \text{ értékei meghatározhatók } \frac{1}{\delta(E, \sigma)} = \frac{1}{\delta_{\min}} \sqrt{\frac{E_{acel} \sigma_{\max}}{E_{Al} \sigma_{adm}}} \text{ kifejezésből.} \quad (56)$$

Mivel hegesztés nincs az Al profilnál, ezért δ értékeire 1/30 és 1/20 értékeket veszünk fel az övnél és a gerincnél.

Az alkalmazott költségtényezőkkel az vizsgált gumiréteggel ellátott szendvicstartó optimumait a 3. táblázat tartalmazza.

Általánosítás

Az alkalmazott szendvicstartó modell jól alkalmazható az optimális méretezésnél. A számítási eredmények jól írják le a szerkezet viselkedését. A tartó viszonylag nagy hajlítási merevséggel és jó rezgéscsillapító képességgel rendelkezik. Nagy szerepe van ebben a maganyag jó megválasztásának. Az optimalizálással tovább javíthatók a szerkezet jellemzői.

Összehasonlítás, paramétervizsgálat

A célfüggvények közül a ragasztási és a maganyag költségének van jelentős hatása az összköltségre.

A fedőlemezköltséget leginkább a maganyagköltség befolyásolja. Drágább maganyag esetén csökken a mag vastagsága, így a fedőréteg inerciáját növelni kell. A ragasztási költséget elsősorban a fedőréteg költsége befolyásolja.

A különböző súlyozótényezők által kapott nagy számú Pareto optimum lehetővé teszi a tervezőnek, hogy a neki leginkább szimpatikus megoldást válassza, figyelembe véve egyéb

tényezőket (esztétikai, beépítési, stb).

4. RÁCSOS CSŐSZERKEZETEK OPTIMÁLIS MÉRETEZÉSE

Csőszerkezetek, tartószerkezetek analitikus vizsgálatával régóta foglalkoznak (Michell 1904), mivel elterjedt szerkezet. Külön konferenciákat rendeznek a csőszervezet, a csomópontok analitikus és kísérleti vizsgálatáról, a különleges terhelések figyelembevételéről (Tubular structures I-V. Int. Symposiums, Tokyo, Boston, Delft, Nottingham, Lappenranta), Niemi (1993), Farkas (1993). A optimálással foglalkozó szakemberek szintén szívesen használják a rácsos tartókat, különösen egy 10 rúdelemből álló síkbeli rácsos tartót az optimáló módszerek hatékonyságának bemutatására (Optimization of Large Structural Systems, NATO/DFG ASI Seminar, Berchtesgaden 1991), Svanberg (1991b). Az általunk végzett vizsgálatok összekapcsolják a két terület eredményeit és a gyakorlathoz közelálló és optimális szerkezetet eredményeznek.

Kidolgoztam rácsos csőszervezetek optimális méretezését (6. ábra) úgy, hogy összekapcsolásra kerültek a szerkezetanalízishez szükséges síkbeli rácsos tartókra vonatkozó végeleemes alprogram és a szerkezetoptimalás matematikai módszerei. 7 cikkem foglalkozik ezen témával. Jelentősebbként a [11,15]-öt említeném. Saját rész 70%, Farkas professzor 30%.

4.1. Analitikus vizsgálatok alapján kidolgoztam rácsos csőszervezetek gazdaságos méretezését az egyes rúdelemeknél normálfeszültség-korlátozási, kihajlási, a tartószerkezet lehajlás-korlátozási, csomóponti stabilitási, valamint geometriai méretkorlátozási feltételei mellett. A méretezés szállítószalaghíd-szerkezet tervezését teszi lehetővé továbbfejlesztés révén.

4.2. Elemeztem az egyes rúdelemek méreteinek alakulását, a vizsgált szerkezetnél, a övrudak távolsága függvényében. Ha az oszloptávolság 'a', akkor az optimális övrudtávolság, vagyis a híd magassága $h = \omega a$, ahol $\omega = 1.25$.

Szemléltetésül elvégeztem egy síkbeli rácsos tartó optimális méretezését [15] alapján.

A probléma megfogalmazása

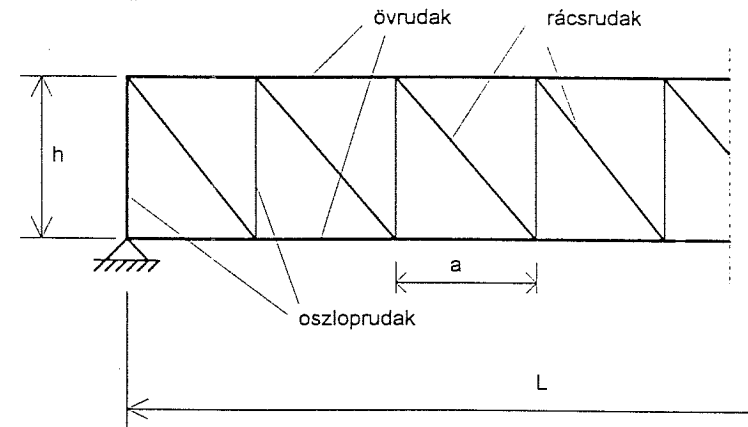
Rácsos tartó optimális méretezése térfogat, vagy tömegminimumra.

A cél meghatározása

A rácsos tartó térfogata legyen minimális, ami adott anyag esetén minimális tömeget is jelent.

Modellalkotás:

Ez a fajta rácsos tartó síkbeli szerkezetként számítható (6. ábra). A síkbeli szerkezet három különféle elemet tartalmaz, az övet, a rácsrudat és az oszlopot. Ezek vékonyfalú négyzetcsövek. Az egyenletesen megoszló terhelést a tartó csomópontjaiba redukáljuk koncentrált erőként.



6. ábra

A méretezési feltételek a következők:

1., - 6., méretkorlátozás feltételek:

- 1., $x[1] = b_0$ övrúd szélessége,
- 2., $x[2] = t_0$ övrúd vastagsága,
- 3., $x[3] = b_1$ rácsrúd szélessége,
- 4., $x[4] = t_1$ rácsrúd vastagsága,
- 5., $x[5] = b_2$ oszloprúd szélessége,
- 6., $x[6] = t_2$ oszloprúd vastagsága.

(57)

7., - 15., geometriai feltételek:

a különféle rudak szélességi aránya,

$$7., x[7] = b_1/b_0,$$

$$8., x[8] = b_2/b_0,$$

$$9., x[9] = b_1/b_2,$$

a különféle elemek lemezkarcúsági aránya,

$$10., x[10] = b_0/t_0,$$

$$11., x[11] = b_1/t_1,$$

$$12., x[12] = b_2/t_2,$$

Az oszlop és a rácsrúd közötti szög:

határérték

$$0.5 \leq x[7] \leq 1.0,$$

$$0.5 \leq x[8] \leq 1.0,$$

$$1.0 \leq x[9] \leq 2.0,$$

$$15 \leq x[10] \leq 40,$$

$$15 \leq x[11] \leq 35,$$

$$15 \leq x[12] \leq 32,$$

$$13., x[13] = \sin \Theta.$$

$$0 \leq x[13] \leq 1.0.$$

Az átlapolás:

$$14., x[14] = \frac{p}{q} = 0.5 - \frac{2e + b_0}{2 \cdot b_1} \cos \Theta + \frac{b_2 \cdot \sin \Theta}{2 \cdot b_1};$$

$$0.5 \leq x[14] \leq 0.8,$$

Θ az övrúd és a rácsrúd által bezárt szög.

Excentricitás:

$$15., x[15] = 0.45 \cdot b_0, \quad -0.55 \cdot b_0 \leq x[15] \leq 0.25 \cdot b_0. \quad (58)$$

16., - 18., feszültségi feltételek:

$$16., x[16] = A_0 = 3.72 \cdot b_0 \cdot t_0, \quad A_0 \geq \frac{F_c}{\sigma_{adm}}, \quad \sigma_{adm} = 160 \text{ [MPa]},$$

$$17., \text{ és } 18., A_1 - \text{et és } A_2 - \text{öt tartalmazza } A_0 \text{ helyett.} \quad (59)$$

19., - 20., a rúdelemek kihajlása:

$$N \leq \kappa \cdot N_{pl},$$

ahol N a nyomóerő,

κ a redukciós tényező,

$N_{pl} = A \cdot R_y$ a képlékeny állapothoz tartozó erő,

R_y a folyáshatár,

λ a karcsúsági tényező, $\lambda = \frac{kL}{\lambda_E r}$,

$$\kappa = \frac{N_{cr}}{N_{pl}} = \frac{1}{2\lambda^2} (\psi - \sqrt{\psi^2 - 4\lambda^2}),$$

$$\psi = 1 + \alpha(\lambda - 0.2) + \lambda^2,$$

$\alpha = 0.206$ az Eurocode 3. szerint.

Az övrúd nyomóerejére vonatkozó feltétel:

$$19., x[19] = N, \quad x[19] \geq 1.5 F_{chord}.$$

Az oszloprúd nyomóerejére vonatkozó feltétel:

$$20., x[20] = N, \quad x[20] \geq 1.5 F_{column}. \quad (60)$$

21. A rácsrúd nyírási kiszakadására vonatkozó feltétel Packer et al (1992) alapján:

a rácsrúdak nyírási kiszakadása, az övrúd kritikus ereje N_{cr} ,

$$21., x[21] = N_{cr} = R_y \cdot t_1 (2h_1 - 4t_1 + b_e + b_{eu}), \quad x[21] \geq 1.5 F_{diag} \quad (61)$$

$$\text{ahol } b_e = \frac{10 t_0}{b_0 t_1} b; \quad b_{eu} = \frac{10 t_1}{b_1 t_2} b_1.$$

A célfüggvény a szerkezet térfogata, mely adott anyagminőség esetén arányos a tömegével

$$V = \sum_i A_i L_i, \quad (62)$$

ahol A_i és L_i a keresztmetszet-területek és rúd hosszúságok.

Az optimalálás során végeselemes alprogram számítja ki a rúdelemek. A rúdelemek diszkrét értékeit a DIN 59410 (1978) alapján adtuk meg. Mintapélda: a feszítáv 25 m, a tartó magassága 2.2 m, a csomóponti terhelések 12.5 KN. Az eredmények a 4. táblázaton láthatók.

Aktív feltételek az övrúd és az oszloprúd kihajlása, valamint az övrúd nyírási kiszakadása voltak.

Általánosítás

A kifejlesztett programrendszer alkalmas síkbeli és térbeli rácsos tartók tömegminimumra méretezésére. Itt az optimalálás egycélfüggvényes, a végeselemes programmal összekapcsolt, relatív nagyméretű program miatt.

	kerekítetlen értékek	kerekített értékek
Övrúd szélesség x(1)	94.753	100
Övrúd vastagság x(2)	3.669	3.6
Rácsrúd szélesség x(3)	67.241	70
Rácsrúd vastagság x(4)	2.938	3.2
Oszloprúd szélesség x(5)	57.554	60
Oszloprúd vastagság x(6)	3.204	3.2

4. táblázat

Összehasonlítás

Elemeztem az egyes rúdelemek méreteinek alakulását, a vizsgált szerkezetnél, a övrúdak távolsága függvényében. Ha az oszloptávolság 'a', akkor az optimális övrúdtávolság, vagyis a híd magassága $h = \omega a$, ahol $\omega = 1.25$.

5. BORDÁZOTT LEMEZEK OPTIMÁLIS MÉRETEZÉSE

Bordázott lemezek, cellalemezek méretezésével számos könyv, cikk, tanulmány foglalkozik. Többségük elsődlegesen a lemezszerkezetek analízisét tárgyalja Szilárd (1974), Petersen (1979). Néhány foglalkozik ezen szerkezetek optimális méretezésével is Farkas (1982, 1984). A általunk elvégzett szerkezetoptimalálásban egyrészt az analízis oldaláról újabb szempontokat vettünk figyelembe, másrészt nagyon részletes költségsszámítást végeztünk.

Kidolgoztam bordázott lemezek optimális méretezését, figyelembe véve a gyártási költségek hatását a szerkezet méreteinek kialakulására (7. ábra) 12 cikkem jelent meg eddig ebben a témakörben, részben társszerzőkkel. Legfontosabbként [6, 13, 14, 18] cikkeket említeném. Saját rész 50%, Farkas professzor 50%.

6.1. Analitikus vizsgálatok alapján kidolgoztam bordázott lemezek gazdaságos méretezését, figyelembe véve a normálfeszültség-korlátozási, fedőlemez- és bordahorpadási, a lemez lehajlás-korlátozási, valamint geometriai méretkorlátozási feltételeket.

6.2. Elemeztem a szerkezet anyag és megmunkálási költségeinek hatását az optimális méretekre. Kimutattam, hogy relatíve kicsi megmunkálási költségek esetén (Kelet-Európai gyártás) vékony és nagyszámú borda az optimum, relatíve nagy megmunkálási költségek esetén (Nyugat-Európai gyártás) vastag és kisszámú borda az optimum (8. ábra).

6.3. Elemeztem a növelt folyáshatárú acél alkalmazásának lehetőségeit. Kimutattam, hogy alkalmazása esetén 4-12 %-al csökken a költség (9. ábra).

Szemléltetésül ismertetem a négyszög alakú cellalemez optimális méretezését költségminimumra [13] alapján.

A probléma megfogalmazása

Négyszög alakú cellalemez méretezése feszültségi, stabilitási feltételek figyelembevételével.

Modellalkotás

Szélein szabadon felfekvő lemez, egyenletesen megoszló terheléssel, homogén izotróp anyaggal.

Célfüggvény

A bordázott lemez költségminimuma a cél, mely anyag- és gyártási költségeket tartalmaz.

Feltételezzük, hogy először a merevítő bordarács kerül meghegesztésre, a tartórács csomópontok pontos meghegesztésével, majd a borítólemezek kerülnek kívülről meghegesztésre (7. ábra). A merevítők folytonosak y irányban és szakaszosan összehegesztettek x irányban. A merevítők területe közelítőleg $2ht_f$, ahol h a merevítő magassága, t_f a vastagsága. A merevítő száma egész érték φ_x és φ_y a két irányban. A merevítők száma x - és y irányban φ_x+1 és φ_y+1 . Azonos bordaméretet feltételezve a cellalemez térfogata

$$V = 2 b_x b_y t_f + 2 b_x h t_{rx} (\varphi_y + 1) + 2 b_y h t_{ry} (\varphi_x + 1), \quad (63)$$

ahol t_f a fedőlemezek vastagsága. Az összköltség tartalmazza az anyag- és a megmunkálási költségeket:

$$K = K_m + K_f = k_m \rho V + k_f \Sigma T_i, \quad (64)$$

$$\text{más alakban} \quad K/k_m = \rho V + k_f/k_m (T_1 + T_2 + T_3), \quad (65)$$

ahol k_m (\$/kg) és k_f (\$/min) költség tényezők, az anyagra és a megmunkálásra vonatkozóan, ρ a sűrűség, T_i a megmunkálási időtartamok min.-ban.

Azért, hogy a számítás nemzetközileg is használható legyen költség tényező határokat veszünk fel az anyagköltségre Fe 360 acél esetén $k_m = 0.5-1.2$ \$/kg, a megmunkálási költség tényező, figyelembe véve a rezsis is $k_f = 15-45$ \$/óra = 0.25-0.75 \$/min. Így a k_f/k_m arány 0 - 1.5 kg/min. változik. $k_f/k_m = 0$ a minimális érték, amikor csak anyagköltség van. A megmunkálásnál a részidők számítására (T_i) Pahl és Beelich (1982) ajánlását alkalmaztuk

a./ Előkészítés, szerelés, összefűzés

$$T_1 = C_1 \delta \sqrt{\rho V \sqrt{\kappa}}; \quad C_1 = 1.0 \text{ min/kg}^{0.5}, \quad (66)$$

ahol δ a bonyolultsági fok, k a szerelt szerkezeti elemek száma. Az y irányú folytonos bordák száma φ_x+1 , x irányban a bordák darabokból állnak, száma $\varphi_x (\varphi_y-1)+2$, a borító lemezelemek száma $2\varphi_x \varphi_y$. A szerkezeti elemek összszáma:

$$\kappa = 3(\varphi_x \varphi_y + 1) \text{ és } T_1 = 3 \sqrt{\rho V \sqrt{3(\varphi_x \varphi_y + 1)}}.$$

(67)

b./ Hegesztés

$$T_2 = \Sigma C_{2i} a_{wi}^{1.5} L_{wi}, \quad (68)$$

$C_2' = 0.8 \cdot 10^{-3} \text{ min/(mm}^{1.5} \cdot \text{mm)}$ kézi ívhegesztésnél $C_2'' = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ min/(mm}^{1.5} \cdot \text{mm)}$ CO₂ hegesztésnél, ahol a_w és L_w a hegesztés dolgozó mérete és hossza mm-ben.

Feltételezzük, hogy a bordacsomópontokat kézi ívhegesztéssel, a fedőlemezdarabokat CO₂-vel készítik.

c./ Elektróda csere, salakolás

$$T_3 = \sqrt{\delta} \Sigma C_{3i} a_{wi}^{1.5} L_{wi}; \quad C_3' = C_2'; \quad C_3'' = C_2''. \quad (69)$$

A bordák merőleges csomópontjainak száma

$$2(\varphi_x + 1) + 2\varphi_x (\varphi_y - 1) = 2(\varphi_x \varphi_y + 1).$$

Feltételezzük, hogy a merevítők gerinclemezeit sarokvarrattal hegesztik, ahol a dolgozó méret $a_w = 0.7t_{ry}$ a merevítők öveinél $a_w = t_{ry}$ ezáltal $T_2 + T_3$ idők a következők [min]

$$T_2' + T_3' = (1 + \sqrt{\delta}) 0.8 \cdot 10^{-3} 2\varphi_x \varphi_y + 1 [ht_{ry}^{1.5} + 2h (0.7t_{ry})^{1.5}]. \quad (70)$$

A fedőlemez elemeknél a hegesztés összhossza

$$2\varphi_x \varphi_y (2a_x + 2a_y) = 4\varphi_x \varphi_y (b_x/\varphi_x + b_y/\varphi_y),$$

a varrat mérete $a_{wf} = 0.5 t_f$,

$$T_2'' + T_3'' = (1 + \sqrt{\delta}) 0.5 \cdot 10^{-3} (0.5t_f)^{1.5} \cdot 4\varphi_x \varphi_y (b_x/\varphi_x + b_y/\varphi_y). \quad (71)$$

Méretezési feltételek

a./ Rugalmas nyomófeszültségi feltétel a felső középső fedőlemezelemnél:

$$\sigma_{x,max} + \sigma_{xf,max} \leq \sigma_{adm}, \quad (72)$$

$$\sigma_{y,max} + \sigma_{yf,max} \leq \sigma_{adm}. \quad (73)$$

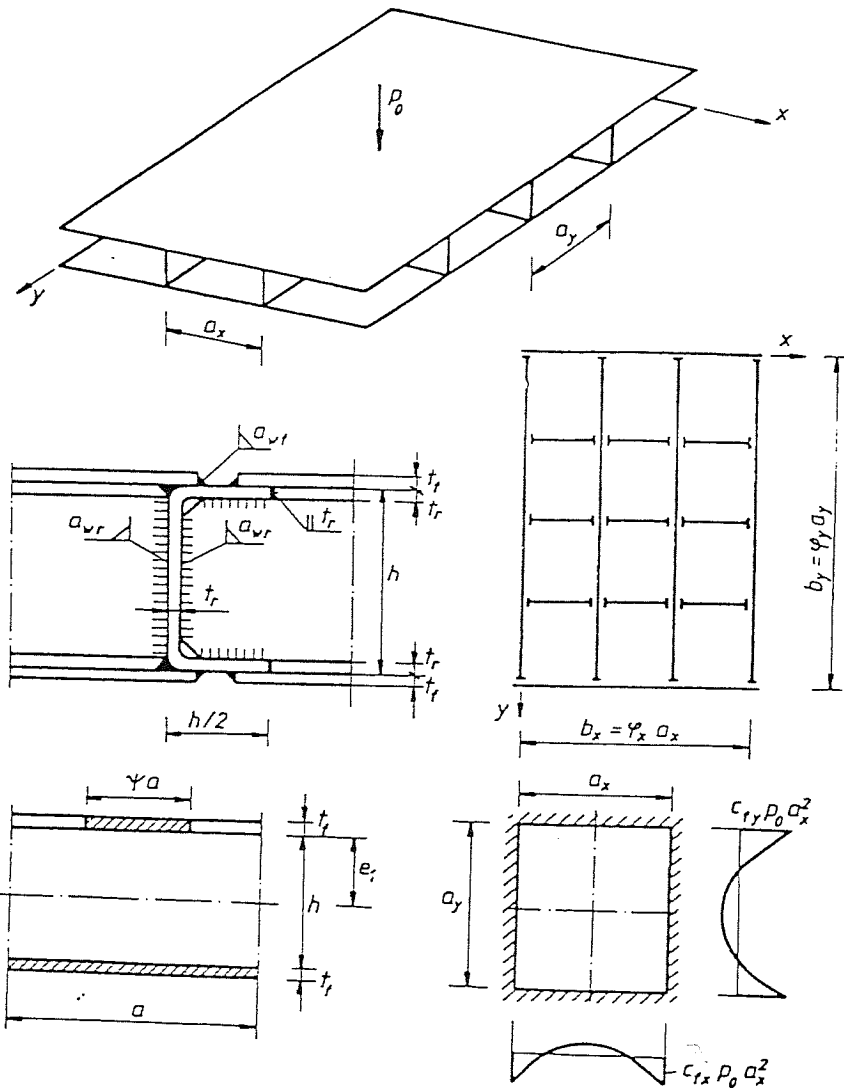
ahol σ_{adm} a megengedett feszültség. $\sigma_{x,max}$ és $\sigma_{y,max}$ a teljes lemez hajlításából, $\sigma_{xf,max}$ és $\sigma_{yf,max}$ a fedőlemez helyi hajlításából származó normál feszültségek.

Négyzetes cellalemezre igazolható, hogy a cellaelemek nagy csavarási merevsége miatt számolható izotróp lemezként (Farkas 1985):

$$\sigma_{x,max} = M_{xmax} E_1 e_1 / B; \quad \sigma_{y,max} = M_{ymax} E_1 e_1 / B. \quad (74)$$

Az izotróp lemezelmélet szerint (Timoshenko és Woinowsky-Krieger 1959)

$$M_{xmax} = c_{mx} \rho b_x^2 \quad \text{és} \quad M_{ymax} = c_{my} \rho b_y^2, \quad (75)$$



7. ábra

ahol $p = 1.1p_0$, az 1.1-es tényezővel az önsúly van figyelembe véve. c_{mx} és c_{my} a Timoshenko és Woinowsky-Krieger (1959) által megadott tényezők, szabadon felfekvő lemezvégek mellett (5. táblázat). A hajlítási merevséget B a nyomott fedőlemezlem együttmőködő lemezszélességével számoljuk.

$$B = E_1 I / a = E_1 h^2 t_f \psi / (1 + \psi); \quad e_1 = h / (1 + \psi); \quad E_1 = E / (1 - \nu^2), \quad (76)$$

ahol E a rugalmassági modulusz, ν a Poisson tényező.

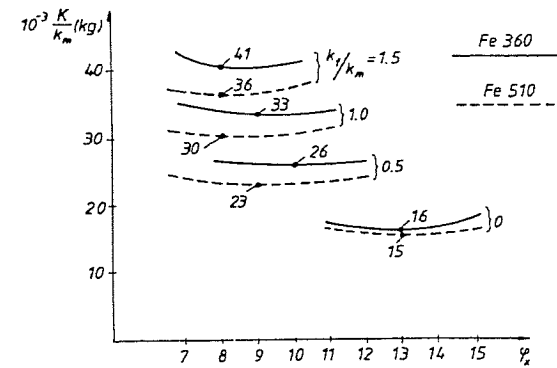
Az együttmőködő lemezszélességet Usami és Fukumoto (1982) ajánlása alapján határozzuk meg

$$\psi = 0.75 / \bar{\lambda}_p; \quad \bar{\lambda}_p = \frac{a}{t_f} \sqrt{\frac{12(1 - \nu^2) \sigma_{max}}{4\pi^2 E}} \quad \text{vagy} \quad \psi = 1.426 / \lambda_p; \quad \lambda_p = \frac{a}{t_f} \sqrt{\frac{\sigma_{max}}{E}}. \quad (77)$$

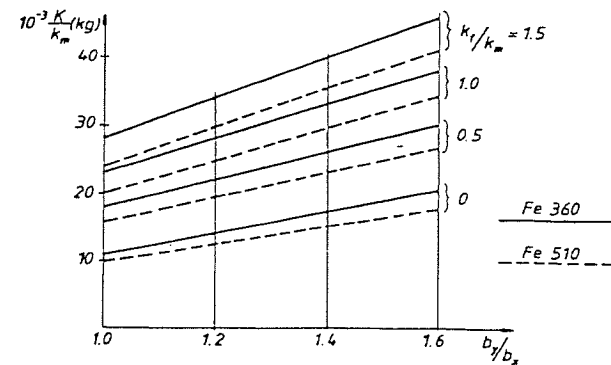
A (66) és (65) egyenletek felhasználásával

$$\sigma_{x,max} = c_{mx} p b_x^2 / (t_f h \psi_y), \quad \text{és} \quad \sigma_{y,max} = c_{my} p b_x^2 / (t_f h \psi_x), \quad (78)$$

ψ értékét kifejezve a következő összefüggést kapjuk (77)-ből:



8. ábra



9. ábra

$$\sigma_{x,max} = c_{mx}^2 p^2 b_x^4 a_y^2 / (1.426^2 t_f^4 E h^2); \quad \sigma_{y,max} = c_{my}^2 p^2 b_x^4 a_x^2 / (1.426^2 t_f^4 E h^2). \quad (79)$$

$$\text{Továbbá } \sigma_{xf, \max} = 6 c_{fx} p_0 a_x^2 / t_f^2, \text{ és } \sigma_{yf, \max} = 6 c_{fy} p_0 a_x^2 / t_f^2, \quad (80)$$

c_{fx} és c_{fy} értékei a 6. táblázatban látható Timoshenko és Woinowsky-Krieger (1959) alapján egyenletesen megoszló terhelés, négyszögletes izotróp lemez, csuklós megfogás esetén.

5. táblázat

b_y/b_x	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.9	2.0	3.0	4.0	
$10^4 c_{mx}$	479	554	627	694	755	812	862	908	985	1017	1189	1235	1250
$10^4 c_{my}$	479	493	501	503	502	498	492	486	471	464	496	384	375
$10^3 c_{qx}$	338	360	380	397	411	424	435	444	459	465	493	498	500
$10^3 c_{qy}$	338	347	353	357	361	363	365	367	369	370	372	372	372

6. táblázat

a_x/a_y	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	
$10^4 c_{fx}$	513	581	639	687	726	757	780	799	812	822	829	833
$10^4 c_{fy}$	513	538	554	563	568	570	571	571	571	571	571	571

c_{fx} és c_{fy} változnak az optimalálás során, polinommal közelítjük értékeit:

$$c_{fx} = c_0 + c_1 a_y/a_x + c_2 (a_y/a_x)^2 + c_3 (a_y/a_x)^3, \quad (81)$$

c_{mx} , c_{my} , c_{qx} és c_{qy} értékei állandók az optimalálás során, mivel b_y és b_x adott a számpéldánál.

b./ A merevítő gerincének helyi horpadása hajlítás esetén

$$\sigma_{x, \max} \leq \frac{23.9 \pi^2 E_1}{12 \gamma_b} \left(\frac{t_x}{h} \right)^2 \text{ és } \sigma_{y, \max} \leq \frac{23.9 \pi^2 E_1}{12 \gamma_b} \left(\frac{t_y}{h} \right)^2, \quad (82a, b)$$

ahol γ_b a biztonsági tényező

c./ A merevítő gerincének helyi horpadása nyírás esetén

$$\tau_x = \frac{Q_x a_y}{h t_x} = \frac{c_{qx} p b_x a_y}{h t_x} \leq \frac{5.34 \pi^2 E_1}{12 \gamma_b} \left(\frac{t_x}{h} \right)^2; \quad \tau_x \leq \tau_{adm}, \quad (83a)$$

$$\tau_y = \frac{Q_y a_x}{h t_y} = \frac{c_{qy} p b_y a_x}{h t_y} \leq \frac{5.34 \pi^2 E_1}{12 \gamma_b} \left(\frac{t_y}{h} \right)^2; \quad \tau_y \leq \tau_{adm}, \quad (83b)$$

ahol $\tau_{adm} = \sigma_{adm} / \sqrt{3}$ a megengedett nyírási feszültség.

d./ A lemeztavastagságok határértékei

$$t_{rx} \geq t_0; \quad t_{ry} \geq t_0 \text{ és } t_f \geq t_0, \quad (84)$$

ahol t_0 a hegesztési technológia alapján figyelembe vehető minimális lemeztavastagság. Lehajlás-korlátozási feltételt nem vettünk figyelembe a cellalemez nagy hajlítási merevsége miatt.

Optimalálás

A számpéldánál p_0 , b_y , b_x , σ_{adm} , E , ν , c_{mx} , c_{my} , c_{qx} , c_{qy} , t_0 adottak, célfüggvény a költség minimuma $K_{\min}$, a változók φ_x , φ_y , h , t_f , t_{rx} és t_{ry} . A célfüggvényben a k_f/k_m arány 0-1.5 között változik.

Három optimaláló módszer került felhasználásra, a Backtrack, a Hillclimb és az FSQP (feasible sequential quadratic programming).

Numerikus számítás

Adatok: az egyenletesen megoszló terhelés értéke $p_0 = 5 \times 10^{-3}$ N/mm², $p = 1.1 \times p_0 = 5.5 \times 10^{-3}$ N/mm², $t_0 = 2$ mm, $E = 2.1 \times 10^5$ MPa, $\nu = 0.3$, $\rho = 7850$ kg/m³, $\gamma_b = 2$, $\delta = 3$, $b_x = 10$ m. Anyagminőség Fe 360 esetén, megengedett feszültség $\sigma_{adm} = 120$ MPa, Fe 510 esetén $\sigma_{adm} = 120 \times 355/235 = 181$ MPa.

A megmunkálási költség hatásának kimutatása céljából az költségtényező arányát $k_f/k_m = 0; 0.5; 1.0$ és 1.5 értékek között változtatjuk. Az eredményeket a 7. táblázat mutatja.

7. táblázat Számpélda eredményei $b_x = 10$ m, $b_y = 14$ m méretek, Fe 360 acélminőség esetén három optimaláló eljárással mm-ben.

Módszer	k_f/k_m	φ_x	φ_y	t_f	t_{rx}	t_{ry}	h	K/k_m (kg)
CFSQP	0	13.0	16.0	5.1	2.2	2.0	278.	14548.
kerekített-	0.5	12.8	16.0	5.1	2.2	2.0	285.	23627.
len	1.0	10.2	8.8	6.1	3.0	2.4	383.	31743.
értékek	1.5	9.4	8.0	6.0	3.1	2.5	406.	38705.
Hillclimb	0	13.1	15.7	5.0	2.3	2.0	299.	14624.
kerekített-	0.5	10.0	9.0	6.0	3.0	2.4	400.	24609.
len	1.0	10.0	8.0	6.0	3.2	2.5	499.	31888.
értékek	1.5	8.0	7.9	7.0	3.1	2.6	374.	39094.
Hillclimb	0	14.	15.	5.	3.	2.	300.	15229.
diszkrét	0.5	10.	9.	6.	3.	3.	400.	25459.
értékek	1.0	10.	8.	6.	4.	3.	450.	33485.
	1.5	8.	8.	7.	4.	3.	375.	40665.
Backtrack	0	13.	16.	5.	3.	3.	300.	16162.
diszkrét	0.5	10.	9.	6.	4.	3.	400.	26149.
értékek	1.0	10.	8.	6.	4.	3.	450.	33485.
	1.5	8.	8.	7.	4.	3.	375.	40665.

Általánosítás

Látható, hogy különböző módszerek alkalmazásával jól egyező eredményeket kaptunk, mind kerekítettlen, mind diszkrét esetben. Több optimaláló módszer alkalmazása azért is célszerű, mert így a kapott eredmények megbízhatóbbak.

A számpélda is mutatja, hogy a cellalemez nagy csavarási merevsége miatt viszonylag nagy szerkezet készíthető vékony lemezekből.

Az eredményekből látható, hogy k_f/k_m nagyobb értékei esetén - nagyobb megmunkálási költségek - φ_x optimuma kisebb, vagyis kevesebb borda kerül beépítésre. Növelt folyáshatárú acél Fe 510 beépítésével 4-12 % költség-megtakarítás érhető el. A célfüggvény érzékenysége kicsi az optimumban a változók értékeire.

A méreteket meghatározó aktív feltételek a normálfeszültség-korlátozási és a merevítő gerincének helyi horpadási feltétele.

Összehasonlítás

Elemeztem a szerkezet anyag és megmunkálási költségeinek hatását az optimális méretekre. Kimutattam, hogy relatíve kicsi megmunkálási költségek esetén (Kelet-Európai gyártás) vékony és nagyszámú borda az optimum, relatíve nagy megmunkálási költségek esetén (Nyugat-Európai gyártás) vastag és kisszámú borda az optimum (8. ábra.)

Elemeztem a növelt folyáshatárú acél alkalmazásának lehetőségeit. Kimutattam, hogy alkalmazása esetén 4-12 %-al csökken a költség (9. ábra).

6. SZAKÉRTŐI RENDSZEREK ALKALMAZÁSA FÉMSZERKEZETEK OPTIMÁLIS MÉRETEZÉSÉNél

A gépészeti szerkezetek tervezése nagyon komplex eljárás, mely kreatív gondolkodást, intuitív tudást és pontos analízist igényel. Az elmúlt évtizedekben a digitális számítógépek fejlődésével elsősorban a kvantitatív eljárások fejlődtek, mint a véges elemes módszer, az optimalizáló programok, a szimulátorok, stb.

Miközben ezen programok jelentősen segítik a tervezőt a szerkezet 'mennyiségi' jellemzőinek vizsgálatában, a kvalitatív eredmények levonásának lehetősége kicsi.

A mesterséges intelligencia és a tudásbázisú rendszerek a szerkezet kvalitatív vizsgálatát teszik lehetővé számítógéppel. A fejlett programok egy sor új problémát tudnak megoldani a tárolt tudásbázis segítségével. Ha a tudásbázis nagysága összemérhető egy szakértő tudásával, akkor szakértői rendszert kapunk. A szakértői rendszerek lehetővé teszik, hogy laikus felhasználó oldjon meg a számítógép segítségével problémákat, felhasználva a rendszer által felajánlott tudást.

A szakértői rendszer alkalmazási lehetőségei Gero (1987), Harmon, Sawyer(1990)

A szakértői rendszer tíz különféle területen alkalmazható:

- rendszerek működésének bemutatása (interpretation),
- előrejelzés (prediction), pl. időjárás,
- diagnosztika (diagnostics), elektronikus, biológiai vagy más rendszereknél,
- tervezés (design), szerkezetek vonatkozóan,
- tervkészítés (planning), rendszerekre, folyamatokra vonatkozóan,

- felügyelet (monitoring), pl. nagy ipari rendszereknél,
- hiba kiszűrés (debugging), interaktív eszköz a tervező számára, hogy tesztelje munkáját, vajon megfelel-e az igényeknek,
- javító (repair) rendszer, kombinálja a diagnosztika és a tervkészítés elemeit, hogy hibás rendszert javítson,
- oktató (instruction) rendszer, tanárszerepet játszik el,
- irányító (control) rendszer, pl. légi közlekedés irányítás.

Szakértői rendszerek összetevői, típusai

Három fő összetevője van a szakértői rendszernek:

- tudásbázis,
- következtető gép,
- felhasználói felület.

Működésük alapján három fő rendszertípus alakult ki Garrett (1990):

- szabálybázisú szakértői rendszer előre és hátraláncolással,
- objektum-orientált rendszerek,
- hibrid rendszerek, melyek az előző kettő keverékét jelentik.

A szakértői rendszert mi tervezésre használtuk, szabálybázisú és hibrid rendszereket alkalmazva. Folytattak kutatásokat, hogy összekapcsolják a szakértői rendszereket a szerkezet-optimalizálással, de még viszonylag kevés eredmény született. Ilyen az acélhidak optimalizálása szakértői rendszerrel Balasubramayan (1990):

Az egy és többcélű függvényes optimalizálás összekapcsolása döntéstámogató programrendszert eredményezett, mint ahogy az 1. tételben ismertettem. A többcélű függvényes optimalizálásnál ún. súlyozó tényezőket alkalmaz a tervező, melyek az adott célfüggvény relatív fontosságát jelentik. A szakértői rendszereknél pedig valószínűségi számok jellemzik az adott eseményt. Ezen két mennyiségcsoport összekapcsolása szerves kapcsolatot tesz lehetővé a két rendszer között.

Nagy számú szakértői keretprogram létezik, ART (Automated Reasoning Tool, Inference Corporation), KEE (Intelliparc), Intelligence Compiler (Intelligence Ware Inc.), Symbolic Adept (Symbolic Corporation), GURU (Micro Data Base Systems), Kappa PC, Goldworks (Goldworks Inc.), stb. Mi a Personal Consultant, a Level 5 Object rendszereket használtuk eddig, illetve ismerkedünk a Kappa PC és a Goldworks programokkal.

A *Personal Consultant* (1987) egy EMYCIN-típusú program, melyet a Texas Instruments fejlesztett ki PC-n. A tényeket objektum-jellemző-érték hármassal rögzíti. A következtető gép egyszerű hátraláncolós rendszerű. A rendszer IQLISP nyelven készült. A bizonytalan információk valószínűségi értékekkel egészíthetők ki. A program jó hibakövetéssel van ellátva, DR HALO grafikával egészíthető ki. Saját programnyelve van Abbreviated Rule Language,

ARL, de az információk bevihetők ablakokon keresztül közvetlenül. Futás során külső programokat képes futtatni.

A **LEVEL 5 OBJECT** (LO5) (1990) egy objektum-orientált szakértői rendszer. Interaktív, windows-bázisú felhasználói felülettel rendelkezik. Saját nyelve van, a Production Rule Language (PRL). Számos a felhasználót segítő szolgáltatással rendelkezik:

- relációs adatbázisokat kezel (RDB),
- grafikus fejlesztő rendszere van,
- minden windows szolgáltatással rendelkezik,
- mind előre-, mind hátraláncolásos következtetőgépe van.

A rendszer nagy előnye, hogy beadva a szükséges számítási összefüggéseket, a hiányzó információkat, adatokat számítás közben maga kéri be.

Kidolgoztam szakértői keretrendszerek és a szerkezetoptimalálás összekapcsolását. 5 cikkem foglalkozik ezzel a témával. Jelentősebbként a [7,12,17]-at említeném. Saját rész 75%, Farkas professzor 10%, Somogyi Zsolt 5%, Mészáros László 10%.

6.1. A 2. tételben kidolgozott futódaru-méretezés továbbfejlesztéseként elvégeztem a daruoptimaláló program és szakértői keretprogramok összekapcsolását. A Personal Consultant és a Level 5 Object szakértői keretprogramok kerültek felhasználásra.

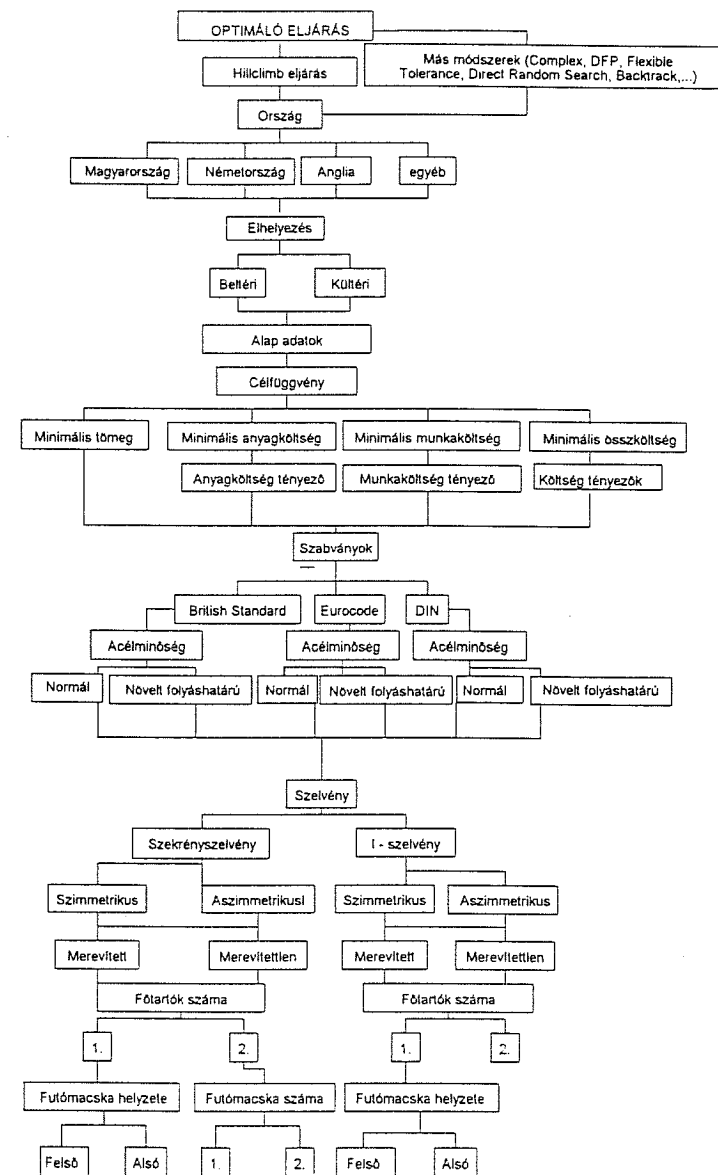
6.2. Kidolgoztam a méretezési hálót a szabálybázisú, hátraláncolásos Personal Consultant programhoz. A szakértői programnál lévő valószínűségi értékek a többcélűfüggvényes optimalálásnál szükséges célűfüggvény relatív fontosságát feleltettem meg. Ezáltal a többcélűfüggvényes optimalálás végigvihető volt.

6.3. Kidolgoztam a Level 5 Object szakértői rendszerhez a daruméretezés logikai struktúráját (10. ábra). Egycélűfüggvényes optimaláló módszer közvetlen beépítésével a szakértői keretbe elvégezhető a daruoptimalálás úgy, hogy a szakértői keretprogram térképezi fel az aktuális ismeretleneket és kérdez rá az értékekre.

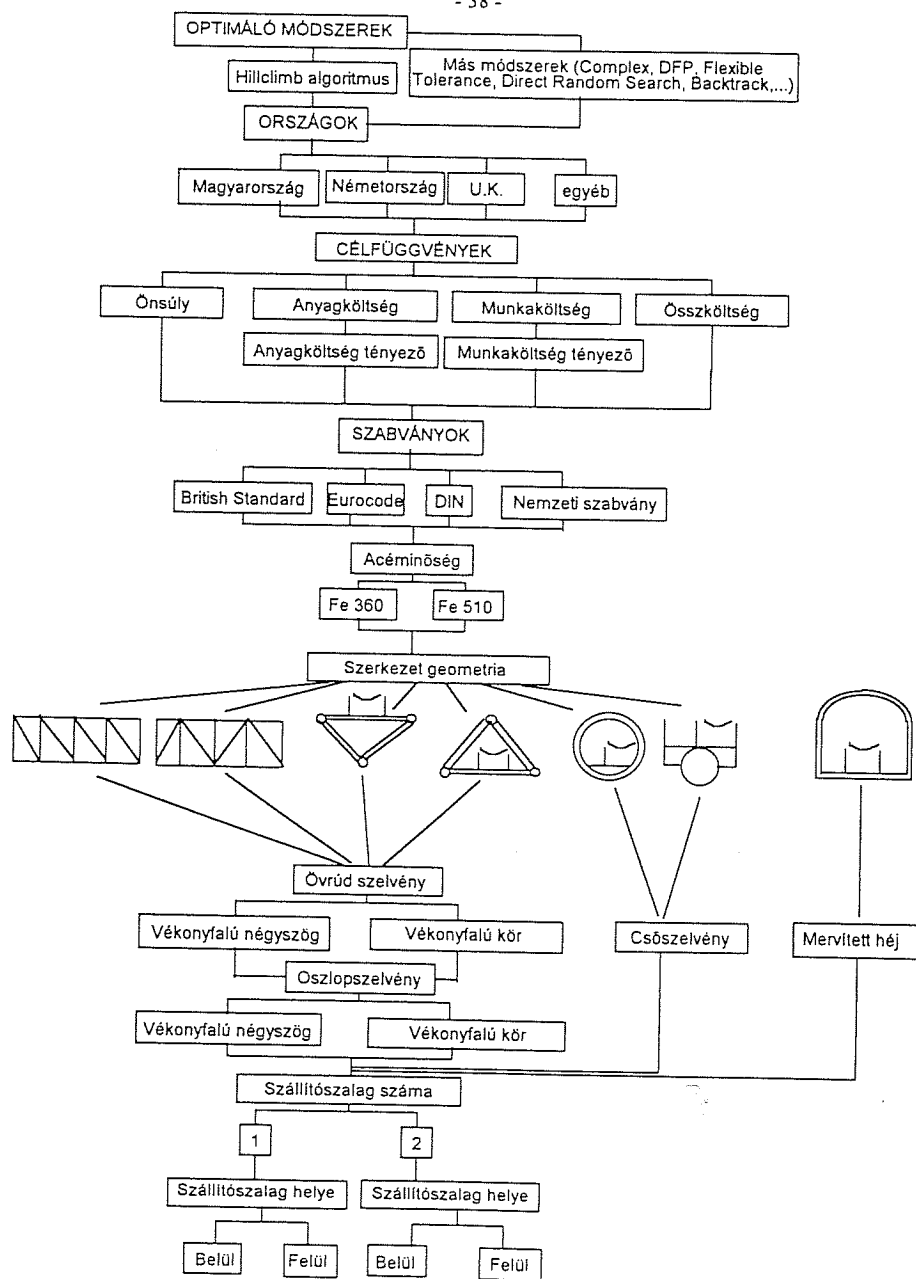
6.4. Kidolgoztam a Level 5 Object szakértői rendszerhez a síkbeli rácsos tartóméretezés logikai struktúráját (11. ábra) mely anyag elfogadásra került Application of expert system at the optimum design of tubular trusses of belt-conveyor bridges címmel a VI. Tubular Structures konferenciára.

Szemléltetésként bemutatom, hogy a szakértői rendszert a 2. tételben ismertetett futódaru hídfőtartó optimalis méretezésével összekapcsoltuk, mind a Personal Consultant, mind a Level 5 Object keretrendszer felhasználásával. A célűfüggvények: anyag-, hegesztési-, felületelőkészítési-, összköltség, a változók a gerincmagasság, a két gerincvastagság, övszélesség, övvastagság. Méretezési feltételek: feszültségkorlátozási, fáradási, gerinc- és

övelemzhorpadási, lehajláskorlátozási. Az összefüggések a 2. tételben ismertetettek, jelölés 2. ábra.



10. ábra. Logikai struktúra futódaru főtartó méretezéséhez Level 5 Object rendszerrel



11. ábra. Logikai struktúra rácsos tartó méretezéséhez Level 5 Object rendszerénél

Fő adatok:

Hasznos terhelés $H = 240$ kN, fesztáv $L = 25$ m, macska tömegű $G_f = 30$ kN, macska keréktáv $k = 2.5$ m, sínmagasság $h_f = 50$ mm, sín tömeg $p_f = 80$ kg/m, Young rugalmassági modulus $E = 2.06$ GPa, darucsoport A7, acélminőség 43, gerincmerevítő $120 \times 80 \times 8$ mm szögacél.

A Personal Consultant rendszer esetén a szabályok egyik csoportja a daru besorolását szolgálja, másik csoport az optimálási eljárások, súlyozó tényezők kiválasztását, megadását jelentik. A harmadik szabálycsoport az optimumok szelektálását végzi el, esztétikai, gyártási feltételek figyelembe vételével, például

$$0.4 \leq b/h \leq 0.8 \quad ; \quad t_{w1}/t_{w2} \leq 1.5. \quad (85)$$

Megoldásként a következő eredmény adódott: szekrényszelvényű, aszimmetrikus, gerincmerevítővel ellátott, kétfőtartós, egy futómacskás, a relatív fontossági tényezők összköltség esetén 0.4, anyagköltség esetén 0.3, hegesztési költség esetén 0.3. Költségtényezők: anyagköltség $k_m = 1$ [\$/kg], hegesztési költség $k_w = 10$ [\$/kg], felületelőkészítési költség $k_s = 100$ [\$/m²].

gerincmagasság	$h = 1260$ [mm],
főgerinc vastagság	$t_{w1} = 6$ [mm],
segédgerinc vastagság	$t_{w2} = 5$ [mm],
övszélesség	$b = 700$ [mm],
övvastagság	$t_f = 18$ [mm],
a szerkezet összköltsége	$C_t = 16677.04$ [\$/]

A diszkrét értékek h és b esetén 20 [mm]-enként, lemezvastagságnál 1 [mm]-enként változtak.

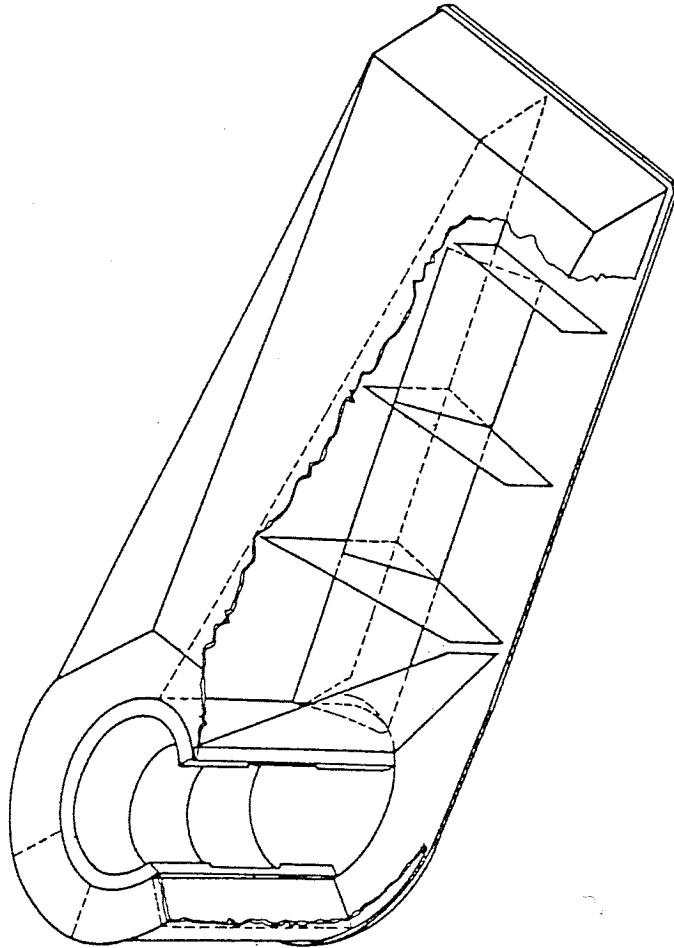
A 11. ábra mutatja rácsos szalaghíd méretezésére szolgáló szakértői rendszer logikai struktúráját. Több vizsgálatot és számítást végeztünk eddig [11, 15], de az összetett rendszer kidolgozása még folyamatban van, további vizsgálatokat igényel, hogy megfelelő tudásbázist tartalmazzon.

7. CIPŐIPARI KIVÁGÓGÉPEK MÉRETEZÉSE

A Könnyűipari Gépgyártó Vállalat (KAEV) megbízásából három különféle kialakítású présgép méretezését végeztük el, saját rész 50%, Farkas professzor 50%.

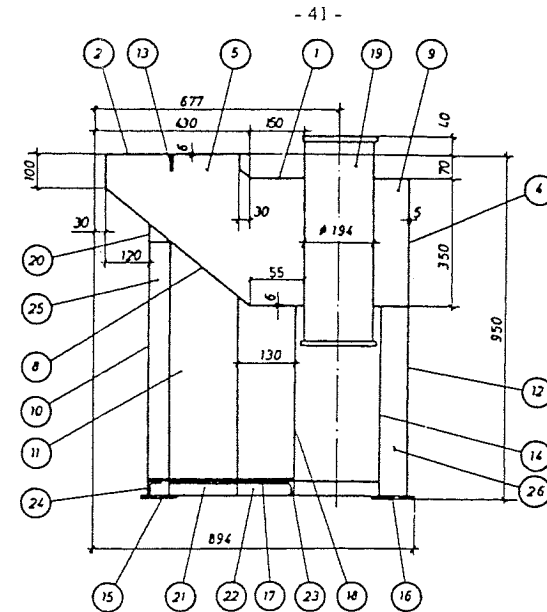
7.1. Lengőfejes présgép, teherbírása 20 tonna. Mivel a gép nyugati exportra készült, nagyon fontos volt a versenyképessége. A lengőfej tömegét minimálisra kellett csökkenteni [19]. Eredetileg alumínium öntvény volt és ezt kellett átalakítani hegesztett acélszerkezetté. A vízszintes elmozdításához szükséges erő, megy kb. a tömeg 1/10-ed része nem lehetett 10 N felett. A méretezésnél normál- és nyírófeszültségi, nyomólemez és bordahorpadási, hegeszthetőségi, fáradási, méretkorlátozási, valamint alakváltozási feltételt kellett figyelembe

venni. Mértékadó a nagyon szigorú szétnyílási feltétel volt, a hajlításból, nyírásból és csavarásból származó alakváltozás 1 mm-nél kisebb kellett, hogy legyen. Csak egy összetetten bordázott, vékonylemezes szerkezet felelt meg e célnak igen szigorú hegesztési sorrenddel (12-13 a,b. ábra).

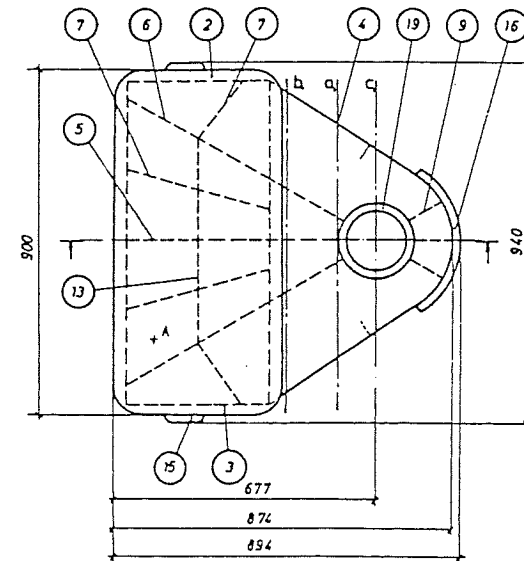


12. ábra. A lengőfejes prégép bordázott hegesztett lemezszerkezetű feje

7.2. Mozgófejes prégép (RM típusú), teherbírása 25 tonna. A bordázott szekrényszelvényű asztal, a merevített I-szelvényű gerenda és a merevített U-szelvényű oszlop maximális és extrém terhelés esetén bekövetkező szétnyílása 1 mm-nél kisebb kell legyen. Hajlítás, nyírás



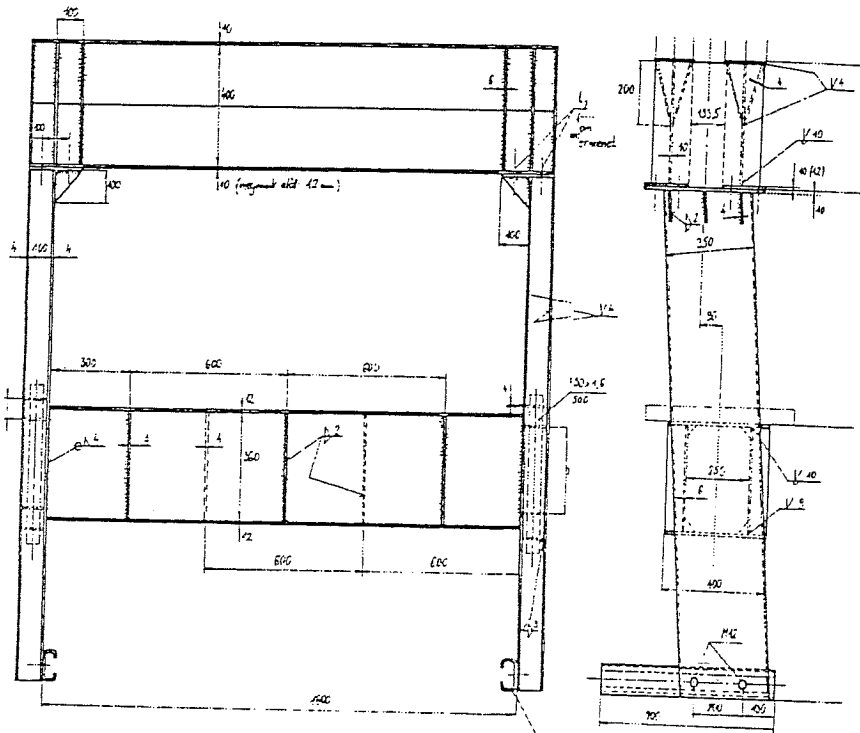
13 a. ábra. A lengőfejes prégép asztala oldalnézetben
2-es tétel nyomólap, 25-ös az oszlop, 19-es a nyomócső



13 b. ábra. A lengőfejes prégép asztala felülnézetben

és csavarás esetén normál- és nyírófeszültség-korlátozási, gerinc- és övlemezhorpadási, fáradási, gyártási és méretkorlátozási feltételek voltak figyelembe véve (14. ábra).

7.3. Mozgóhidas prégép, teherbírás 50 tonna. A híd hátra elmozdulva szabaddá teszi a munkateret, így kis tömegűnek, de merevnek kell lennie. Mind a híd, mind az asztal a nagy munkafelület, nagy teherbírás és extrém terhelések miatt két irányban bordázott szekrényszelvényű tartó, ahol az asztalnál még belső tér is kell a mozgató mechanizmus számára. A méretezésnél normál- és nyírófeszültségi, nyomólemez és bordahorpadási, hegeszthetőségi, fáradási, méretkorlátozási, valamint alakváltozási feltételt kellett figyelembe venni. Mértékadó a nagyon szigorú szétnyílási feltétel volt az aktív, a hajlításból, nyírásból és csavarásból származó alakváltozás 1 mm-nél kisebb kellett, hogy legyen (15, 17. ábra).

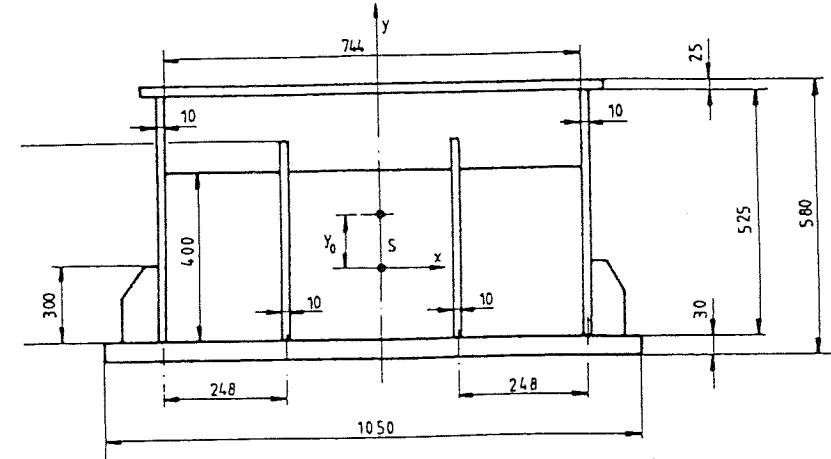


14. ábra. A mozgófejes RM típusú prégép elől és oldalnézete

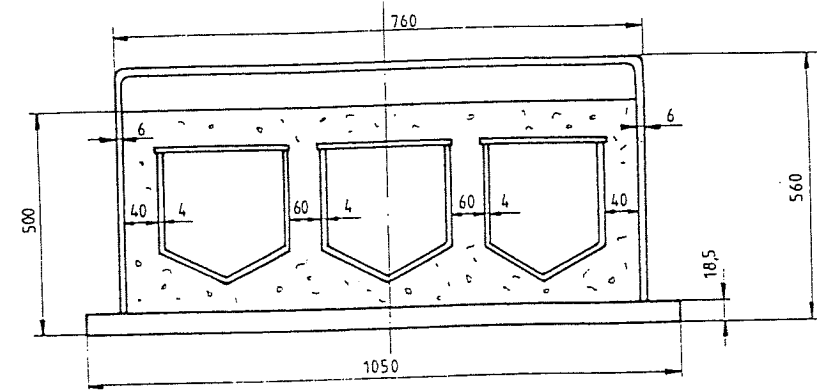
7.4. Az előző pontban leírt mozgóhidas prégép átalakítását végeztük el úgy, hogy a mozgóhidat kicseréltük műanyagbeton-acél felépítésűre a kandidátusi értekezésemben elvégzett vizsgálatokra alapozva. Az asztal változatlan maradt. A tervezés során figyelembe veendő feltételek nem változtak. A hídnál a nagy teherbírás és extrém terhelések miatt

hosszirányú csömrevitéseket helyeztünk el, mely a tömeget is csökkenti. A méretezésnél normál- és nyírófeszültségi, nyomólemez és bordahorpadási, hegeszthetőségi, fáradási, méretkorlátozási, valamint alakváltozási feltételt kellett figyelembe venni. Mértékadó a nagyon szigorú szétnyílási feltétel volt az aktív, a hajlításból, nyírásból és csavarásból származó alakváltozás 1 mm-nél kisebb kellett, hogy legyen. Jelentősen csökkent a gép zajszintje és a dinamikus hatásokból adódó rezgések nagysága (16, 18. ábra).

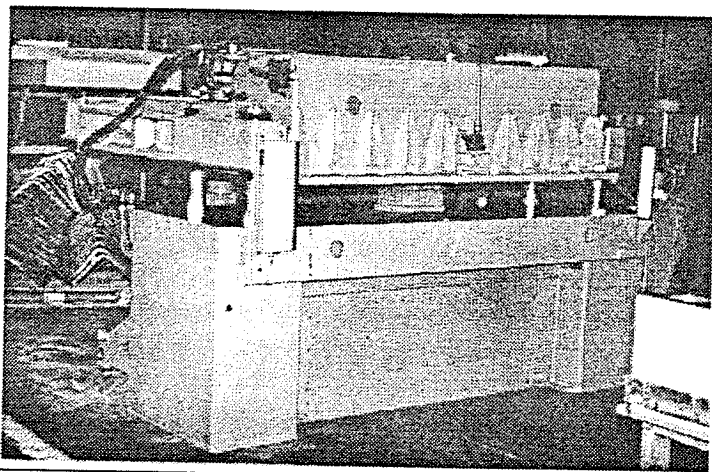
A 7. tézispontokban ismertetett gépeket legyártották, a mérési eredmények jó egyezést mutattak a számítottal. A 7.3. tézispontokban ismertetett gép fényképe a 17. ábrán, a 7.4. tézispontban ismertetett gép fényképe a 18. ábrán látható.



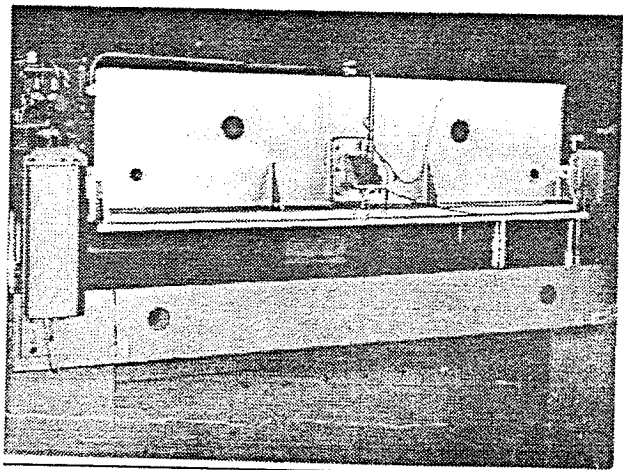
15. ábra. A hegesztett lemezszerkezetű híd keresztmetszete



16. ábra. A műanyagbeton híd keresztmetszete



17. ábra. A hegesztett acélszerkezetű hídral ellátott prégép fényképe



18. ábra. A műanyagbeton hídral ellátott prégép fényképe

IV. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás elsődleges célja az volt, hogy matematikai módszerek felhasználásával a gyakorlat számára is alkalmazható méretezéseket végezzünk el. A szerkezetszintézissel anyag- és költségtakarékos szerkezetek tervezhetők, mint ahogy Cohn, M. Z., Dinovitzer, A. S. (1992) hangsúlyozza követelményként és sajnálatos ritkaságként a tématerület áttekintésében.

A szerkezetméretezésnek az értekezés második fejezetében ismertetett elmélete, mely az interaktív döntéstámogató programrendszer és a gazdaságos szerkezetméretezés műveleti struktúrájának az összekapcsolásából épül fel, alkalmazhatóságát tekintve kipróbálásra, illetve szemléltetésre került az egyes fejezetekben ismertetett szerkezeteknél, vagyis futódaru bordázott hídfőtartója, profilos fedőrétegű szendvicstartók, bordázott lemezek, szállítószalag hídsszerkezetek méretezésénél.

A profilos fedőrétegű szendvicstartók, mint szerkezettípusok alkalmazhatók jármű és gépvázaknál, ahol a statikus merevség mellett a rezgéscsillapítási képesség is fontos. További lényeges szempont volt a méretezésnél, hogy a szerkezet járatos méretei, diszkrét értéksorok felhasználásával közelebb kerüljön a gyártáshoz.

Az interaktív döntéstámogató programrendszer a műszaki gyakorlatban előforduló szerkezettervezési problémák megoldására széleskörűen alkalmazható, ha fel tudjuk építeni a változók, a célfüggvények és a méretezési feltételek rendszerét (1-3 összefüggések).

A daruméretezés konkrét tervezésre alkalmas programok kifejlesztését jelentette. A 7. tézisben ismertetett prégépek nagy mennyiségben legyártásra és exportálásra kerültek.

A tézisekben ismertetett eljárások és azok alkalmazásai beépítésre kerültek a gépészmérnökök hallgatók képzésébe, továbbá a doktorandusz és szakmérnöki képzésbe is. A gazdaságos szerkezetméretezés kidolgozott módszerei hozzájárulnak a szerkezetméretezés tudományterületének fejlődéséhez, továbbá konkrét ipari feladatok megoldását segítik elő.

A szerkezetoptimalizálás további alkalmazását silók, rácsos csősszerkezetű tetőtartók, szálerősítéssel műanyag szerkezeti elemek, alumínium szerkezetek méretezése jelentette illetve jelenti.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton is szeretnék köszönetet mondani Farkas József professzornak, akitől hallgató korom óta rengeteg szakmai segítséget kaptam.

Köszönöm Andre L. Tits és Jian L. Zhou professzoroknak a Marylandi Egyetemről a CFSQP algoritmus használati lehetőségét. Krister Svanberg professzornak a Stockholmi Műszaki Egyetemről az MMA algoritmus használati lehetőségét, továbbá Bo Edlund professzornak a Göteborji Műszaki Egyetemen a Personal Consultant használati lehetőségét.

Köszönöm továbbá az Országos Tudományos Kutatási Alapnak, hogy az OTKA T 4407 projekt keretében támogatta, illetve támogatja kutatómunkámat 1992-től, továbbá a Magyar Felsőoktatásért Alapítványnak, mely 1993-94 években támogatta oktatásfejlesztési munkámat.

Köszönöm továbbá Kozák Imre, Páczelt István és Tóth Tibor professzorok hasznos tanácsait, melyeket a habilitációs füzet kidolgozása során kaptam tőlük.

V. A TÉMAKÖRÖKBEN KÉSZÜLT 20 LEGFONTOSABB SAJÁT PUBLIKÁCIÓ JEGYZÉKE

1. Jármai, K.: Single- and multicriteria optimization as a tool of decision support system. *Computers in Industry*, Elsevier Applied Science Publishers, 1989, Vol. 11, No. 3. p. 249-266.
2. Jármai, K.: Application of decision support system on sandwich beams, verified by experiments. *Computers in Industry*, Elsevier Applied Science Publishers, 1989, Vol. 11, No. 3, p. 267-274.
3. Jármai, K.: Multilevel optimization of steel gantry structures on IBM PC. *14th IFIP Conference on System Modelling and Optimization*, Leipzig, East-Germany, July 3-7. 1989, Proceedings, Vol. 7, p. 102-104.
4. Jármai, K.: A Rosenbrock-féle Hill-algoritmus, a Pappas- féle DSFD algoritmus, hegesztett I-szelvényekből álló egyhajós csarnokkeret fejezetek. *Számítógéppel segített hegesztés* CAW. BME, Mérnöktoivábbképző Intézet jegyzet. Szerkesztő : Brenner, A., Palotás, B., 1989. Budapest, 23-36., 59-64. old.
5. Jármai, K.: Decision support system on IBM PC for design of economic steel structures, applied to crane girders. *Thin-Walled Structures*, Elsevier Applied Science Publishers, 1990, Vol. 10, p. 143-159.
6. Farkas, J., Jármai, K.: Bördázott cellaszerkezetű lemezek optimális méretezése a hegesztési költségek figyelembevételével. *GÉP*, 1990, Budapest, Vol. XLII, No. 11, 433-436. old.
7. Jármai, K.: Szakértői keretrendszerek és a szerkezetoptimalás összekapcsolása. *Géptervezők VIII. Országos Szemináriuma*, Miskolci Egyetem, 1991, május 30-31. Konferencia kiadvány 110-114. old.
8. Jármai, K.: Multicriteria optimization of stiffened box girders via stability constraints. *Stability of Steel Structures Colloquium 1990*, Budapest, Edited by M. Iványi, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1991, Vol. 2., p. 1073-1080.
9. Jármai, K.: The efficiency of the optimization techniques in the economic design of steel structures. *15th IFIP conference on System Modelling and Optimization*, Zürich, September 2-6. 1991. Proceedings p. 504-505.
10. Jármai, K.: Gazdaságos futódaruhid-méretezés szakértői programrendszerrel. *Gép*, 1992, Miskolc, Vol. XLIV, No. 1, 28-30. old.
11. Jármai, K.: Optimum design of tubular trusses. *Advanced TEMPUS Course on Numerical Methods in Computer Aided Optimal Design*, May 11-15, 1992. Zakopane, Poland, Lecture Notes Vol. 2. p. 214-221.
12. Jármai, K.: Expert systems and structural optimization. *Educational aid in the frame of TEMPUS JEP 0438-91/92*. University of Miskolc, No. Edu. aid. TEMPUS JEP 0438-UM-4-1992. 31 p.
13. Farkas, J., Jármai, K.: Minimum cost design of laterally loaded welded rectangular cellular plates. *Structural Optimization '93, The World Congress on Optimal Design of Structural Systems*, Rio de Janeiro, Aug. 2-6. 1993. Proceedings Vol. 1. 205-212. p.
14. Farkas, J., Jármai, K.: Fabrication cost calculations of welded structural parts. *46th Annual Assembly of International Institute of Welding*, Glasgow, Scotland, Aug. 28 - Sept. 4. 1993. Documents of the XVth Commission, IIW- Doc. XV-823-93. 12 p.
15. Jármai, K.: Optimum design of belt-conveyor bridges. *National Seminar of Machine Designers, Géptervezők Országos Szemináriuma*, GTE - Miskolci Egyetem - MTA MAB, Miskolc, Sept. 30 - Oct. 1. 1993. Proceedings, Vol. 1, p. 56 - 61.
16. Jármai, K.: Techniques in structural optimization. *MicroCAD-System'93 6. Special section of the Faculty of Civil Engineering*, TU Kosice, Slovensko, Nov. 9 - 10. 1993. Proceeding abstract p. 6.21, full paper 14 p.

17. Jármai, K., Somoogyi, Zs., Mészáros, L.: Optimization of main girders of overhead travelling cranes by expert systems. *MicroCAD'94*, University of Miskolc Febr. 25 - 29. 1994. Proceedings, Section J. Materials Handling, Logistics and Robotics, p. 48-55.
18. Farkas, J., Jármai, K.: Fabrication cost calculations of welded structural parts. *47th Annual Assembly of International Institute of Welding*, Beijing, China, Sept. 3-10. 1994. Documents of the XVth Commission, IIW- Doc. XV-823-94. revised, 12 p.
19. Farkas, J., Jármai, K., Kristóf, L.: Hegesztett lemezszerkezetű cipőipari szabásgépek. *GÉP*, Vol. XXXIV, 1982. Budapest, No. 9, 350-355. old.
20. Farkas, J., Jármai, K.: Minimum cost design of laterally loaded welded rectangular cellular plates. *Journal of Structural Optimization*, Springer Verlag, Vol. 8. 6 p. (under publication).

VI. HIVATKOZÁSOK

- Allen, H. G. (1969): Analysis and design of structural sandwich panels. Pergamon Press. Oxford.
- Balasubramayan, K. (1990): A knowledge based expert system for optimum design of bridge trusses. University Microfilms International, Dissertation Information Service, Ann Arbor, Michigan, No. 8812223.
- Bellman, R. E. (1957): Dynamic programming. Princeton Univ. Press, Princeton, New Jersey.
- Bennett, J. A., Botkin, M. E. (ed) (1985): The optimum shape: Automated structural design. General Motors Symposium on the optimum shape. Plenum Pr. New York.
- Box, I. V. J. (1965): A new method of constrained optimization and a comparison with other methods. *Computer Journal*, Vol. 8. pp. 42-52.
- BS 2573 (1983): Rules for the design of cranes. Part 1. British Standard Institution.
- BS 5400 (1982): Steel, concrete and composite bridges. Part 3. Code of practice for design of steel bridges. British Standard Institution.
- Carmichael, D. G. (1981): Structural modelling and optimization: A general methodology for engineering and control. Ellis Horwood Limited, Chichester.
- Cilley, F. H. (1900): The exact design of statically indeterminate frameworks, an exposition of its possibility, but futility. *Trans. ASCE*. Vol. 42.
- Cohn, M. Z., Dinovitzer, A. S. (1992): Application of structural optimization. *Structural Engineering*, ASCE, Vol. 120. No. 2. p. 617-650.
- Cox H. (1965): The design of structures of least weight. Pergamon, Oxford.
- Dantzig, G. B. (1948): Programming in a linear structure. Comptroller, USA, Washington, D. C.
- DIN 59410 (1978): Hohlprofile für den Stahlbau, Warmgefertigte quadratische und rechteckige Stahlrohre, Masse, Gewichte, zulässige Abweichungen, statische Werte, Ausg.
- DIN 15018 (1974): Krane, Grundsätze für Stahltragwerke, Berechnung, Deutsche Normen.
- DIN 53457 (1968): Bestimmung des Elastizitätsmoduls im Zug-, Druck- und Biegeversuch. Deutsche Normen.
- Dym, C. L., Levitt, R. E.: Knowledge based systems in engineering. Mc Graw-Hill Inc. 1991.
- Dwyer, F. J. (1976) : A review of factors affecting durability characteristics of flexible urethane foams. *Journal of Cellular Plastics*, No. 2, pp. 104-113.
- Emerson, P. D. (1974): Application of constrained-layer damping to control noise in machine parts. *Trans. ASME. Journal of Engineering for Industry*, No. 2, 1974. pp. 299-303.
- Eurocode 3. (1992): Design of steel structures. Part 1.1. General rules and rules for buildings. CEN European Committee of Standardization, Bruxelles.
- ECCS (1978): European recommendations for steel construction, European Convention for Constructional Steelwork, ECCS-EG 77-2E.
- Farah, A., Ibrahim I. M., Green R. (1977) : Damping of floor vibrations by constrained viscoelastic layers. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol. 4. pp. 405-411.
- Farkas, J. (1967) : Szekrényszelvényű daruhid- és darupályatartók gazdaságos méretezése néhány kérdése. V. Anyagmozgatási Konferencia előadásai, Budapest, MTESZ-KAB.

- Farkas, J. (1982): *Fémszerkezetek, egyetemi tankönyv*, Tankönyvkiadó, Budapest.
- Farkas, J. (1984): Optimum design of metal structures. Ellis Horwood Limited, Chichester.
- Farkas, J. (1985): Discussion to "Simplified analysis for cellular structures" by Evans, H.R., and Shanmugam, N.E.: *Struct. Eng. ASCE* Vol. 111, No. 10, p. 2268-2271.
- Farkas, J. (1986): Economy of higher-strength steels in overhead travelling cranes with double-box girders. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 6, pp. 285-301.
- Farkas, J. (1993): Absorbed energy of CHS and SHS braces cyclically loaded in tension-compression. V. Int. Symposium on Tubular Structures, Nottingham, 1993, p.607-614. Editor M.G.Coutie, G. Davies, E&FN Spon Publishers, London.
- Fiacco, A. V. Mc Cormick, G. P. (1968): Nonlinear programming: sequential unconstrained minimization techniques, Wiley, New York.
- Gaggero G., Wilson, H. B. (1984) : Implementing large engineering programs on microcomputers. 1 st. National Conference on Microcomputers in Civil Engineering, Nov. 1-3, 1983, Orlando, Florida, ASCE.
- Gallagher, R. H., Zienkiewicz, O. C. (ed.) (1977): Optimum structural design, Theory and applications. John Wiley and Sons, New York.
- Garrett, J. H. (1990): Knowledge-based expert systems: past, present and future. IABSE Surveys S-45/90, Zürich, p. 21-40.
- Gero, J. S. (ed) (1987): Expert systems in computer-aided design. Elsevier Applied Science Publishers.
- Golomb, S. W., Baumert, L. D. (1965): Backtrack programming. *Journal of the Association of the Computing Machinery*, New York, Vol. 12, No. 4.
- Grosskopf, P., Winkler, Th., (1973): Auslegung von GPK/Hartschaum-Verbundwerkstoffen. *Kunststoff* Bd. 63, H. 12, pp. 881-888.
- Halász, O., Plathy, P. (1987): *Acélszerkezetek*. Tankönyvkiadó, Budapest.
- Hammill, W. J., Andrew, C. (1974) : Vibration reduction with continuous damping inserts, Proceedings 14th. Machine Tool Design and Research Conference, pp. 455-502.
- Harmon, P., Sawyer, B. (1990): Creating expert systems for business and industry. John Wiley and Sons Inc.
- Haug, E. J., Choi, K. K., Komkov, V. (1986): Design sensitivity analysis of structural systems. Academic Press, Inc. Orlando.
- Hemp, W. S. (1973): Optimum Structures. Clarendon, Oxford.
- Himmelblau, D. M. (1971): Applied nonlinear programming. Mc Graw-Hill Book Co. New York.
- Hooke, R., Jeeves, T. A. (1961): Direct search solution of numerical and statistical problems. *Journal of Assoc. Comp. Mach.* Vol. 8, pp. 212-229.
- Iványi, M. (1989): Model of analysis. Models for the Analysis of Steel Structures Conference, Pardubice, Czechoslovakia, Apr. 25-26, 1989, Proceedings, p. 252-257.
- Iványi, M. (1991): Design concepts of new Hungarian codes. Stability of Steel Structures Colloquium 1990, Budapest, Edited by M. Iványi, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1991, Vol. 1., pp. 23-36.
- Jones, D. G., Parin, M. Z. (1972): Technique for measuring damping properties of thin viscoelastic layers. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 24, No. 2, pp. 201-210.
- Jutler, H. (1967): Linejnaja model's neskolkimi celevymi funkccijami, *Ekonomika i matematicheskie Metody*, Vol. III, No. 3, pp. 397-406.
- Kaliszky, S. (1968): On the optimum design for reinforced concrete structures. *Acta Techn. Acad. Sci. Hung.* Vol. 60, pp. 257-264.
- Kerwin E. M. (1965): Macromechanisms of damping in composite structures, Internal friction damping and cyclic plasticity ASIM Spec. Techn. Publ. No. 378, Philadelphia, pp. 125-147.
- Kiusalaas J., Reddy, G. B. (1977): Desap 2. a structural design program with stress and buckling constraints. NASA. CR-2757-2799. Washington, D. C.
- Kogan, J. (1975): Crane design, Theory and calculations of reliability. John Wiley and Sons, New York.
- Koski, J. (1984): Multicriterion Optimization in Structural Design. Proceedings of International Symposium on Optimum Structural Design, Univ. of Arizona, Tucson, Arizona.
- Kuhn, H. W., Tucker, A. W. (1951): Nonlinear programming Proc. of the Second Berkeley Symposium on Math. Statistics and Probability. (ed Neyman, J.) Univ. of California Press, pp. 481-493.
- Lev, O. E. (1981): Structural optimization, Recent developments and applications. ASCE.
- LEVEL 5 OBJECT (1990), Reference Guide, FOCUS Integrated Data and Knowledge-Based Systems, Information Builders, 1250 Broadway, New York

- Levy, R., Lev, O. E. (1987): Recent developments in structural optimization. *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 113, No. 9, pp. 1939-1962.
- Markus, S., Oravsky, V., Simkova, O. (1974): Philosophy of optimum design of damped sandwich beams. *Acta Technica CSAV*, No. 6, pp. 647-661.
- Mead, D. J., Markus, S. (1965): The forced vibration of a three-layer, damped sandwich beam with arbitrary boundary conditions on, No. 10, pp. 163-175. *Journal of Sound and Vibration*.
- Michell, A.G.M. (1904): The limits of economy of material in framed structures. *Phil. Mag. Series 6*, Vol. 1, 8, pp. 589-597.
- Melnikov, N. P. (1983): *Metallicheskie konstrukcii*. Moskva Strojizdat.
- Mosley, W. H., Spencer, W. J. (1985): Microcomputer applications in structural engineering. Mac Millan Publishers Ltd. London.
- Niemi, E.J. (1993): Behaviour of rectangular hollow section trusses with stocky member. V. Int. Symposium on Tubular Structures, Nottingham, 1993, p.560-569. Editor M.G.Coutie, G. Davies, E&FN Spon Publishers, London.
- Niku-Lari, A. (ed) (1986): Structural analysis systems. Vol. 4, 5. Pergamon Press, Oxford.
- Oberst H. (1952): Über die Dämpfung der Biegeschwingungen Dünner Bleche durch Fest Haftende Beläge, *Akustische Beihefte* No. 4, pp. 181-194.
- Orbán, F. (1985): Bördázott lemezek optimális méretezése, Egyetemi doktori értekezés, NME, Miskolc.
- Osyczka, A. (1984): Multicriterion optimization in engineering. Ellis Horwood Limited, Chichester.
- Osyczka, A. (1992): Computer aided multicriterion optimization system (CAMOS), International Software Publishers, Krakow.
- Packer, J.A., Kurobane, Y., Dutta, D., Yeomans, N. (1992): Design guide for rectangular hollow sections (RMS) joint nodes predominantly static loading. CIDECT, Verlag TÜV Rheinland.
- Pahl, G., Beelich, K.H. (1982): Kostenwachstumsgesetze nach Aenlichkeitsbeziehungen für Schweissverbindungen. VDI-Bericht Nr. 457. Düsseldorf, p. 129-141.
- Pappas, M. (1980): An improved direct search numerical optimization procedure. *Computers and Structures*, Vol. 11, pp. 539-557.
- Pareto, V. (1996): *Cours D' Economie Politique*. Volumes 1, 2, F. Rouge, Lausanne, Switzerland.
- Páczelt, I. (1980): Some optimization problems of contact bodies within the linear theory of elasticity. *Variational Methods in the Mechanics of Solids*, Ed. S. Nemat-Nasser, Pergamon Press, Oxford.
- Páczelt, I., Szabó T. (1994): Optimal shape design for of contact problems. *Structural Optimization*, Vol. 7, No. 1/2, p. 66-75.
- Pearce, T. R. A., Webber J. P. H. (1971): Buckling of sandwich panels with laminated face plates, *Aeronautical Quarterly*, Oct. pp. 148-160.
- Pelikán, J. (1957): Theory of highly economical reinforced concrete beams. *Acta Techn. Acad. Sci. Hung.* XVIII. 1-2.
- Perey, J. (1959): Über eine neue Minimaufgabe der technischen Festigkeitslehre. *Acta Techn. Acad. Sci. Hung.* XXIV. 3-4.
- Personal Consultant Easy (1987), Getting Started, Reference Guide, Texas Instruments Incorporated, Austin, Texas.
- Pomázi, L. (1980): Stability of rectangular sandwich plates with contructionally orthotropic hard layers. *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*, Vol. 24, No. 3, Budapest.
- Prager, W. (1957): Linear programming and structural design. Technical Report, Brown University, Office of Naval Research.
- Powell, M. J. D. (1965): A method for minimising a sum of squares of nonlinear functions without calculating derivatives. *Computer Journal*, Vol. 7, pp. 303-307.
- Rácz, S. (1984): Vékonyfalú szelvények optimális méretezése, Egyetemi doktori értekezés, NME, Miskolc.
- Rao, S. S. (1984): Optimisation theory and applications. Wiley Eastern Limited, New Delhi.
- Rosen, J. B. (1960): The gradient protection method for nonlinear programming. Part I. Linear constraints. *Journal of Soc. Indust. Appl. Math.* Vol. 8, pp. 181-217.
- Rosenbrock, H. H. (1960): An automatic method for finding the greatest or least value of a function. *Computer Journal*, Vol. 3, pp. 175-184.
- Roy, B. (1971): Problems and methods with multiple objective functions. *Math. Program.* Vol. 1, pp. 239-266.
- Salukvadze, M. E. (1974): On the existence of solution in problems of optimi2ation under vector valued criteria. *Journal of Optimization, Theory and Applications*. Vol. 12, No. 2, pp. 203-217.
- Scales, Z. E. (1985): Introduction to non-linear optimization. Mac Pl illan Publishers Ltd. London.

- Schittkowski, K. (1980): Nonlinear programming codes. Lecture notes in Economics and Mathematical Systems, Vol. 183. Springer, Heidelberg.
- Schmit, L. A. (1960): Structural design by systematic synthesis. Proc. 2nd. Conf. Elektronik Computation, ASCE, New York, 105-132.
- Schmit, L. A., Miura, H. (1978) : An advanced structural analysis/synthesis capability ACCESS2. Int. Journal for Numerical Methods in Engineering. Vol. 12. pp. 353-357.
- Schmit, L. A. Fleury, C. (1979): An improved analysis-synthesis capability based on dual methods ACCESS 3. AIAA. Vol. 18. p. 1252-1260.
- Siddall, J. N. (1972): Analytical decision - making in engineering design. Prentice-Hall, inc. Englewood Cliffs, New Jersey.
- Siddall, J. N. (1982): Optimal engineering design. Principles and application. Marcel Dekker Inc. New York.
- Sion, M. (1958): On general minmax theorems. Pacific Journal of Mathematics. Vol. 8. pp. 171-176.
- Solish, R. (1969) : Zadanie programowania liniowego z wieloma funkcjami celu. Przegląd Statystyczny, Vol. 16. pp. 24-30.
- Stadler, W. (1979) : A survey of multicriteria optimization or the vector maximum problem. Part I. Journal of Optimization Theory and Applications. Vol. 25. No. 1. pp. 1-52.
- Stadler, W. (1984): Multicriteria optimization in mechanics (A Survey). Applied Mechanics Reviews, Vol. 37. No. 3. pp. 277-286.
- Stamm, K., Witte, H. (1974): Sandwichkonstruktionen, Springer- Verlag, Wien, New York. pp. 338.
- Svanberg, K. (1991a): The method of moving asymptots (MMA) with some extensions. Optimization of Large Structural Systems, NATO/DFG ASI Seminar, Berchtesgaden, 1991. Lecture notes, Vol. 1. p.55-66.
- Svanberg, K. (1991b): Local and global minima. Optimization of Large Structural Systems, NATO/DFG ASI Seminar, Berchtesgaden, 1991. Lecture notes, Vol. 1. p.316-325.
- Timár, I. (1985): Szendvicselemek optimalis méretezése. Kandidátusi disszertáció. Veszprémi Vegyipari Egyetem.
- Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, S. (1959): Theory of plates and shells. 2nd ed. McGraw Hill, New York.
- Ungar, E. E. (1962): Loss factors of viscoelastically damped beam structures, Journal of the Acoustical Society of America, No. 34. pp. 1082-1089.
- Usami, Ts., Fukumoto, Y. (1982): Local and overall buckling of welded box collumns. J. Struct. Div. Proc. ASCE, Vol. 108, No. ST 3. p. 525-541.
- Vanderplaats, G. N. (1984): Numerical optimization techniques for engineering design, with applications. Mc Graw-Hill Book Co. New York.
- Vásárhelyiné, A., Lógó, J. (1986): Design of steel frames by multicriterion optimization. Acta Technica.. Akadémiai Kiadó, Vol. 99. No. 3-4. pp. 413-418.
- Walkner, R. J. (1960): An enumerative technique for a class of combinatorial problems, Combinatorial analysis. Proceedings of Symposia in Applied Mathematics Vol. 10. American Mathematical Society, Providence R. I.
- Weisman, J. (1968): MINIMAL, a combined optimisation technique Ph. D. Dissertation, University of Pittsburgh. Pittsburgh, Pa.
- Yin, T. P., Kelly, T. J., Barry, J. B. (1967): Quantitative evaluation of constrained-layer damping, Trans. ASME, Journal of Engineering for Industry, No. 11. pp. 773-784.
- Yu, P. Z., Zeleny, M. (1975): The set of all nondominated solutions in linear cases and a multicriteria simplex method. J. Math. Anal. Appl. Vol. 49. No. 2. pp. 430-468.
- Zhou, J.L., Tits, A. (1992): User's guide for FSQP Version 3.0: a Fortran code for solving optimization problems. Systems Research Center, University of Maryland, Techn. Report SRC-TR-90-60 rtf, College Park.
- Zionts, S. (ed) (1978): Multiple criteria problem solving. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. No. 155. Springer-Verlag, New York.
- Zoutendijk, G. (1960): Methods of feasible directions. Elsevier, Amsterdam.

VII. TARTALOMJEGYZÉK

I. BEVEZETÉS, TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK.....	1
II. A TUDOMÁNYOS TEVÉKENYSÉG ÖSSZEFOGLALÁSA	4
III. ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	8
1. DÖNTÉSTÁMOGATÓ PROGRAMRENDSZER TOVÁBBFEJLESZTÉSE.....	8
2. FUTÓDARU HÍDFŐTARTÓ OPTIMÁLIS MÉRETEZÉSE	11
3. PROFILOS FEDŐRÉTEGŰ SZENDVICSTARTÓK OPTIMÁLIS MÉRETEZÉSE	17
4. RÁCSOS CSÖSZERKEZETEK OPTIMÁLIS MÉRETEZÉSE	24
5. BORDÁZOTT LEMEZEK OPTIMÁLIS MÉRETEZÉSE	27
6. SZAKÉRTŐI RENDSZEREK ALKALMAZÁSA FÉMSZERKEZETEK OPTIMÁLIS MÉRETEZÉSÉNÉL	34
7. CIPŐIPARI KIVÁGÓGÉPEK MÉRETEZÉSE	39
IV. ÖSSZEFOGLALÁS	44
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS.....	45
V. A TÉMAKÖRÖKBEN KÉSZÜLT 20 LEGFONTOSABB SAJÁT PUBLIKÁCIÓ JEGYZÉKE	46
VI. HIVATKOZÁSOK.....	47
VII. TARTALOMJEGYZÉK	51

Optimum Design of Metal Structures

Written by
Dr. Jármai, Károly
Mechanical Eng., Eur. Ing., PhD., Associate Professor

Summary

This habilitation booklet deals with the optimum design of different steel structures. The aim of the author was to make optimum design, structural synthesis at different steel structures. The first part contains a state of the art review on optimization. The second part contains the summary of the scientific activity made by the author during his scientific career. The third part describes the new scientific results, after the PhD. thesis referring to the most important 20 papers, published in journals and conferences.

The *1st. chapter* deals with the development of a so called decision support system, which contains 10 different single objective algorithms (Flexible tolerance, Direct random search, Hillclimb, Complex, Direct search-feasible directions, Davidon-Fletcher-Powell, Sequential quadratic programming, SUMT, Method of moving asymptotes, Backtrack) and 7 multiobjective optimization techniques (min-max, weighting min-max, two types of global criterion, weighting global criterion, pure weighting, normalised weighting).

The *2nd. chapter* treats the application of the DSS for the design of asymmetric, stiffened box girders of overhead travelling cranes. A numerical example is shown. There are 4 objective functions: mass, welding, surface preparing, total costs. Constraints on stresses, local stability, fatigue, deflection and dimensions have been taken into account. Comparisons made for finding the effect of the objective functions on each other.

The *3rd. chapter* is the application of DSS for sandwich beams, including static and dynamic measurements by Brüel & Kjaer equipment. A numerical example is shown. There are 4 objective functions: aluminium face layers', core material's, gluing-surface preparing and total costs. Constraints on stresses, local buckling, deflection, damping and dimensions have been taken into account. Comparisons made for finding the effect of the objective functions on each other.

The *4th. chapter* is related to the design of truss structures. A finite element program is connected with the optimization part. Constraints on stresses, overall buckling, stability of nodes and dimensions have been taken into account. Comparisons made for finding the effect of the objective functions on each other. A numerical example is shown for belt-conveyor bridge design.

The *5th. chapter* shows the optimum design of stiffened plates taking into account the material and the fabrication costs as objective function. Constraints on stresses, local buckling and dimensions have been taken into account. The material and the fabrication costs ratio vary in a wide range to determine the cost ratio on the structure dimensions.

The *6th. chapter* describes the connection of expert system shells and structural optimization. Two shells were applied and used for design of main girders of overhead travelling crane girders and for belt-conveyor bridge structures.

The *7th. chapter* includes the design of different punch presses from welded plates, reducing the mass of the structures. The presses are rotating head, moving head and moving bridge type. Using very strict limits on stresses and deflections we could do design and after making to measure the structures.