

MISKOLCI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI ÉS INFORMATIKAI KAR



**GENERATÍV TERVEZÉSI MÓDSZEREK ÉS ALGORITMUSOK
FELTÁRÁSA KÜLÖNFÉLE GYÁRTÁSI TECHNOLOGIÁKKAL
GYÁRTHATÓ ALKATRÉSZEK TERVEZÉSÉHEZ**

PHD ÉRTEKEZÉS

Készítette:

Szabó Kristóf
okleveles gépészmérnök

SÁLYI ISTVÁN GÉPÉSZETI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
GÉPEK ÉS SZERKEZETEK TERVEZÉSE
SZERSZÁMGÉPEK TERVEZÉSE TÉMACSOPORT

Doktori Iskola vezető:

Vadászné Prof. Dr. Bognár Gabriella
a műszaki tudomány doktora, egyetemi tanár

Témacsoport vezető:

Dr. Hegedűs György
egyetemi docens

Tudományos vezető:

Dr. Hegedűs György
egyetemi docens

Miskolc
2025

TARTALOMJEGYZÉK

TARTALOMJEGYZÉK	I
TÉMAVAZETŐ AJÁNLÁSA.....	III
JELÖLÉSJEGYZÉK.....	IV
1. BEVEZETÉS	8
1.1. <i>A disszertáció célkitűzései.....</i>	<i>9</i>
2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS, TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK.....	10
3. TERVEZÉSMÓDSZERTAN ELMÉLETI ALAPJAI.....	14
3.1. <i>Klasszikus tervezésmódszertani eljárások.....</i>	<i>14</i>
3.1.1. <i>Intuitív tervezési modell</i>	<i>16</i>
3.1.2. <i>Kognitív tervezési modell.....</i>	<i>18</i>
3.1.3. <i>Diszkurzív tervezési modell.....</i>	<i>19</i>
3.1.4. <i>Evolúciós tervezési szemlélet.....</i>	<i>22</i>
3.1.5. <i>Matematikai tervezési szemlélet.....</i>	<i>24</i>
3.2. <i>A generatív tervezés és a klasszikus géptervezés kapcsolata.....</i>	<i>25</i>
3.2.1. <i>A soros tervezési folyamat</i>	<i>25</i>
3.2.2. <i>A párhuzamos tervezési folyamat.....</i>	<i>27</i>
3.2.3. <i>A generatív tervezési folyamat</i>	<i>29</i>
4. SZÁMÍTÓGÉPPEL TÁMOGATOTT GENERATÍV TERVEZÉS.....	32
4.1. <i>Elméleti alapok.....</i>	<i>32</i>
4.1.1. <i>Homogenizációs módszer.....</i>	<i>33</i>
4.1.2. <i>SIMP módszer.....</i>	<i>33</i>
4.1.3. <i>Szintfüggvény módszerek</i>	<i>38</i>
4.1.4. <i>Topológiai deriváltak módszere.....</i>	<i>39</i>
4.1.5. <i>Fázismezők módszere.....</i>	<i>39</i>
4.1.6. <i>Evolúciós módszerek.....</i>	<i>40</i>
4.1.7. <i>Fordított adaptáció módszere</i>	<i>40</i>
4.1.8. <i>Buborék módszer.....</i>	<i>40</i>
4.1.9. <i>Szintvonalak módszere</i>	<i>41</i>
4.2. <i>Topográfiai optimalás és generatív tervezés kapcsolata.....</i>	<i>41</i>
5. A GENERATÍV TERVEZÉSI FOLYAMATOT LEÍRÓ ÚJ MÓDSZERTAN	43
5.1. <i>A generatív tervezést támogató szoftverek felépítése</i>	<i>43</i>
5.2. <i>Új leírási módszer a generatív tervezés folyamatában.....</i>	<i>46</i>
5.2.1. <i>Modellalkotási szakasz.....</i>	<i>46</i>
5.2.2. <i>Szimulációs modellalkotási szakasz</i>	<i>49</i>
5.2.3. <i>Megoldások generálásának szakasza.....</i>	<i>49</i>
5.2.4. <i>Értékelési szakasz</i>	<i>51</i>
6. ESETTANULMÁNY A SZERSZÁMGÉPTERVEZÉS TERÜLETÉN	52
6.1. <i>Hagyományos módszerrel tervezett szerszámcserélő.....</i>	<i>52</i>
6.2. <i>Mechanikai modellalkotás.....</i>	<i>60</i>
6.3. <i>Generatív módszerrel tervezett szerszámcserélő.....</i>	<i>69</i>
6.3.1. <i>Tervezési térfogat.....</i>	<i>69</i>
6.3.2. <i>Konstrukciós geometriák</i>	<i>70</i>

6.3.3. Kényszerek	70
6.3.4. Terhelések	71
6.3.5. Megoldások generálása	73
6.4. Eredmények kiértékelése	77
6.4.1. Műszaki értékelési szempontok	79
6.4.2. Gazdasági értékelési szempontok	81
7. ÖSSZEFOGLALÁS	83
8. TÉZISEK – ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK	84
9. SUMMARY	87
KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	88
IRODALOMJEGYZÉK	89
PUBLIKÁCIÓK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN	96
MELLÉKLETEK	99

TÉMAVEZETŐ AJÁNLÁSA

Szabó Kristóf okleveles gépészmérnök

*Generatív tervezési módszerek és algoritmusok feltárása különféle gyártási technológiákkal
gyártható alkatrészek tervezéséhez*
c. PhD értekezéséhez

Szabó Kristóf 2019. szeptemberében kezdte meg PhD tanulmányait a Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskolában. Tanulmányai kezdetekor bekapcsolódott a Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet aktuális kutatása projektjeibe, melynek aktív szereplője volt. Kutatási területe a módszeres géptervezés, azon belül is a szerszámgépelemek és gyártóeszközök módszeres tervezése. A generatív tervezési módszerek megjelenésével a tervezésmódszertan területe is új irányokat és lehetőségeket kapott.

Szabó Kristóf PhD értekezése a generatív tervezési módszerek és algoritmusok feltárására fekteti a kutatásait, figyelembe véve az adott alkatrészek gyártásitechnológiáját is. A jelölt az elért eredményeit egy esettanulmányon keresztül mutatja be és foglalja össze, melynek tézisei a módszeres géptervezés és generatív tervezés kapcsolatára ad válaszokat. A dolgozat több évi kitartó kutatómunka és kutatási projektek tapasztalataiból is merített, mely a tudomány gazdagításán túl hozzájárul a módszeres géptervezés új eszközeihez is. Az értekezésben bemutatott eredmények a jelölt saját eredményei.

Szabó Kristóf az elért eredményekről rendszeresen beszámolt a különböző hazai és nemzetközi fórumokon, eleget téve a Miskolci Egyetem Sályi István Gépészeti Tudományok Doktori Iskola publikációs követelményeinek.

Az előzőek figyelembevételével jó szívvel javaslom az értekezés elfogadását és sikeres védelem esetén a PhD fokozat odaítélését.

Miskolc-Egyetemváros, 2025. augusztus 15.

.....
Dr. Hegedűs György
egyetemi docens, témavezető

JELÖLÉSJEGYZÉK

GÖRÖG BETŰS JELÖLÉSEK

α	szögérték
β	szöggyorsulás
γ_i	i -edik megoldásra vonatkozó generáltsági fok
δ_i	i -edik megoldásra vonatkozó relatív tömegcsökkentés
ε	relatív nyúlás
η	beállító paraméter
θ	tehetetlenségi nyomaték
Λ	Lagrange multiplikátor
$\lambda_{m\ddot{u}i}$	i -edik műszaki szempont súlyértéke
λ_{gi}	i -edik gazdasági szempont súlyértéke
ν	Poisson tényező
ξ_1	természetes koordináta
ξ_2	természetes koordináta
ξ_3	természetes koordináta
ρ	sűrűség
σ_{meg}	megengedett feszültségérték
$\sigma_{i(max)}$	i -edik megoldás maximális feszültségértéke
ς	mozgási korlát
φ	szögérték
ψ_i	i -edik megoldásra vonatkozó relatív forgási energiacsökkentés
ω	szögsebesség

LATIN BETŰS JELÖLÉSEK

a	kétdimenziós végelem vertikális paraméter
$a_{i(cs)}$	i -edik megoldásra vonatkozó anyagtakarékosság
$\mathbf{a}_c$	centripetális gyorsulás
$\mathbf{a}_k$	kerületi gyorsulás
A	konstrukciós térfogat részhalmaz

b	kétdimenziós végeelem horizontális paraméter
b	biztonsági tényező
$b_{i(r)}$	relatív biztonsági tényező
$b_{i(v)}$	valós biztonsági tényező
$\mathbf{b}$	B konstrukciós geometriákra vonatkozó funkció kapcsolati vektorok
B	konstrukciós térfogat részhalmaz
$\mathbf{B}$	feszültség-elmozdulási mátrix
C	konstrukciós térfogat részhalmaz
$\mathbf{C}$	globális hajlékonysági mátrix
$\mathbf{C}_i^0$	konstitutív mátrix
D	konstrukciós térfogat részhalmaz
$e_{m\ddot{u}i}$	i -edik műszaki szempont pontértéke
e_{gi}	i -edik gazdasági szempont pontértéke
E_f	forgási energia
E	konstrukciós térfogat részhalmaz
E_θ	rugalmassági modulus
E_{min}	üreges anyag rugalmassági modulusa
f_{ij}	struktúra mátrix valamely eleme
F	konstrukciós térfogat részhalmaz
F_i	funkció
$\mathbf{F}$	struktúra mátrix
$\mathbf{F}_c$	centrifugális erő
$\mathbf{F}_k$	kerületi erő
$\mathbf{F}_{c2gy}$	kettes test centrifugális ereje a gyorsító szakaszban
$\mathbf{F}_{c2gyx}$	kettes test centrifugális x irányú erőkomponense a gyorsító szakaszban
$\mathbf{F}_{c2gyy}$	kettes test centrifugális y irányú erőkomponense a gyorsító szakaszban
$\mathbf{F}_R$	rugóerő
$\mathbf{F}_{Rx}$	rugóerő x irányú erőkomponense
$\mathbf{F}_{Ry}$	rugóerő y irányú erőkomponense
$\mathbf{F}_{kl}$	egyes test kerületi ereje a lassítási szakaszban
$\mathbf{F}_{klx}$	egyes test kerületi erő x erőkomponense a lassítási szakaszban
$\mathbf{F}_{kly}$	egyes test kerületi erő y erőkomponense a lassítási szakaszban
$\mathbf{F}_{ci}$	i -edik test centrifugális ereje
$\mathbf{F}_{igyx}$	i -edik test kontakt felületére ható x irányú erő a gyorsítási szakaszban
$\mathbf{F}_{igy}$	i -edik test egyes test kontakt felületére ható y irányú erő a gyorsítási szakaszban
$\mathbf{F}_{igy}$	i -edik test kontakt felületére ható z irányú erő a gyorsítási szakaszban

$\mathbf{F}_{ilx}$	i -edik test kontakt felületére ható x irányú erő a lassítási szakaszban
$\mathbf{F}_{ily}$	i -edik test kontakt felületére ható y irányú erő a lassítási szakaszban
$\mathbf{F}_{ilz}$	i -edik test kontakt felületére ható z irányú erő a lassítási szakaszban
$\mathbf{F}_{4x}$	a rugó kontaktfelületére ható x irányú erő
$\mathbf{F}_g$	generált funkcióstruktúra mátrix
$\mathbf{F}_{ki}$	i -edik test kerületi ereje
$\mathbf{F}_{Tc}$	támasztóerő a centrifugális erő esetén
$\mathbf{F}_{Tk}$	támasztóerő a kerületi erő esetén
$g(k)$	generálási kötöttség
$g(sz)$	generálási szabadság
$\mathbf{g}$	nehézségi gyorsulás
G	konstrukciós térfogat részhalmaz
G	csúsztató rugalmassági modulus
$\mathbf{G}_i$	i -edik test gravitációs ereje
$\mathbf{G}$	generált kapcsolati mátrix
$Gy_{(öntés)}$	öntési eljárással készült megoldás technológiaigénye
$Gy_{(forg.)}$	forgácsolási eljárással készült megoldás technológiaigénye
$Gy_{(additív)}$	additív eljárással készült megoldás technológiaigénye
H	alaphalmaz
H_{ij}	végelem súlytényező
i	ciklusváltozó
i_i	az intuíció szükségessége
j	ciklusváltozó
k	aktuális iterációs lépés
$K_{sz(öntés)}$	öntési eljárás szerszámköltsége
$K_{sz(forg.)}$	forgácsolási eljárás szerszámköltsége
$K_{sz(additív)}$	additív eljárás szerszámköltsége
$K_{g(öntés)}$	öntési eljárás gépköltsége
$K_{g(forg.)}$	forgácsolási eljárás gépköltsége
$K_{g(additív)}$	additív eljárás gépköltsége
$\mathbf{k}_i$	az elasztikus szilárd elem merevségi mátrixa
$\mathbf{K}$	globális merevségi mátrix
$\mathbf{K}_i^0$	merevségi mátrix
L	távolság
m	tömeg
m_0	eredeti alkatrész tömege

m_i	a terv elvárt minőségének a valószínűsége
$m_{i(g)}$	i -edik generált megoldás tömege
$M_{cél}$	optimalizálás céltömeg
M_i	i -edik megoldás
$\mathbf{M}$	megoldás mátrix
$\mathbf{M}_c$	centrifugális erő okozta billenő nyomaték
$\mathbf{M}_k$	kerületi erő okozta billenő nyomaték
$\mathbf{M}_{közp.}$	középpontba számított nyomatékigény
n	elemszám
N	a tervezési tartomány végeselem száma
p	büntetőfaktor
P	ideális pont
r	sugár
R	szűrőméret
$\mathbf{r}$	sugár helyvektor
t_i	a tervezéshez szükséges idő
u_k	k -edik iterációs lépés
$\mathbf{U}$	csomóponti elmozdulás vektor
v_i	végeselem térfogat
V_0	tervezési térfogat
V_i	i -edik megoldás térfogata
$V_{i(ga)}$	generált anyagmennyiség
$V_{i(k)}$	konstrukciós térfogat
$\mathbf{v}$	sebességvektor
$\mathbf{v}_k$	kerületi sebesség vektor
x	generált anyagkapcsolat
x_i	fiktív relatív anyagsűrűség
$\tilde{x}_i$	módosított anyagsűrűség
x_{min}	minimális relatív sűrűség
$\tilde{x}_{min}$	minimális módosított sűrűség
$\tilde{x}$	fizikai sűrűség
$\mathbf{X}$	konstrukciós térfogat kapcsolati mátrix

1. BEVEZETÉS

A hétköznapi termékekben, gépekben, valamint a különféle gyártóeszközökben felhasznált alkatrészek esetében tényként kezelendő, hogy a folyamatos fejlődés és az innováció állandó célkitűzés.

A piaci és társadalmi igények, valamint a műszaki tudományok fejlődése folyamatos kényszert gyakorol arra, hogy ezek a termékek és alkatrészek napról napra új külső megjelenéssel vagy esetlegesen új funkcionális kritériumoknak való megfeleléssel születhessenek újjá. Ezen termékek vagy alkatrészek folyamatos fejlesztése, tervezése és szimulációs ellenőrzése nagy anyagi ráfordítást igényel, amelyhez rendkívül sok mérnöki, szellemi és fizikai munka párosul. Ezek a befektetett erőforrások arra irányulnak, hogy lépést lehessen tartani a fogyasztók igényeivel és az ipar nagy mértékű fejlődésével. Ettől eltekintve, még mindig érvényes az a tényszerű megállapítás és szemlélet, amely gazdasági szempontok alapján értékeli a konstrukciós tevékenységeket, miszerint a tervezési folyamat korai fázisban felfedezett tervezési hibák megoldásának várható költségei a legalacsonyabbak, figyelembe véve egy termék teljes életútját. Ezen logika alapján a teljes tervezési és fejlesztési folyamat során a konstruktőr mérnök felelősége a legnagyobb. Ennek megfelelően igaz állításnak tekintjük azt, hogy a legkevesebb ráfordítással, a legnagyobb gazdasági eredményt a műszaki fejlesztés révén lehet elérni. A számítástechnika segítségével létrejöhett a generatív tervezési modell, amely megreformálja a klasszikus tervezési módszertanok metódusait, szemléleteit és a különféle szabályrendszereit. A tervezési modell utánozza a természet evolúciós megközelítését, hogy akár több ezer megoldást tudjon szolgáltatni egyetlen mérnöki problémára. A mesterséges intelligenciára épülő szoftverekkel és a számítógépek teljesítményének kiaknázásával teszi lehetővé, hogy a mérnökök több száz vagy akár több ezer tervváltozatot hozzanak létre egy tervezési probléma meghatározásával, azaz az alapvető paraméterek, például a geometriai méretek, a terhelés, a szilárdság és az anyagváltozatok megadásával. Ezt a fajta tervezési módszert kombinálva az additív gyártástechnológia pozitív tulajdonságaival, relatíve kis idő alatt olyan használati tárgyak vagy speciális alkatrészek jöhetnek létre, amelyek anyagtakarékosabbak, ezáltal kisebb tömegűek vagy bizonyos esetekben terhelhetőbbek a hagyományos eljárásokkal előállított alkatrészekhez képest.

A kutatásom célja, hogy a generatív tervezési eljáráshoz megvizsgáljam a jelenleg alkalmazott tervezésmódszertani elveket és azok alkalmazhatóságát a generatív tervezési folyamatokban. A módszeres tervezésben alkalmazott kombináción alapuló megoldáskeresés mintájára olyan módszert és egyedi leírásmódot szeretnék megalkotni, amely megfelelően jellemzi és különbözteti meg a generatív tervezési technikával előállított megoldásokat. Az eredmények kiértékelésére új szempontokat szeretnék megfogalmazni, amely objektív módon segíti az osztályozás folyamatát. Új tervezésmódszertani szemléletet dolgozok ki a generatív tervezéshez, amely alkalmazható a termék különféle gyártástechnológiákkal történő előállítása esetén.

1.1. A disszertáció célkitűzései

A korszerű, új gyártóeszközök termelékenységére vonatkozó jellemzők folyamatosan javulnak, anélkül, hogy a pontossági paraméterek romló tendenciát mutatnának. Ez a jelenség főként az automatizált gyártóeszközök vezérlésének köszönhető, amely rohamos fejlődésen esett át az elmúlt évtizedekben.

Egy előállított termék, alkatrész vagy egyéb gyártmány elvárt tulajdonságait és azok minőségét jellemző paramétereket nagy mértékben befolyásolják az alkalmazott tervezési metódus és az előállításához használt gyártóeszközök képességei és milyensége. Ezért fontos a fejlesztés és a folyamatos innováció, hogy a gépek pontossága, valamint mechanikai és dinamikai tulajdonságai javulást mutassanak, amelyek kiszolgálják az új szerszám gép fejlődési irányzatokat, valamint az ezeken a gépeken előállított gyártmányokra vonatkozó minőségi elvárásokat. A *miskolci géptervező iskolában* használatos az úgynevezett anyagép fogalma, hiszen minden alkatrészt, gépelemet és gépet szerszámgépeken állítanak elő, ezért különösen fontos a szerszámgépek főegységeinek, részegységeinek és azok alkatrészeinek pontosságának és megbízhatóságának növelése. Egy szerszám gép megmunkálási pontosságát és termelékenységét számos tényező befolyásolhatja, ilyen például a mechanikai és dinamikai merevség vagy a pozicionálási pontosság és ismétlési pontosság. Az előző évtizedek alapján jelentős technikai fejlődés figyelhető meg a gyártástechnológia területén, ugyanis kifejlődtek és egyre inkább elterjedtek az additív megmunkálások, amelyeknek folyamatos motiváló ereje van az additív szerszámgépek fejlődésében. Ezek az innovatív eljárások kikényszerítik azt, hogy a társtudományok, mint például a gép- és terméktervezés módszertana és annak szemlélete lépést tudjanak tartani a modern elvárásokkal.

A kutatásom főként az új szemléletű tervezésmódszertani eljárásokra koncentrálódik, amelynek célja, hogy kutatómunkám segítségével megállapíthassam, hogy az újdonság erejével bíró mesterséges intelligencia segítette generatív tervezési folyamat által létrejövő termékek és alkatrészek, hogyan épülnek be a klasszikus géptervezési szemléletek eszközrendszerébe. További célkitűzéseim közé tartozik, hogy megvizsgáljam a generatív tervezési eljáráshoz jelenleg alkalmazott tervezésmódszertani elveket és azok alkalmazhatóságát a generatív tervezési folyamatokban, valamint új tervezésmódszertani szemléletet és tervezési módszert dolgozzak ki a generatív tervezéshez, figyelembe véve a termék additív gyártástechnológiával történő előállítását. A sikeres munka reményében az alábbi tevékenységeket szeretném elvégezni a megadott sorrend betartása mellett:

- A kutatási témával összefüggő részletes irodalomkutatást és helyzetfelmérést végzek;
- vizsgálatot végzek a hagyományos tervezésmódszertani elvek tudományterületén és azok alkalmazhatóságára a generatív tervezési folyamatban;
- vizsgálatokat és elemzést végzek a generatív tervezési algoritmusok területén;
- megvizsgálom a generatív tervezési eljárások szerepét a szerszámgépelemek tervezésében;
- az elért eredményeket esettanulmány segítségével igazolom, feldolgozom és kiértékelem;
- új tervezésmódszertani leírásmódot javaslok a generatív tervezési eljáráshoz.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS, TUDOMÁNYOS ELŐZMÉNYEK

A gép és terméktervezés módszertanának kutatása és fejlődéstörténete közel száz évre vezethető vissza, a tématerülettel foglalkozó feltárt tanulmányok alapján. A tervezésmódszertan szakterületének kutatói nagyszámú módszert mutattak be, amelynek jelentős része egy részletes, egzakt lépéseken átvezető tervezési folyamat, amelyek erősítik a módszeres tervezés alap gondolatát, miszerint a különféle tervezési folyamatok könnyedén elsajátíthatóvá válnak. A módszeres géptervezés alapjai az 1920-as évekhez köthetők, Németországból erednek.

Kesselring az 1937-es évektől kezdve publikált értékelő eljárásokról, majd 1942-ben megjelent könyvében mutatta be a konvergens közelítő eljárásának alapjait [1]. Kesselring módszerét később a VDI 2225 [94] foglalta össze [2]. Wögerbauer javaslata szerint egy teljes tervezési feladatot további részfeladatokra kell tagolni [3]. Biniek nevéhez köthető a „Konstruktionssystematik” kifejezés, amelyet elsőként használt 1952-ben [4]. Az első tervezési módszerekkel foglalkozó konferencia 1962-ben került megrendezésre Londonban, „Conference on Design Methods” elnevezéssel [5].

Az *ilmenai iskola* megalapozói Bischoff és Hansen voltak. Hansen az 1950-es évek óta foglalkozott a tervezésmódszertan alapjaival, a rendszerére vonatkozó elvi szempontokat 1965-ben foglalta össze [6]. Rodenacker szerint egy gép vagy termék előírt funkciójának ellátása egy fizikai eseményen alapul. A tervezési folyamatot információátalakításként írja le [7].

A *berlini iskola* megalapítója Beitz, akinek a munkássága szorosan összekapcsolódik a darmstadti tervezőiskola megteremtőjével, Pahl-al [8]. Hubka megalkotta a rendszerszemléletű tervezésmódszertan alapjait és a Műszaki Rendszerek Elméletének megalkotójaként említhető. Az ő nevéhez köthető az ICED (*International Conference on Engineering Design*) elnevezésű konferencia, amelynek egyik létrehozó tagja volt [9], [10]. Roth nevéhez köthetők a tervezési katalógusok. Ő volt az egyik korai felismerő, aki meglátta a grafikus számítógépek alkalmazásának lehetőségét a módszeres tervezés területén. Módszerének elvi alapja a táblázatosan összegyűjtött tudásanyag tudásbázisként való alkalmazása. Kidolgozta az algoritmikus tervezői modelljét, hogy a folyamatot automatizálhatóvá tegye [11]. Althsuller a Feltalálói Problémamegoldás Módszerének, vagyis a TRIZ módszernek (*Theorija Reshenija Izobretatel'skih Zadach*) a kidolgozója. Ez a módszer a logikai felépítésében eltér a meglévő módszerektől. Munkája során számos szabadalmat tanulmányozott, melyek alapján törvényszerűségeket fedezett fel bennük. Az 1970-es években publikálta módszerét [12]. Linde és Hill dolgozta ki az Ellentmondásorientált Innovációstratégiát (*Widerspruchorientierte Innovationsstrategie*), vagyis a WOIS-t. Ez az eljárás a TRIZ módszerhez hasonló, alapjait Linde fogalmazta meg 1988-ban. A WOIS-ban integrálódnak a QFD (*Quality Function Deployment*), a brainstorming, a szinekтика, a rendszerelmélet és az értékelemzési módszerek. A WOIS-ban a hangsúly a fejlesztési módszerek felfedezésén és az innovatív feladatok generálásán van [13].

A terméktervezési módszertan kutatásának méltó szereplője a *budapesti tervező iskola*, amelynek meghatározó tevékenységét a terméktervezés korszerű eszközrendszerének kutatása és fejlesztése jellemezte. A terméktervezés első magyar megalapozójának Bercsey tekinthető, aki idegen nyelvű szakirodalmakat fordított, emellett számos jegyzetet állított össze, amely bevezette a hazai oktatásba a tervezésmódszertan tudományát [14] - [18]. Bercsey és Vajna újszerű eljárások kidolgozásával foglalkoztak, amelyek közül az egyik legfontosabb az Autogenetikus Algoritmus [19], [20]. Horváth munkássága legfőképpen a terméktervezés számítógépes eszközrendszereinek kutatására és fejlesztésére terjed ki [21].

A *miskolci tervezőiskola* megalapozó tagjai Tajnafői és Terplán voltak. A módszeres géptervezés alapelveit Döbröczöni és Kamondi átvezették a terméktervezési eljárásokra, majd bevezették az oktatásba [22], [23]. Tajnafői jelentős tervezésmódszertani eljárásokat dolgozott ki szerszámgépek tervezésével kapcsolatosan [24] - [26]. Tajnafői kutatási eredményei nagy hatást gyakoroltak Lipóth és Takács munkásságára, akik ezeket a módszereket felhasználva számítógépes struktúrageneráló módszereket dolgoztak ki [27], [28]. A kombinatorikus megoldáskeresésen alapuló tervezési módszerek kutatója Takács [29], továbbá Furka [30], [31]. A módszeres tervezésben jelentős eredményeket ért el Nagy [32].

Az alakadás vagy más szóval funkcionális alakra való törekvés tekintetében elsősorban a katalógus alapú tervezés hozta meg azt a fajta igényt, hogy a meglévő gépelemeket rendszerezni kell [11]. Ez pedig előírta, hogy bizonyos szabályok, rendszerezések születtek [33], [28], [34]. A gyártáshelyes konstrukcióra való törekvés vezetett a DFM-hez (Design for Manufacturing), ami a DfX technikák egyik eleme [35]. A moduláris elvű tervezés DfM (Design for Modularity) területén Gotthard kutatási eredményei emelhetők ki [36].

A topológiai optimalizálás egy számítási anyageloszlási módszer struktúrák előzetes elképzelés nélküli formájának szintetizálására. Ez a szabadság teszi lehetővé, hogy innovatív és teherhordó szerkezeti elrendezéseket hozzon létre. Rácsszerű szerkezetekre a struktúrák topológia optimalizálásának fontos alapelveit Michell 1904-ben állapította meg [37]. Schmit az 1960-as években felismerte az optimalizálási módszerek szerkezeti tervezésre vonatkozó végeselemes analízissel való ötvözésének lehetőségét, majd publikálta tanulmányát, amelyben a végeselemes elemzést numerikus optimalizálással kapcsolta össze [38]. Schmit és Thornton 1965-ben bemutattak egy szuperszonikus repülőgépszárny tervezését, beleértve az aerodinamikát és a szerkezeteket [39]. Fox 1965-ben megírta a szabványos végeselem elemzést, amelyet a viselkedésérzékenység-elemzés közvetlen módszerének neveznek [40]. Lee és társai 1967-ben publikáltak egy tanulmányt a számítógépes repülőgép-szintézisről [41]. Fox és Kapoor bemutattak egy módszert a sajátértékek és sajátvektorok deriváltjainak kiszámítására [42]. 1968-ban Thornton és Schmit publikált egy multidiszciplináris tanulmányt egy hőszerkezeti panelről [43]. Az 1960-as években a technológia nem igazán érvényesült, mert a számítási költségek túl magasak voltak.

Az 1960-as évek végén Venkayya és társai olyan diszkretizált optimalizálási kritériumokat dolgoztak ki, amelyek nagyobb problémákat tudtak megoldani [44]. A numerikus optimalizálás gyengeségét demonstrálta Gallatly, Berke és Gibson tanulmánya, ahol az 1960-as éveket a szerkezetoptimalizálás a „*diadal és a tragédia*” időszakának nevezték, amely nem több egy

„*érdekes kutatási játéknál*” [45]. Fleury és Sander 1978-as tanulmányuk szerint „*az optimalizálási kritérium valójában kettős megfogalmazás, ha formális optimalizálási módszernek tekintjük*” [46].

Az 1970-es évek közepén Schmit második jelentős fejlesztése a közelítési koncepciók voltak, amely arra biztatta a tématerület kutatóit, hogy keressenek hatékony közelítéseket a számítási költségek csökkentése érdekében. Kiemelkedő eredménynek bizonyult Shelangoskie mesterdolgozata [47]. Később Rozvany kiterjesztette Michell megközelítését a rácsokra és sugárrendszerekre vonatkozóan. Figyelembe vette a maximális szilárdságú és maximális merevségű rácsokat és megfelelő feltételeket biztosított az optimalizáláshoz. A módszert kiterjesztette bármely peremfeltételre. Ez a módszer megnyitotta az utat a topológia optimalizálás első általános elméletéhez [48]. Pickett, Rubinstein és Nelson bevezette az alapvektor fogalmát [49]. 1974-ben Schmit és Farshi fizikán alapuló közelítéseket hozott létre a szekvenciális lineáris programozásra vonatkozóan, amely magába foglalta a köztes változók és a köztes válaszok fogalmait [50]. Vanderplaats bemutatott egy módszert a szárnyszelvény numerikus optimalizálására, amely segítségével háromszoros hatékonyságot ért el [51]. Vanderplaats a NASA Ames-nél fejlesztette ki az ACSYNT repülőgép-szintézis programot, ahol a repülőgépek koncepcionális tervezését és optimalizálását végezték [52].

1976-ban Nelson egy egyszerűbb sajátvektor-számítási megközelítést dolgozott ki [53], [54]. Abban az időben nem volt meg a gradiens vagy a megértés a fizikai alapú közelítések létrehozásához. Ezért Vanderplaats a szekvenciális lineáris programozás fogalmát használta, amelyet kibővített másodfokú közelítésekkel. Ez azért volt lehetséges, mert kevés tervezési változó volt, de a függvényértékelések nagyon drágák voltak. Ezt közelítő módszernek nevezte. Ma ezt válaszfelületi közelítéseknek nevezik. Swanson később alkalmazta a technikát ANSYS programjához [55]. 1979-ben Arora és Haug közzétették az „Adjoint” módszert. Bemutattak egy analitikai érzékenységi módszert (SGR), amely a térbeli deriváltak közelítésére használt numerikus technika [56].

1980-ra létrejöttek a szerkezeti szintézis módszerek és az alkalmazások más területeken is kezdtek elterjedni [57]. Schmit 1981-ben bemutatta a rácsos szerkezet példáját a NASA-nak egy kutatási javaslat tekintetében [58]. Bofang és Vanderplaats kiterjesztették Schmit közelítési koncepcióját erőkire, amelyekből a feszültségek számíthatók [59]. 1982-ben Sobieszcanski-Sobieski kiadott egy lineáris dekompozíciós módszert a multidiszciplináris tervezés optimalizálására, amely jelentős mennyiségű, a NASA által finanszírozott kutatáshoz vezetett [60]. Kohn és Strang 1983-ban adott ki egy tanulmányt, amelyben egy keresztmetszet torziójának segítségével megállapították, hogy az általános alakoptimalizálás háromféle régiót eredményezhet, amelyek: szilárd, üres és porózus régiók [61].

Az 1980-as években az optimalizálás elkezdett beépülni a kereskedelmi végelelemes szoftverekbe, mint például a SDRC, ANSYS, RASNA és az MSC. Az 1980-as évek végén az MSC/Nastran 200-as megoldáskódja vált ismertté. Schmit szerint „*az optimalizálásnak van jövője, mert az emberek rájöttek, hogy pénzt lehet vele keresni*” [62]. Bendsoe és Kikuchi homogenizációs módszere mérőföldkönek számított, amelyben a tervezési tartományt perforált mikrostruktúrákkal ábrázolták, hogy a komplex problémát méretoptimalizálássá csökkentsék [63]. Bendsoe, Zhou és

Rozvany kifejlesztette a SIMP módszert, amely a tervezési tartomány minden elemén belül állandó anyagtulajdonságokat feltételez [64], [65]. Canfield a Reyleigh-hányadoson alapuló közelítést hozott létre a sajátértékek kiszámításához [66].

1991-ben Canfield kiadta a saját szerkezet optimalizáló programjukat GENESIS néven, amely teljes mértékben kihasználja a legújabb közelítési technikákat. Rozvany bemutatta, hogy szilárd, izotróp mikrostruktúrák esetén a köztes sűrűségekre vonatkozó büntetőtényező alkalmazása hatékony a topológiai optimalizálás során. Ezt az elméletet elsősorban „grid” típusú struktúrák analitikus optimalizálására alkalmazták, amelynek jelentős következményei voltak a numerikus módszerekre és a nagyobb térfogattörteket igénylő kontinuum struktúrákra az úgy nevezett változó topológia alak optimalizálásra [67] - [69]. Létrejött a STRDOT (Stress DOT) nevű szoftver a BIGDOT-tal együtt, amely sok ezer változót, feszültséget, elmozdulást, frekvenciát és korlátot képes kezelni, amely komplex problémák megoldását tette lehetővé. Jól működő és a hagyományos tervezést optimalizálással modellező módszert foglal magába az EMDO módszer [70]. Ezeken kívül számos referenciakönyv született a témában [71] - [73]. Létrejöttek a könnyen elérhető oktatási számítógépes eszközök, mint például a MATLAB.

2001-ben Sigmund létrehozta a MATLAB-hoz a 99-soros szkriptet a kétdimenziós topológia optimalizálására. Ez a program a merevségi mátrix összeállítását és a beágyazott hurkokon keresztül történő szűrést használja, ami a kódot olvashatóvá teszi, de lassítja a nagyobb problémák megoldását [74]. A MATLAB számára Wang és társai bevezették a 199 soros TOPLSM kódot, a nívófelület-módszer LSM (*level-set method*) felhasználásával [75]. A Zhou és Wang által kifejlesztett háromdimenziós 177 soros szkript a MATLAB-hoz történő hozzájárulás egyike és Sigmund 99 soros kódjának utódja [76]. Liu és társai által fejlesztett topológiai optimalizálási program a Femlab [77]. Ilyen szoftverek közé sorolható az Allaire és Pantz által, a FREEFEM++ számára kifejlesztett formaoptimalizálási program [78], valamint a Hunter által kifejlesztett TOPY, egy szabad felhasználású topológiai optimalizálási program a Python-ban [79]. Challis nevéhez köthető egy 129 soros program, amelyben nívófelület-módszert alkalmazott, diszkrét változó elemekkel [80]. Suresh egy 199 soros *Pareto Optimal Tracing* programot mutatott be, amely topológiai érzékenységek segítségével nyomon követi a Pareto frontját különböző térfogatfrakciókra [81]. Sok'ol hozott létre egy 99 soros programot a Michell-szerű rácsos struktúrákhoz a MATHEMATICA számára [82]. Andreassen és társai egy 88 soros továbbfejlesztett programot mutattak be bizonyos szűrési stratégiákkal együtt. Összehasonlítva a 99 soros kóddal, a 88 soros kód két nagyságrenddel gyorsabb [83]. Talischi és társai bevezették a PolyMesher és a PolyTop alkalmazást a sűrűség alapú topológia optimalizálására sokszögű véges elemek felhasználásával. A sokszögű elemek felhasználásával ezek a programok alkalmasak tetszőleges, nem derékszögű tervezési tartományokra kétdimenziós problémák esetén [84]. A Thesame kutatócsoportból, Aage és társai által létrehozott TopOpt program volt az első topológia-optimalizáló alkalmazás a kézi eszközökhöz [85]. A 169 soros top3d néven bemutatott kód különböző stratégiákat tartalmaz a háromdimenziós topológia optimalizáláshoz [86].

3. TERVEZÉSMÓDSZERTAN ELMÉLETI ALAPJAI

A műszaki világban a tervezési tevékenység célja az, hogy a folyamat végén előálljon egy eredmény, amely optimális megoldást nyújt egy adott műszaki problémára úgy, hogy az eleget tesz a társadalom jelenlegi elvárásainak a műszaki tudományok fejlettségi szintjének határain belül. A szempontrendszer egy megoldásmezőt képez, amely korlátozza a lehetséges megoldások számát és azok eredményességét. Ebben a megoldástérben a mérnöki tudományok folyamatosan fejlődőnek tekinthetők, azonban ez a monotonitás a társadalmi igényekre nem jellemző, ezért a tervezési tevékenység a változó igények miatt folyamatosnak tekinthető.

3.1. Klasszikus tervezésmódszertani eljárások

Egy sikeres műszaki tervezés vagy fejlesztési feladat elvégzéséhez a tervezőmérnöknek ismernie kell a megoldáshoz vezető gondolatmenetet vagy azt az utat, amely megoldásokat szolgáltat az adott feladatra.

A tervezésmódszertan tudományában különbség tehető az új termék létrehozása és egy termék továbbfejlesztése között. Fogalom szintjén úgy definiálható a két tevékenység, hogy új termék fejlesztésekor főként olyan új ötletekre van szükség, amelyek később egy adott termék alapját képezhetik. A termékötletek mögött leggyakrabban kialakuló szükségletek vagy egy probléma felismerése áll, amely a későbbiekben majd termékfejlesztéshez vezethet. Egy termék továbbfejlesztéskor leginkább javító ötletekre kell fókuszálni, amelyeket kiegészítenek plusz funkciók és kidolgozott termék variánsok is. Az ötleteket külső és belső tényezők befolyásolhatják, amelyek mögött leggyakrabban a fogyasztók igényei és a konkurens termékek állnak. Némethné Erdődi úgy fogalmaz, hogy *„a termékfejlesztés korábbi tapasztalatokon alapuló, új szükségletek kielégítésére irányuló terméket eredményező kreatív tevékenység”*, amelyhez szakmaorientált tudásra van szükség, függetlenül attól, hogy mérnöki, vagy esztétikai kérdésekről van szó [87]. Verryzer véleménye alapján, a termékfejlesztés célja egy új, vagy meglévő termék újragondolása azzal a céllal, hogy az aktuális piaci és vásárlói igényeknek minél jobban megfeleljen és a termék kedvezőbb tulajdonságokkal rendelkezzen [88]. A tervezési és fejlesztési folyamatban a kívánt eredmények és célkitűzések elérése érdekében az ötlettől a késztermék kereskedelmi forgalomba hozataláig számos folyamat szakaszon kell végigvezetni a terméket annak érdekében, hogy a műszaki és gazdasági szempontok alapján megfelelő lehessen [89].

Ebből fakadóan, a vásárlói igényeknek való megfelelés elengedhetetlen alapja az, hogy a tervező vagy a teljes tervezőcsapat naprakész ismeretekkel rendelkezzen mind technológiai, mind dizájn trendek szempontjából.

Új műszaki termékek fejlesztése esetén négy folyamatfázis definiálható, amelyek:

- koncepció fázis: termékjellemzők meghatározása és a termék koncepció pontosítása;
- fejlesztési fázis: konstrukciós szakasz és gyártás előkészítés;
- gyártási fázis: a termelés beindítása és termelés;
- eladási és használati fázis: termékek értékesítése a megfelelő piacokon [90].

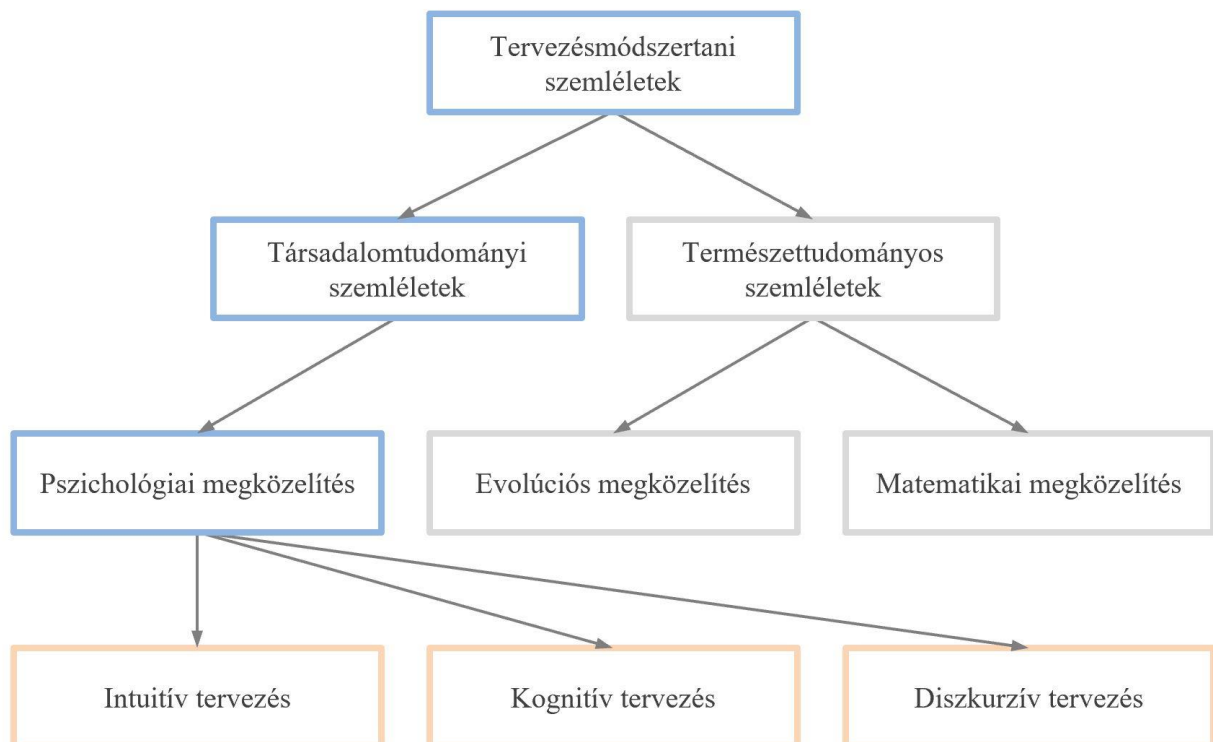
A koncepcionális fázis a tervezés azon része, amely során a gyártási folyamat lehető legtöbb paraméterét és minél több, elsősorban emberi hibákból, anyagfáradásokból, terhelési mutatókból adódó, lehetséges problémát megvizsgálunk. A koncepcionális tervezés szakaszában nagy szükség van az emberi kreativitásra, amely elősegíti a lehetséges megoldások halmazának előállítását és elemzését. Ebben a szakaszban a műszaki termékek csupán funkcionális részegységeik által, úgynevezett funkcióstruktúrákban kifejezett alakban alkotnak megoldásokat, amelyek előállítása széleskörű szakmai tapasztalatot és absztrakt gondolkodást igényel a tervezőtől.

A konstrukciós tervezési szakasz a fejlesztési fázis eleme, ahol már konkrétabb és átfogó műszaki ismeretek szükségesek ahhoz, hogy egy sikeres koncepció a konstrukciós szakaszban egy működő és végleges megoldássá alakulhasson át. A fejlesztési fázisból származik a termék teljes életciklusára vetített költségek közel 80 %-a. Cooper szerint új termék fejlesztése esetében a teljes kiadások egyharmada és a teljes folyamatra fordított időmennyiség minimum 40%-a, a fejlesztési szakaszban kerül felhasználásra [91]. A fejlesztési fázisban indokolt a termékélettartamra irányuló vizsgálatok elvégzése, mivel későbbi fázisban már nem kifizetődő az előzetesen elhárítható hibák kijavítása. Ayağ megfogalmazása alapján, a termékfejlesztés egy átfogó folyamatnak tekinthető, amely során az egyes fázisokban el kell végezni az adott tervek felülvizsgálatát és csak a jóváhagyást követően szabad a következő szintre lépni [92]. A műszaki termékfejlesztés szakaszai Roóz és Heidrich szerint:

- termékötletek felkutatása,
- az ötletek szelektálása műszaki, gazdasági szempontok és a célkitűzések alapján,
- prototípusgyártás a hozzá tartozó márkanévvel és csomagolással,
- tesztelés és a felhasználói vélemények összegyűjtése a lehetséges változtatások érdekében,
- kereskedelmi forgalomba vezetés a tervezett reklám és kampánystratégia alapján,
- értékelés műszaki és gazdasági szempontból [93].

A fejlesztési folyamat szakaszaiban előre nem ismert problémák felismerésére és kezelésére kell felkészülni. Horák szerint, a termékfejlesztési folyamatban fellépő, de előre nem látható problémák három fő csoportra oszthatók, amelyek a szervezési problémák, a fejlesztési és konstrukciós problémák, valamint a termék műszaki és gazdasági problémái [94]. Egy műszaki feladatnak számos megoldása lehet, de azok megfelelőség alapján eltérőek lehetnek. A tervezésmódszertan feladata, hogy leírjon egy ideális utat vagy folyamatot, amely jól követhető és a műszaki probléma megszületésétől annak megoldásáig tart.

Az elmúlt évszázadban különféle szemléletek és tervezési technikák jöttek létre, amelyek jó eséllyel segítséget nyújtanak a teljes tervezési szakaszban.



1. ábra. Tervezési szemléletek

Az 1. ábra fadiagram ábrázolásban mutatja be a jellemző módszertani és tervezési szemléleteket. Alapvetően két főcsoport különböztethető meg: a társadalomtudományi és a természettudományos szemléletek. A társadalomtudományi ágon tulajdonképpen pszichológiai megközelítésről beszélünk, amely három eltérő: intuitív, kognitív és diszkurzív szemléletre bontható. A természettudományos szemléleteket az evolúciós és a matematikai megközelítés alkotja. A következőkben, az egyes alfejezetek kifejtik az 1. ábrán látható szemléleteket és megközelítéseket.

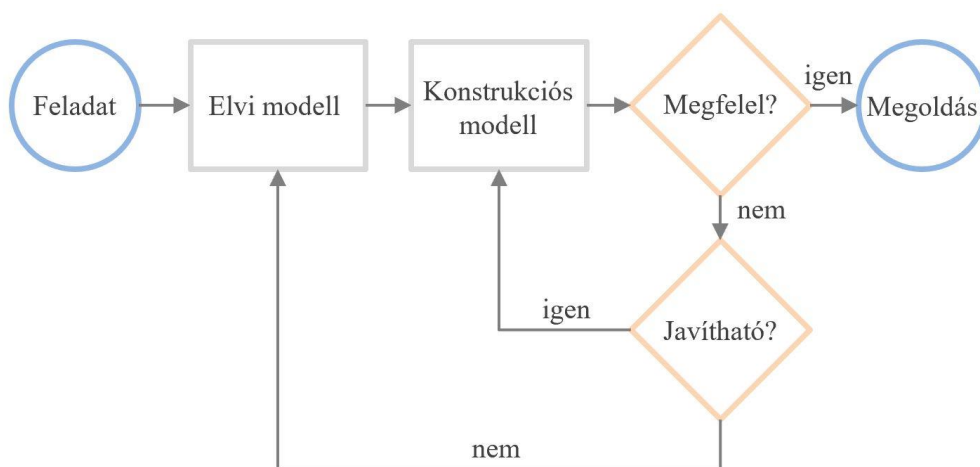
3.1.1. Intuitív tervezési modell

Az intuíción alapuló tervezési szemlélet tekinthető az egyik legkorábbi tervezési modellnek, amelyet szokás angolszász tervezési szemléletnek is nevezni. Az intuíció egy sajátos emberi gondolkodásként jellemezhető, amely során az emberi elmélkedés, a logikai lépések átugrásával ismeri fel az igazságot és találja meg a megfelelő megoldást. Az intuíciót a vegetatív idegrendszer működteti, amely emberi szándékkal nem előidézhető, ebből fakadóan a megfelelő intuíció időszükséglete bizonytalan nagyságú lehet. A tématerületnek több kutatója is ismert, akik megfogalmazták ezt a fajta szemléletet. Selye szerint „Az intuíció az a tudattalan intelligencia, amelynek révén elmélkedés vagy következtetés nélkül jutunk ismerethez. Az intuíció az eredetiség, a találékonyság, a leleményesség minden változatának gyújtószikrája. Az a villanás, amely a tudatos gondolkodás és a képzelőerő között érintkezést teremt” [95].

Hansen úgy fogalmaz, hogy minden új ötlet előzetes tapasztalatokból és megfigyelésekből, majd ezek kombinációjából tevődik össze. Ennek megfelelően a valóságban soha nem

beszélhetünk véletlenről, vagyis hibátlan ötletéről. Hansen úgy vallja, hogy az intuitív folyamat lelassításával feltárulnak azok az elemek, melyekből a megoldás felépült és létrejöhetnek azok a megoldások is, melyek esetleg elvetődtek volna. Ennek értelmében az intuitív gondolkodás tapasztalatszerzéssel pozitív irányba befolyásolható. Hansen definiálja a mesterséges intuíción fogalmát, amely segíthet a kevesebb tapasztalattal rendelkező mérnöknek megoldást találni a problémára. Kijelenthető, hogy az intuitív problémamegoldás túlnyomórészt az egyéni tapasztalatokból fakadó ötleteken alapul. Nincs szerepe annak, hogy az intuíción alapján megszülető megoldások milyen egzakt lépéseken keresztül jöttek létre. Hansen kijelentése arra összpontosít, hogy az intuitív tervezés jó eséllyel pótolható és rekonstruálható, csupán megfelelő módszer segítségével lépésről lépésre támogatni kell a tervezőt a logikus gondolkodásban [6].

Pólya tanulmányában úgy fogalmaz, hogy ritkán, de előfordulhat, hogy a megfelelő megoldás keresése közben egy komplex ötlet merül fel, amely már a feladat megértésének fázisában potenciális megoldást nyújthat. Véleménye szerint, ha a korai fázisban elmarad a megoldás szikrája, akkor célszerű betartani az általa megfogalmazott lépéseket, amelyek: a feladat megértése, a részfeladatok egymáshoz kapcsolódásának vizsgálata, a terv végrehajtása és a megoldás elemzése. Szerinte a legrosszabb eshetőség az, amikor az intuitív ötlet megléte nélkül a tervező mégis elhagyja a négy szakasz valamelyikét, és a pontos követelmények megértése nélkül kezdi el kidolgozni a megoldását [96]. Tehát az intuíción egy spontán és akaratlan cselekvés eredménye.



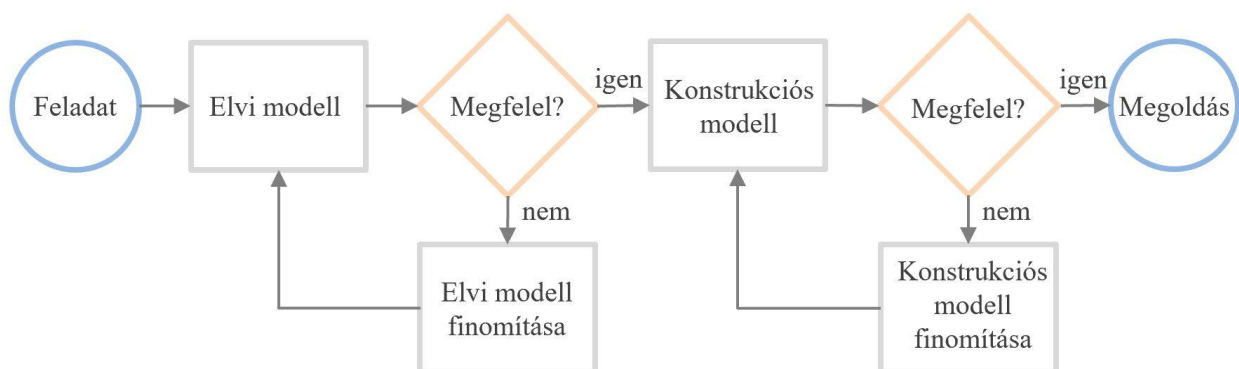
2. ábra. Az intuitív tervezési modell folyamatábrája

Az intuíción alapuló tervezési rendszert a 2. ábra mutatja be. Ez a modell olyan belső visszacsatolásokat tartalmaz, melyek miatt a tervezőnek bizonytalan nagyságú utat kell megtennie a feladat megértésétől annak megoldásáig, így ezzel együtt a folyamat bizonytalan nagyságú ideig tart. Az intuitív szemléletű tervezési iskola egy jó konstrukcióra törekszik úgy, hogy egy modellt hoz létre a probléma orvoslására, de próbálja minél pontosabban kifejleszteni azt. Ezek alapján az angolszász tervezőiskola jellegzetessége az, hogy a feladatot a legjobb közelítéssel oldja meg úgy, hogy kevés szálon vezeti a tervezést, de összetett modellt állít fel és ha kell, folyamatosan pontosítja azt. Fő szerepben van az elméleti beállítottság és az intuíción, amely különféle

technikákkal segíthető, mint például a „brainstorming”, magyar elnevezése alapján ötletroham, a Delphi módszer és a „635-ös módszer”. A folyamat végén a terv minőségét és a várható tervezési időt nagy mértékben befolyásolják a konstruktőr mérnök személyes tulajdonságai, adottságai, szakmai rátermettsége, kreativitása és alapvető tehetsége. Ez alapján összefoglalható, hogy a tervezési idő mennyisége fordítottan arányos a tervező szakmai tudásával és tehetségével, majd a terv várható minősége arányos a tervező egyéni képességeivel [97].

3.1.2. Kognitív tervezési modell

A kognitív tervezési folyamat struktúrája részben az intuitív tervezőrendszerek folyamatához hasonlítható, azonban a lényeges különbség az, hogy a kognitív tervezési szemléletben részben nyílt, előre haladó rendszerről beszélünk, amelyben a feladat megoldásainak egyes szintjein lokális ciklusok foglalnak helyet. Az alapötlet alapján egy-egy modellt állít fel a feladatmegoldás különféle szintjein. Az intuíciónak jelentős szerepe van, hiszen folyamatosan új ötletekre van szükség. Azonban megjelennek az előíró szemlélet fontos jellemzői is, vagyis maga a tervezés egzakt lépéseket követve halad előre. A kognitív folyamat legfőbb jellemzője, hogy megpróbálja leírni és szimulálni a tervezőmérnök gondolkodási tevékenységét. A folyamat során kapott eredmények minősége itt sem határozható meg előre, de a várható tervezési idő becsülhetőbb, hiszen a folyamat nyitott és nagyrészt előrehaladás jellemzi. A kognitív szemlélet vagy más elnevezéssel megismerő jellegű tervezési iskola egy jó konstrukcióra törekszik azzal, hogy a feladat különféle megoldási szintjein modelleket állít fel és ezeket sorozatos iterációval pontosítja. A kognitív tervezőiskola képviselője azt vallja, hogy a feladatot a tervezési fázisában, szintenként a legjobb közelítésekkel oldotta meg. A módszert az jellemzi, hogy kevés szálon vezeti a tervezést, de több modellt állít fel és ha szükséges, akkor folyamatosan pontosítja azt. Előnyben részesíti az intuíción alapuló gondolkodásmódot, amelyhez erős elméleti beállítottság párosul. Eszköztárában használatosak az intuíciót elősegítő technikák és különféle módszerek.



3. ábra. A kognitív tervezési modell folyamatábrája

A 3. ábra a kognitív tervezési modell folyamatábráját mutatja. A tervezés különféle szintjein belső ciklusok vannak. Az elvi tervezés és a konstrukciós tervezés problémája szétválik. Nem feltétlenül fontos, hogy a két szinten azonos tervező oldja meg a feladatot. A tervezési folyamat általában gyorsabb, mint az intuitív tervezési modell esetén.

3.1.3. *Diszkurzív tervezési modell*

A huszadik század első felében az volt az ipar egységes véleménye, hogy a tervezői, konstrukciós munkára nem mindenki hivatott és csak azokból válhatnak tehetséges tervezőmérnökök, aki erre a szakmára születtek. Ezt a nézőpontot az egyes német mérnökiskolák nem kívánták elfogadni, ezért elkezdtek azon szabályszerűségek kutatását, amelyek meghatározó szerepet játszottak a tervezőmérnöki feladatokban. Ezen tanulmányok fő célja az volt, hogy a tervezési folyamatot különféle szintekre és funkcionális egységekre bontsák és a korábbi feltárt tapasztalatokat és működő megoldásokat rendszerbe foglalják.

Az újszerű módszerfejlesztés Hansen nevéhez fűződik, hiszen az összefoglaló tanulmányában a tervezési folyamatot rendszerként vizsgálta, melyek logikailag összekapcsolt alapszisztemekből épülnek fel. A teljes alapszisztem az egyes részfeladatok megoldásából tevődik össze, amelyek: feladat, alapelvek, megoldáselemek, megoldás változatok, javított megoldások és végezetül az optimális megoldás. A Hansen féle alapszisztem felépítésének első pontja az alapelv kidolgozása, amely a feladat absztrahálása révén történik. Ezt követi a megoldáselemek feltárására és megfogalmazására. A harmadik lépésben a megoldáselemek egymással való kombinálása segítségével előállíthatók az egyes megoldásváltozatok. Ezt követően kezdetét veszi a szelektálás folyamata a megoldásváltozatok halmazából. A javított megoldásoknak konkrét kritériumoknak kell megfelelniük, hogy végleges megoldás születhessen. Az egyes részfeladatok a teljes tervezés során többször is megismétlődhetnek [6].

Rodenacker tervezési rendszerében a kezdetleges elvi modell a konkretizálás folyamatán halad előre. Véleménye szerint egy műszaki rendszerben csupán az anyag, energia és jel állapotai lehetnek változó paraméterek [7].

Koller munkássága során Rodenacker elméletét vizsgálta tovább, amelyben a tervezési folyamat algoritmizálhatóvá tételét tűzte ki célul. Módszertanának alapja, a tervezési folyamat számos munkalépésre való bontása. Koller úgy vallja, hogy minden munkalépés során vannak bemenő és kimenő adatok, amely lehet: anyag, energia vagy információ. A jelenséget, amely a teljes tervezési folyamat egy-egy lépcsőfokán lejátsszódik, a tizenkét fizikai alapszisztemet egyikével le lehet írni. A végbemenő folyamatokat véges számú fizikai funkcióra vezeti vissza és szabályokat állít fel az anyagi megvalósításhoz. A teljes megoldás ezeknek az alapszisztemeknek a láncolatával határozható meg, vagyis a tervezési feladat megoldásának funkciói ezek összességével jellemezhetők. Ennek következtében előállhat egy olyan funkcióstruktúra, amely logikailag és fizikailag összekapcsolt alapszisztemekből áll [98], [99].

Roth tervezői módszere a tervezői katalógusokra alapozza a megoldáskeresést. Ezek a különféle tervezési katalógusok és megoldásgyűjtemények egy-egy műszaki probléma ismert megoldásait, valamint azok kiegészítő információit tartalmazzák rendszerezett formában. Ezek a táblázatos információtárolók és tervezői katalógusok észszerűsítik és felgyorsítják a tervezési folyamatot. Mivel a tervezői katalógusok a tervezési problémák ismert és bizonyított megoldásainak gyűjteményei, ezért a katalógusokon alapuló módszeres tervezés alapgondolata az, hogy a konstruktőr a megoldás keresése során ne csak saját ötletét vegye figyelembe, hanem használja fel a mások által dokumentált tudást is. Roth módszerének alapja a feladat pontos

megfogalmazása, amelybe beletartozik a funkciójegyzék és a követelményjegyzék összeállítása. A funkciójegyzék magába foglalja a fizikai hatások és hatáselvek által megfogalmazott funkciókat. Roth szerint bármely adott feladatot már létező és jól működő megoldással kell helyettesíteni. Roth általános funkcióstruktúrát épít, amely egy-egy adott szerkezet elvi működését írja le. Az elvi működéshez katalógus segítségével fizikai elveket és hatásokat rendel, így előáll a fizikai funkcióstruktúra. Ezt követően a funkcióstruktúrából katalógusok segítségével geometriai funkcióstruktúrákat hoz létre.

Altshuller nevéhez kötődik a TRIZ elmélet, amely a (Teorija Reschenija Izobretatel'skij Zadach) elnevezésből származik, melynek magyar jelentése a Feltalálói Problémamegoldás Módszere. A TRIZ elmélet szerint a fejlesztés öt különböző kategóriába sorolható, amelyek:

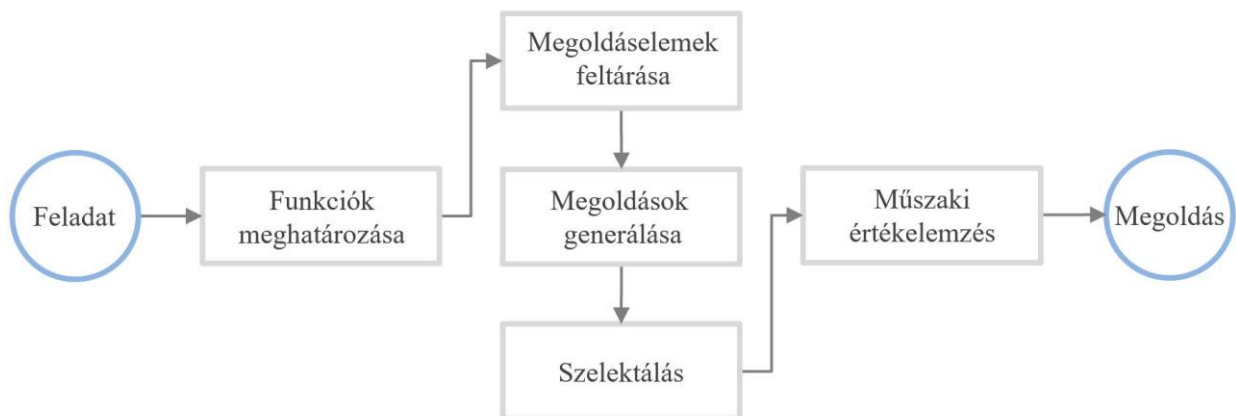
- létező rutin megoldások,
- létező rendszer kisebb fejlesztése,
- létező rendszer alapvető fejlesztése, ismert megoldásokkal,
- új elvekkel kiegészített találmány fejlesztése,
- új rendszerek kialakítása tudományos felfedezések segítségével.

A TRIZ speciális eszközrendszer segítségével keresi a legjobb megoldást. A módszer alapja, az adott feladat ellentmondásokra történő építése, melyek lehetnek: technikai és fizikai ellentmondások. A folyamatban egy szeparációs eljárás, az úgynevezett ellentmondási mátrix alkalmazása szükséges, melynek sorai az adott feladatra jellemző javuló tulajdonságokat tartalmazzák, oszlopai pedig az ezzel párhuzamosan gyengülő jellemzőket. Az ellentmondási mátrix tehát olyan adatbázis, amely azokat az ismert megoldásokat foglalja magába, melyek képesek az ellentmondások kiküszöbölésére [12].

Deciu, Ostorosi és Ferney tettek javaslatot a konfiguratív termékek tervezésének gépészeti alkalmazására, felhasználva a fuzzy logikát. A fuzzy logika a hagyományos, kétértékű logika többértékűre való kiterjesztését jelenti, ahol a következtetési eljárások eltérnek a hagyományos módozatoktól. A fuzzy rendszerek olyan leképezések, melyek m dimenziós fuzzy halmazokat képeznek le n dimenziós fuzzy halmazokra. A konfigurálható tervezés egyik alapgondolata a felhasználói igények szem előtt tartása. Kihhasználva a konfigurálható tervezés eszközeit, definiálja a fuzzy logikának azt a lehetőségét, hogy a döntési helyzetek esetén többértékű megoldás is megszülethet. A tervezés első lépésében szükség van bizonyos döntések meghozatalára, azonban ez biztosítja, hogy a tervezőmérnöknek a további lépések során ne kelljen egyes megoldásokat elvetnie. A bizonytalanság a tervezési folyamat velejárója, azonban ez nem logikai hibát, hanem a fuzzy tervezői leírását jelentheti. A fuzzy halmazokkal történő megközelítés alkalmas a bizonytalan információk kezelésére. A módszer alkotói javaslatot tettek egy többszörös fuzzy modellel való megközelítésre. A fuzzy modellek a tervezési folyamat kiegészítői, melyek szem előtt tartják a felhasználói követelményeket. A többszörös fuzzy modellel irányított konfigurálható módszer leginkább akkor használatos, ha minél több termékváltozat létrehozása a cél [100].

Pahl és Beitz közös munkája tekinthető a módszeres tervezési eljárások tekintetében talán a legjelentősebb tanulmánynak, hiszen az egyik legjobb összefoglalást nyújtja a diszkurzív tervezési technikák tudományában [8]. Munkájuk magyar fordításban is megjelent, amely nagy hatást gyakorolt a magyar tervezőiskolákra is.

A módszeres tervezés jellemzője, hogy a tervezés egy sémán keresztül zajlik le, amely során a részfeladatok megoldására nagyszámú változatok kerülnek kidolgozásra. Adott a lehetősége az úgynevezett funkció-összevonási és funkció-szétválasztási műveleteknek, majd a megoldáselemekből felépülnek az egyes megoldások. A teljes folyamat egy tervszerűen kivitelezett mérnöki tevékenység, amely egy megfelelően kidolgozott módszer betartásával történik. A módszeres géptervezés alapelve, hogy a megoldás keresésére figyelembe veszi mások dokumentált tudását is.



4. ábra. A diszkurzív tervezési folyamat

A 4. ábra a diszkurzív tervezési folyamatot mutatja be, amely elkülönülő részfeladatokra osztható. Az intuitív és kognitív tervezési modellek folyamatábráihoz képest az elsődlegesen szembetűnő különbség, hogy a módszeres tervezés nem tartalmaz negatív visszacsatolásokat a rendszerben, tehát egy monoton előre haladó folyamatként definiálható, amely pozitív vonzata, hogy tervezői munka időszükséglete becsülhetőbb.

A folyamat során a funkciók, megoldáselemek feltárása és a megoldások generálása fázisaiban a lehetséges megoldások száma növekszik, majd a második szakaszban elkezdődik a módszeres szelektálás és értékelés folyamata. Ezek alapján, a folyamatábra egyes vízszintes metszékeinek nagysága arányt mutat a metszett szakaszon lévő megoldáshalmaz elemszámával. A kombináción alapuló úgynevezett mesterséges megoldások száma a feltárt és felhasznált funkciók számától, továbbá a funkciókhoz rendelt megoldáselemek számától függ.

A nagy számú megoldásokat szűkíteni kell, amelyben a műszaki értékelemzési eszközök segítenek, hiszen szakszerű kiválasztást csak ezek a technikák biztosíthatnak. Túl sok megoldáselem esetén előállhat a Tajnafői által definiált „kombinatorikus robbanás” jelensége. Ez azt jelenti, hogy a megoldásváltozatok száma meghaladja az emberi agy számára még áttekinthető mennyiséget. A kombinatorikus robbanás kezelésének határai számítógépes támogatással oldhatók fel [28], [29]. Ezek a lépések magukkal vonták annak a tényét, hogy az emberi intuitív

képességek a háttérbe szorultak, hiszen a korábban kidolgozott működő megoldások halmazában keresték a megoldásokat. Ezek azok a sajátos munkafolyamatok, amelyek alapján a diszkurzív tervezési szemléletet módszeres vagy előíró tervezési szemléletnek is szokás nevezni. Az ilyen típusú tervezési iskola a legjobb konstrukcióra törekszik azáltal, hogy igyekszik kiválasztani a nagy számú lehetséges megoldás közül a legjobbat, ezáltal kijelentheti, hogy a feladat megoldásához az általa ismert, illetve feltárt megoldások közül a legjobbat választotta ki. A diszkurzív módszer még az intuitív ötlet hiánya mellett is segíti a konstruktort az optimális megoldás megtalálásában azáltal, hogy előírja, milyen lépéseket kell elvégezni az adott tervezési probléma megoldásához. Ez azonban nem feltétlenül jelenti az intuíciónak teljes háttérbe szorítását.

A diszkurzív tervezési folyamat kis mértékben függ az intuíciónak, emiatt a terv várható minősége túlnyomó részt nem függ a tervező intuitív képességeitől, csak a tervezés megoldáselemeinek számától. A tervezési idő jól kalkulálható, hiszen a folyamat monoton előre haladó lépésekből tevődik össze. A tervezési időszükséglet fordítottan arányos, a megoldás minősége pedig arányos a tervező szakmai képességével. A rendszerben az egyéni kreativitás és tehetség konstansnak tekinthető.

3.1.4. Evolúciós tervezési szemlélet

A genetikai algoritmus a természetes szelekció elvein alapuló optimalizálási eljárás, amely a keresési technikát használja ki [101], [102]. Az optimalizálás folyamatában van egy bemeneti és egy kimeneti érték, majd egy optimalizálási probléma során keressük azt a bemeneti értéket, amely a „legjobb” kimeneti értéket szolgáltatja. Ez matematikai értelemben egy vagy több célfüggvény maximalizálását vagy minimalizálását jelenti, amelyben a lehetséges megoldások halmazát keresési térnek nevezzük. Ennek megfelelően az optimalizálás célja egy adott pont vagy pont-halmaz megtalálása a keresési térben [103].

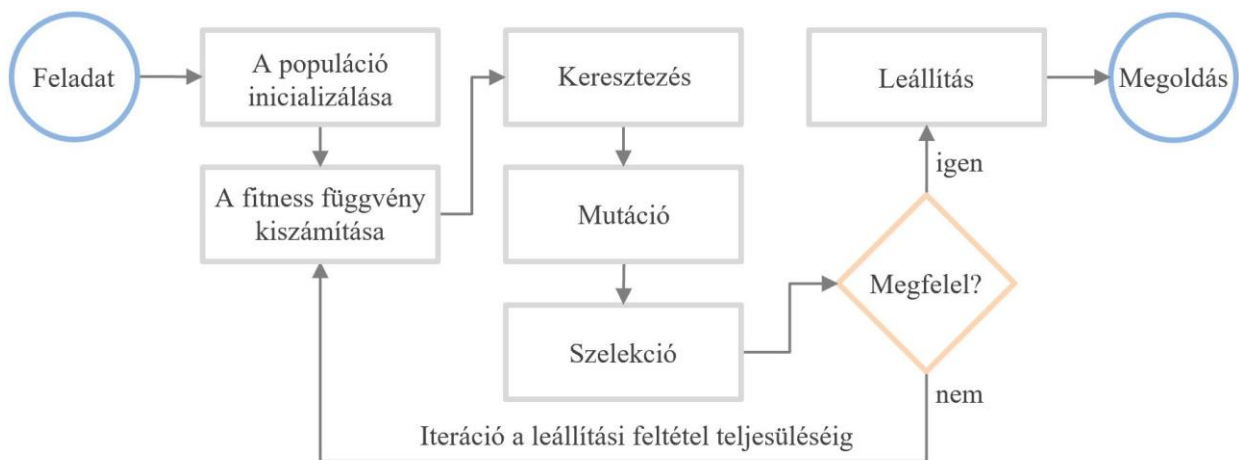
A genetikai algoritmusok keresési funkción alapulnak, amelyek felhasználják a genetika és a természetes szelekció alapelveit és metódusait. A genetikai algoritmusok Holland nevéhez köthetők, de Goldberg is nagy sikereket ért el a kutatásaival ebben a témában [104] - [106]. A genetikai algoritmusokban az adott probléma lehetséges megoldásainak sokasága helyezkedik el, majd ezek rekombináción és mutáción mennek keresztül, mint a természetes genetikában. Ezen folyamat segítségével új egyedek jönnek létre és a folyamat több generáción keresztül megismétlődik. Minden egyed vagy megoldás rendelkezik egy úgynevezett fitness értékkel, amely a célfüggvény értéke alapján kerül meghatározásra. A rátermettebb egyedek nagyobb esélyt kapnak arra, hogy párosodjanak, és több, továbbá nagyobb fitness értékkel rendelkező egyedeket hozzanak létre. Ez egyezést mutat Darwin evolúciós elméletével [107]. Így generációkon keresztül, folyamatosan fejlődnek ki egyre jobb és jobb megoldások, amíg el nem érik a megállítási kritériumot.

A genetikai algoritmusok számos pozitív tulajdonsággal rendelkeznek, amelyek rendkívül népszerűvé tették őket. Ezek közül a legfontosabb az, hogy sok esetben gyorsabbak és hatékonyabbak a hagyományos módszerekhez képest. Folyamatos és diszkrét funkciókat, valamint többcélú problémákat egyaránt képes kezelni. A „jó” megoldások listáját tartalmazza, nem csak

egyetlen megoldást nyújt számunkra. Mindig választ kap a problémára, ami idővel csak javulhat. Hasznos, ha a keresési terület nagyon nagy, és sok paraméterről van szó.

A számos előny mellett említést kell tenni a hátrányokról vagy bizonyos értelemben korlátokról is. A genetikai algoritmusok nem alkalmasak minden típusú probléma megoldására, különösen azokra nem, amelyek egyszerűek és származtatott információk állnak rendelkezésre. Az alkalmassági érték kiszámítása ismételten történik, ami bizonyos problémák esetén számítási szempontok alapján költséges lehet. Sztochasztikus folyamatot feltételezve nincs garancia arra, hogy a megoldás optimális és a legjobb minőségű. Ha nincs megfelelően implementálva, előfordulhat, hogy az algoritmus nem konvergál az optimális megoldáshoz.

A számítástechnikában számos probléma esetén fordulhat elő, hogy még a legerősebb számítástechnikai rendszereknek is nagyon hosszú időbe telik megoldani egy problémát. Ebben az esetben a genetikai algoritmusok hatékony eszköznek bizonyulnak arra, hogy rövid időn belül használható, közel optimális megoldásokat kínáljanak. A hagyományos gradiens alapú módszerek úgy működnek, hogy egy véletlenszerű pontból indul ki és a gradiens irányába halad egészen addig, amíg el nem éri a maximális vagy minimális értéket. Ez a technika hatékony és nagyon jól működik az egy maximumponttal rendelkező célfüggvényeknél, azonban a legtöbb valós helyzetben ez nem áll fent. Többnyire olyan célfüggvényekkel kell számolni, amelyek több csúccsal rendelkeznek, ami miatt ezek a módszerek kudarcot vallanak. Ennek oka az, hogy a helyi optimumban való elakadástól szenvednek.



5. ábra. A genetikai algoritmusok működésének folyamata

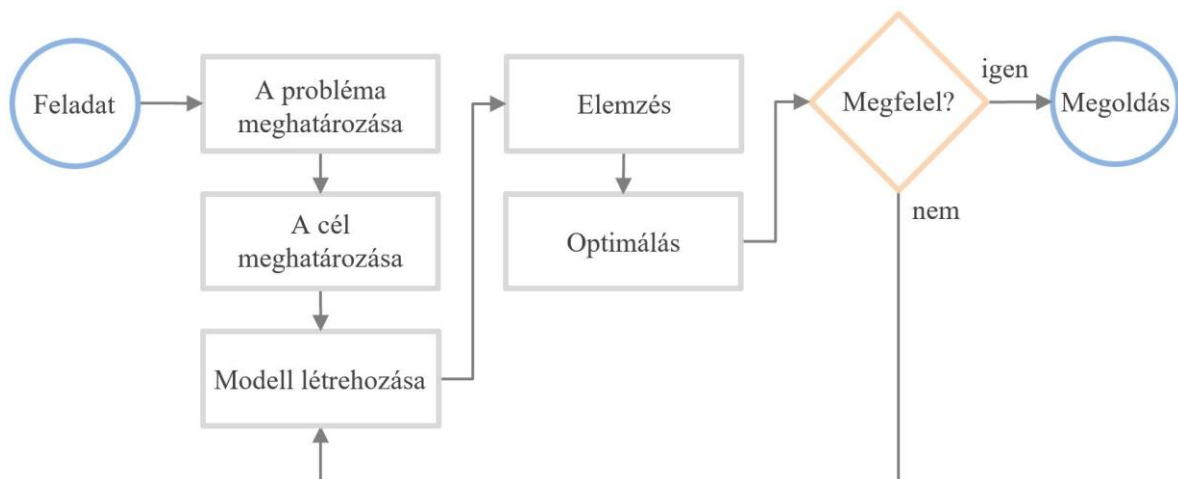
Az 5. ábrán látható a módszer folyamatábrája, amely egy kezdeti populációval kezdődik és véletlenszerűen generálható. A populációból kiválasztásra kerülnek az úgynevezett szülők a későbbi párosításhoz. Az alkalmazott keresztezési és mutációs operátoroknak köszönhetően új utódok generálódnak. Végezetül ezek az utódok helyettesítik a populációban meglévő egyedeket és a folyamat megismétlődik. Ily módon a genetikai algoritmusok bizonyos mértékig megpróbálják utánozni az emberi evolúciót [106].

3.1.5. Matematikai tervezési szemlélet

A műszaki tervezési folyamat matematikai szemlélete a különféle optimalizáló eljárások eszközeit részesíti előnyben, amelyek egzakt megoldásokkal szolgálhatnak pontosan megfogalmazott mérnöki problémákra. Egy koncepció vázlatából kialakuló késztermék előállításának folyamán számos tervezési szempont és kritérium érvényesítésére kerül sor. Ezek legtöbb esetben működési, gazdasági, gyártási, használati és biztonsági szempontokhoz köthetők.

A tervező a megadott szempontrendszer alapján olyan termék létrehozására törekszik, amely a leginkább eleget tesz az elvárásoknak. A cél a tervezési szempontok minőségi és mennyiségi együttesének keresése, amely a legtöbb előnyös feltételt teljesíti.

A valóságban egy tervezési folyamat általában nem egy lineáris irányultság mentén zajlik, hanem bizonyos elemeit meg kell ismételni. Ez a szakasz a tervezési folyamat optimalizációs része, amelynek logikai folyamatát a 6. ábra mutatja be. Fontos tényező, hogy a teljes folyamat egyes elemeinek a kidolgozottsága nagy hatással van a végeredményre, ezért az egyes lépések ellenőrzése elkerülhetetlen.



6. ábra. Az optimalizálás logikai folyamata

Az utóbbi időben az ipari tervezésben és fejlesztésekben jelentős növekedés figyelhető meg a 3D-s iCAD rendszerek és a numerikus szerkezetanalízis eszközök használatában. Ezt az indokolja, hogy ezekkel a numerikus szimulációs eszközökkel a tervezési folyamatok egyre nagyobb részben fedhetők le. A számítógéppel segített eljárások, mint például a numerikus szimulációk különböző típusai és a szerkezetoptimalizálás a tervezési folyamat korai fázisában alkalmazható, így lecsökkenthető a termék piacra kerülésének időszükséglete.

Ezek a korszerű szimulációs eszközök lehetőséget nyújtanak arra, hogy a fizikai tesztek és kísérletek egy része elhanyagolhatóvá váljon. Fontos jellemző, hogy a numerikus szimulációs eszközök és az optimalizálási eljárások jelentős szerepet töltenek be egy termék kifejlesztésében, azonban a teljes tervezési folyamat nem automatizálható. Egy klasszikus optimalizációs folyamat leginkább a teljes tervezendő objektum egy jól definiált részére vonatkozik, amely egy alprobléma megoldását jelenti optimalizálás útján.

Klasszikus szerkezetoptimalizációs feladatok megoldása megvalósulhat analitikus és numerikus eljárások segítségével, azonban az analitikus módszerek sok esetben nem alkalmasak a komplex mérnöki problémák elemzésére, ezért legtöbb esetben ellenőrzésre használatosak. Numerikus eljárások segítségével egy kiinduló modell iteratív úton történő változtatásával egy közel optimális megoldás érhető el. Kiinduló modell kerül felhasználásra egy szisztematikus keresési eljárás lefolytatásához, amely célja egy kedvezőbb szerkezeti modell megtalálása. A keresési eljárás addig tart, amíg az optimalizációs feltétel nem teljesül, amely során megfelelően közel kerülünk az optimális megoldáshoz [103].

3.2. A generatív tervezés és a klasszikus géptervezés kapcsolata

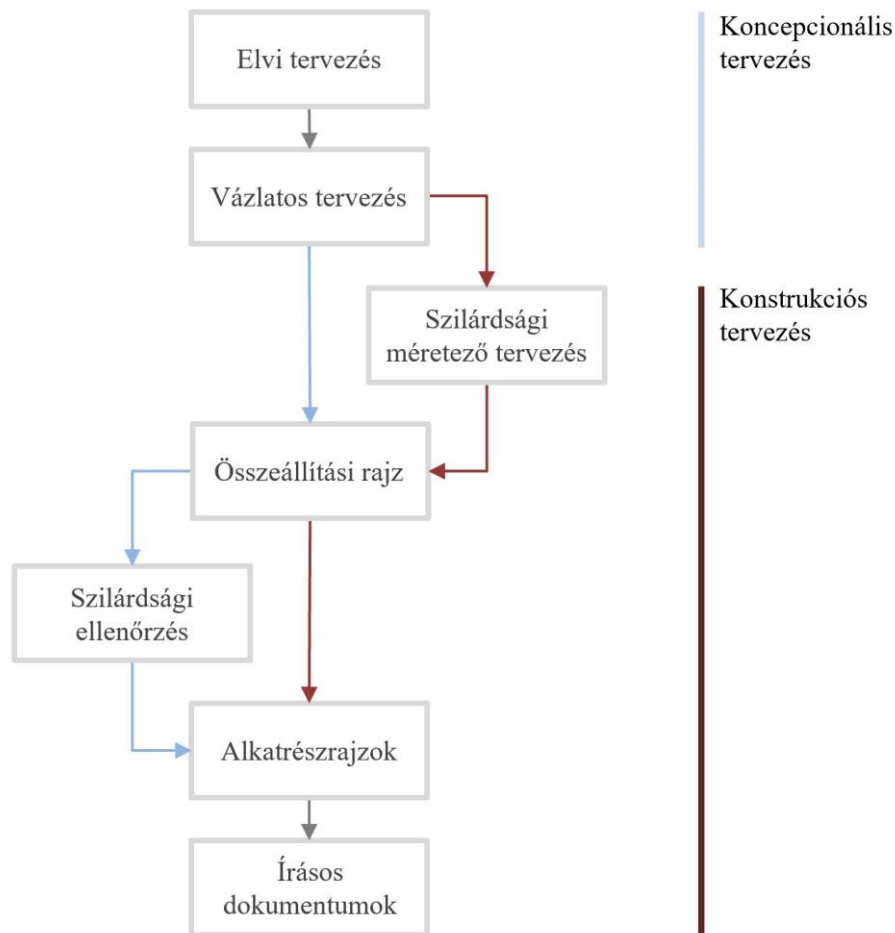
A hagyományos értelemben vett tervezési folyamatban a különböző fázisok egymást követik, ezért a folyamat hosszadalmas lehet, hiszen a termékspecifikációs hiányosságok módosításokat igényelnek, így a változtatásokkal és különféle javításokkal növekszenek a költségek és a fejlesztés időszükséglete [108]. A mérnöki tervezés egyik legfontosabb eszköze a számítógép lett, amely kibővíti a tervezési eszközrendszerek halmazát, ezáltal megreformálja a hagyományos tervezési folyamatokról alkotott képet. Az utóbbi évtizedekben többszörösére nőtt a rendelkezésre álló szoftveres technológiák száma, hiszen különféle szakterületek különböző célszoftvereket igényelnek. Ezen rendszerek felhasználásával, mint például a generatív tervezési modul, a tervezés egyszerűbbé és hatékonyabbá válhat. A különféle szakterületek eltérő tervezési módszereket igényelhetnek, amelyeket az eltérő alapelvek különböztetnek meg, hiszen a funkcióknak való megfelelésen túl számos szempontrendszernek kell megfelelni, ilyen például az anyagtakarékosság, a gazdaságosság, a gyárthatóság, a megbízhatóság és a működési pontosság.

Függetlenül attól, hogy a tervezési feladat egy új vagy már egy meglévő termék tervezéséről szól, a szakirodalom több típusú tervezésmódszertani eljárást javasol, mint például az értékelemzésen alapuló tervezés, a gyors prototípus gyártás, az integrált tervezés és az angol mozaikszó APQP (Advanced Product Quality Planning), magyar elnevezés alapján fejlett termékminőség-tervezés.

3.2.1. A soros tervezési folyamat

Azt a produktumot, amely eleget tesz a célkitűzéseknek és szempontrendszereknek, azt a műszaki gyakorlatban műszaki tervnek szokás nevezni. A műszaki terv egy dokumentált, kivitelezhető mérnöki elképzelés gondolatban történő megvalósítása. A megfelelő műszaki terv előállítására és dokumentálására különböző folyamatmodellek írhatók le, mint például a soros és párhuzamos tervezési folyamat, amelyek bemutatják a szükséges feladatelemek kapcsolatát az alkalmazott eszközrendszer függvényében [97]. Ezen folyamatokban helyezhető el az úgynevezett értékelemzésen alapuló tervezés, amely több módszertani kutató munkásságában is megtalálható. Az értékelemzésen alapuló tervezés megvizsgálja a termék minden funkcióját legtöbb esetben a költségek minimalizálása érdekében [109]. Míles szerint az értékelemzés alapja a funkciókban való gondolkodás és a költségtudatos tervezés. Ahhoz, hogy a használati és esztétikai funkciók objektív módon meghatározhatóak legyenek, az értékelemzésen alapuló tervezés kivitelezésekor

elengedhetetlen a terméktől való elvonatkoztatás [110], [111]. Némethné Erdődi szerint az értékelemzésre alapuló technika egy módszeres elemző eljárás, nagyon részletes döntés-előkészítési módszertannal [87]. Iványi szerint a módszer alkalmas a termék önköltségének a csökkentésére és minőségének javítására, ezáltal egy új termék optimális kialakítására és egy meglévő termék korszerűsítésére [112].



7. ábra. A soros tervezési folyamat

A 7. ábrán a soros tervezési folyamat látható, amely más néven a hagyományos, számítógépes tervezés előtti, vagy 2D-s számítógépes tervezési folyamatként is nevezhető. Ez a tervezési folyamat klasszikus géptervezési alkalmazásra az alábbiak szerint írható le. Az első fázisában a lehetséges működési elveket kell tisztázni. Az elvi terv lényegében egy kinematikai vázlat, amelynek méretei és térbeli elrendezése még nem ismert. A vázlatos tervezés során térbeli elrendezést kell készíteni a felhasznált elemekből, amely során alkalmazni kell az ismert csatlakozó méreteket. A szilárdsági méretező tervezés munkafázisban el kell végezni minden olyan számítást, mely a későbbi konstrukciós feladatokban geometriai adatokat fog szolgáltatni.

A méretező számításokat leggyakrabban manuálisan kell elvégezni, de léteznek különféle autonóm méretező programok, például fogaskerék, rugó és tengely méretezéséhez. A számítások útján előállt fő geometriai méretek ismeretében a tervezendő objektum 2D-s összeállítási rajza megszerkeszthető. Létezik olyan folyamatbejárás, hogy a méretező számítások elmaradnak. Ebben

az esetben lép érvénybe a szilárdsági ellenőrzés fázisa, ahol az összeállítási rajzban feltételezett geometriai méretekkel történik egy szilárdsági ellenőrzés. Ha a vázolt szerkezet az ellenőrzések alapján alulméretezett, akkor a változásokat vissza kell vezetni az összeállítási rajzra.

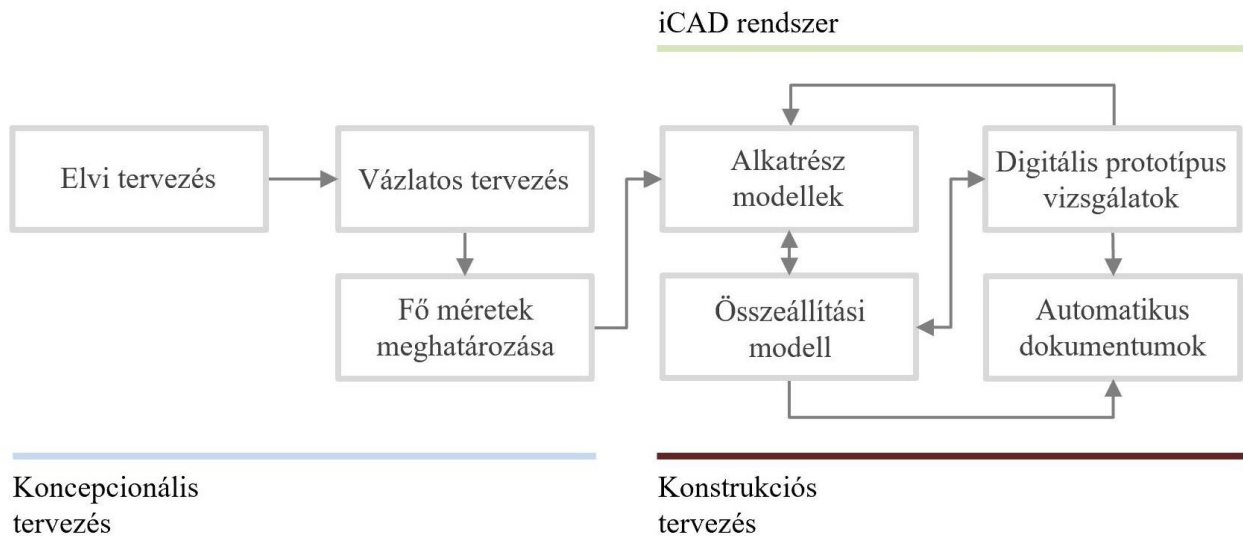
A soros tervezési folyamat alkalmazása esetén az alkatrészrajzokat csak az összeállítási rajz megléte után lehet elkészíteni. Az alkatrészrajzok elkészítése CADD (Computer Aided Drawing Design) programokkal támogatható, de a folyamat manuális jellegű. A műszaki terv rajzi dokumentumait sok esetben írásos dokumentumok egészítik ki, mint például: darabjegyzék, mérési, használati és karbantartási leírások, amelyeket hasonló módon manuálisan kell elkészíteni.

3.2.2. A párhuzamos tervezési folyamat

A párhuzamos tervezési folyamat fő tulajdonsága az iCAD (Integrated Computer Aided Design) rendszerek alkalmazása. Külföldi szakirodalmak magyar fordítás szerint szimuláció vezérelt tervezési folyamatnak nevezik. A folyamatba illeszkedik az úgynevezett konkurens termékfejlesztés, amelyben a tervezési, gyártástechnológiai és különféle marketingtevékenységek azonos időben történnek. A módszerben Kovács szerint az információáramlás folyamatos és a tervezés a termék teljes életciklusára kiterjed. Kovács a párhuzamos tervezés folyamatára a számítógéppel segített tervezés elnevezést használja és úgy vallja, hogy ezek a módszerek lehetővé tesznek egy központi modell köré épülő párhuzamos termékfejlesztést. A korszerű integrált terméktervező rendszerek lehetőséget adnak arra, hogy a termék tervezése és fejlesztése során, annak teljes életciklusára vonatkozó adatokat egyben kezelve jöhessen létre koncepció [113].

A párhuzamos tervezés térhódítása és a számítógépes terméktervezés fejlődése lehetőséget adott a szimultán tervezési eljárásoknak. A szimultán tervezés alkalmazása mellett a termékváltozatok számának növekedése és azok több és több funkcióval való ellátása, a tervezett termék élettartamának növekedését okozhatja. A módszer más nevén gyors prototípus gyártás, angol elnevezése alapján Rapid Prototyping (RP) egy olyan tervezési módszertan, amely az egymás után következő, de a prototípus megalkotását megelőző tervezési lépések egymásba illesztését alkalmazza, amelynek idő és költségcsökkentő hatása van.

A gyors prototípus gyártás kézzelfogható termékmintát ad, amely többszöri tesztelési eredmények alapján iterációs lépésekben fejleszthető. A folyamatos korrekciók és javítások lehetőségének hasonló módon időcsökkentő hatása van [114] - [116]. Némethné Erdődi szerint, az tekinthető integrált terméktervezésnek, angol elnevezés alapján Integrated Product Development (IPD), ha a piaci, műszaki, technológiai és szervezési folyamatok teljes egészében integrálódtak és a teljes tervezési folyamat kidolgozása az összes folyamatrész figyelembevételével valósul meg. Az IPD a különböző szakmai folyamatokat rendszerben értelmezi [87].



8. ábra. A párhuzamos tervezési folyamat

A 8. ábrán a párhuzamos tervezési folyamat látható. Takács szerint a folyamat két nagyobb egységre, a koncepcionális és a konstrukciós tervezésre bontható. A két egység között soros kapcsolat van, de a konstrukciós tervezés szakasz teljes egészében iCAD rendszerben zajlik, ezért a részfeladatok párhuzamosodnak.

A koncepcionális szakaszban előállnak a működési elvek és térbeli elrendezésbe kerülnek az egyes elemek. Ezt követően az iCAD rendszerben 3D modellépítés történik a fő méretek meghatározásával együtt. Sok esetben parametrikus modell épül fel, amelyet az integrált méretező modulok fel tudnak használni. Ebben az esetben a modell el van látva alakkal, mérettel és anyagminőséggel, amelynek számszerű értékei egy kitűzött tartományon belül szabadon változtathatók az egyes tervezési fázisokban.

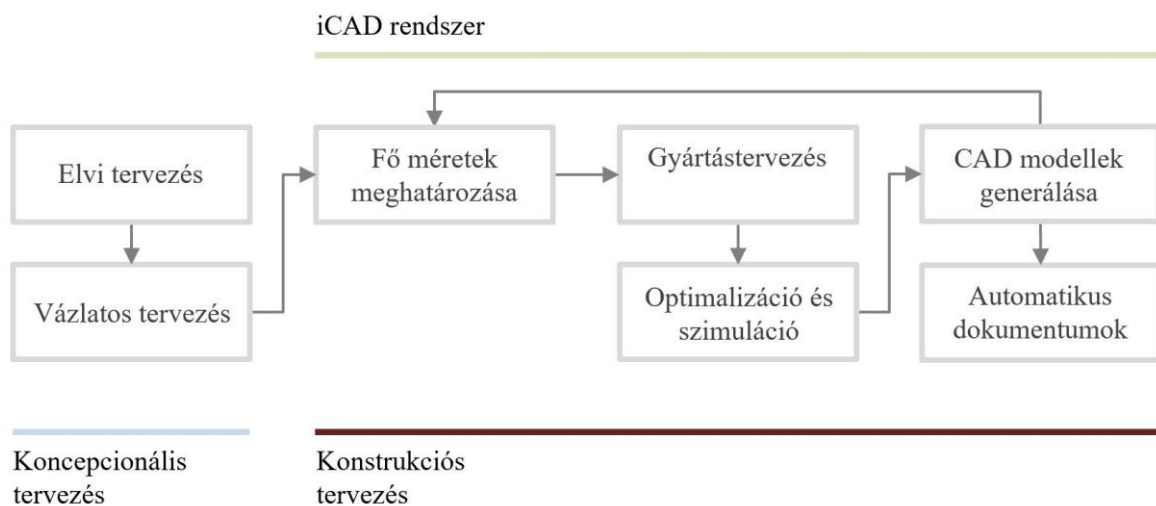
A konstrukciós tervezési szakasz a 3D-s CAD modellek létrehozásával kezdődik, amelyet nagy részben megkönnyít az adatok asszociativitása. A rendelkezésre álló alkatrészmodellekből megfelelő szerelési kényszerekkel lehet létrehozni a virtuális összeállítási CAD modellt, amely során felhasználhatók az egyéb iCAD rendszerrel kompatibilis alkatrészmodellek is, például: különféle kereskedelmi tételek és szabványos alkatrészek. A konstrukciós szakasz következő fázisa a digitális prototípus vizsgálat, amely lehetővé teszi a modellek és az összeállítás ellenőrzését, ilyen például a szerelhetőség vizsgálata, az ütközésvizsgálat és a különféle VEM analízisek. Ez a fázis módosításokat igényelhet a meglévő modellállományon, amely visszacsatolást eredményez a folyamatban. A modellek geometriai véglegesítését követően a 2D- s, úgynevezett gyártási dokumentumok az iCAD rendszerben automatikusan generálhatók, de a tervezői munka nem vonható ki teljes mértékben a munkafolyamatból.

A párhuzamos tervezési folyamat alkalmazása egy iCAD rendszerben azt eredményezi, hogy kevesebb prototípusra és mintadarabra van szükség. Ennek alapja, hogy a szoftveres környezetben lefolytatott szimulációkkal az alkatrészek számos tulajdonsága nagy biztonsággal tesztelhető és ellenőrizhető, ezáltal idő- és költséghatékonyabb lehet a fejlesztés [97].

3.2.3. A generatív tervezési folyamat

A generatív tervezés a gépészeti tervezési feladatokon kívül számos területen alkalmazható, azonban folyamata egyezést mutat az alkalmazott tématerülettől függetlenül. Az additív és hibrid gyártástechnológia elterjedésének köszönhetően az utóbbi években egyre szélesebb körben jelennek meg a generatív tervezési módszerek a gépészeti integrált tervezőrendszerekben.

A generatív tervezés egy újfajta tervezési folyamatnak tekinthető. Főbb jellemzői a mesterséges intelligencia alapú szoftver és gépi tanulás, amely segítségével az alkatrész alakját és összetételét fizikai alapú szimulációs és egyéb elemzési módszerekkel határozza meg, figyelembe véve az elvárt követelményeket és optimalizálva a tervezés eredményére vonatkozó célkitűzéseket, például a minimális költség és/vagy tömeg. Az újdonság erejével bíró generatív tervezési folyamat abban különbözik a hagyományos módszerektől, hogy a generatív algoritmus kiértékeli és megváltoztatja a termék modelljét a következő elemzési iterációhoz felhasználói beavatkozás nélkül, amely jóval több megoldásváltozatot eredményez az adott funkcionális elvárásokra. A hagyományosnak tekinthető soros és párhuzamos tervezési folyamatnál további felhasználó által vezérelt iterációkra lehet szükség, amíg az adott koncepció eljuthat a folyamatot lezáró gyártási szakaszhoz.



9. ábra. A generatív tervezési folyamat

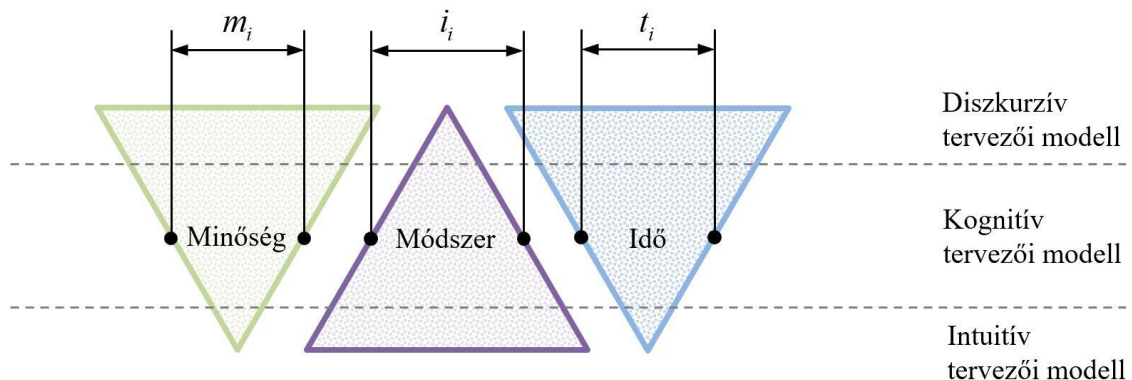
A 9. ábra a generatív tervezés folyamatát mutatja be. A módszer lényeges jellemzője, hogy már a tervezési folyamat korai szakaszában is alkalmazható anélkül, hogy meglévő koncepcionális terv állna rendelkezésre. Ennek köszönhetően a módszer teljesen új megoldásokat hoz létre úgy, hogy számításba veszi a gyárthatósági szempontokat is, ezáltal jelentősen csökkenti az alkatrész teszteléséhez kapcsolódó digitális prototípus vizsgálatának időszükségletét. Az ellenőrző szimulációk és különféle analízisek a tervezési folyamatba integrálódtak, amelyeket a szoftver automatikusan végez.

A generatív tervezés eredményét nagy mértékben befolyásolja a gyártástechnológia megválasztása, amely lehet forgácsleválasztó eljárás, additív gyártás és öntés. A szoftver kizárólag olyan megoldásokat állít elő, amelyek megfelelnek a kiválasztott eljárásnak. Nagy előny, hogy az additív és hibrid megmunkálást feltételezve funkció-összevonással olyan több alkatrészből álló

termékek is egyesíthetők, amelyek a hagyományos gyártástechnológia miatt korábban ezt nem tették lehetővé. Ezek a tulajdonságok a későbbi felhasználás szempontjából további költségmegtakarítást jelenthetnek.

A generatív tervezési módszer nyújtotta tervezői problémamegoldást úgynevezett paradigmaváltás fogalmával illetik a téma kutatói és fejlesztői, mert megreformálja a klasszikus társadalomtudományi és természettudományos tervezői és konstruktóri szemléleteket. Ezek a látásmódok egymástól jól elkülöníthető tervezői folyamatokkal, gondolatmenettel és eszközrendszerrel rendelkeznek, de a műszaki tervezés és fejlesztés világában megfigyelhető folyamatos fejlődés egyfajta összemosódást mutat az egyes szemléleteken belül, amely kapcsán azt a kijelentést tehetjük, hogy az eltérő metódusok egyre jobban kiegészítik egymást.

A módszertani csoportosítás társadalomtudományi ágán az intuitív, kognitív és diszkurzív látásmódok közül a diszkurzív szemlélet jelenti a fejlődés legjelentősebb irányát, hiszen a módszert jellemző tevékenységek és a folyamatosan bővülő eszközrendszere által egyre eredményesebb a műszaki problémák megoldásának folyamatában.



10. ábra. A tervezési szemléletek minőségbiztosítási megközelítés alapján

A 10. ábra bemutatja a tervezői modellek összehasonlítását minőségbiztosítási szempontból, amelynek fő indikátorai a minőség, a módszer és az időbeli tervezhetőség. Ezeket a jelzőket egy-egy háromszög szimbolizálja, amelyeket vízszintes tagolással bontanak fel az egyes szemléletek. A kiadódó metszések közül az m_i a terv elvárt minőségének a valószínűsége, az i_i jellemző az intuíciónak a szükségességét mutatja és a t_i pedig a tervezéshez szükséges idő tervezhetőségét prezentálja.

A különféle módszertani elvek közül az intuitív modell tekinthető a legkorábban jegyzett technikának, majd később jelent meg a kognitív szemlélet, amelyet a diszkurzív módszerek követtek. A tervezéshez alkalmazott módszert és szemléletet mindig is nagy mértékben befolyásolta az adott kor technikai fejlettsége, amely önmagában határozta meg a tervezők és konstruktőrök számára elérhető különféle eszközrendszereket. Kezdetben a természetben megfigyelt folyamatok és megoldások analógiája nyújtott segítséget a tervezői feladatkörökben úgy, hogy az elraktározott tudásból fakadó intuíciók eredményes megoldást nyújthattak az egyes tervezői problémákra.

A tudományág fejlődését tekintve az a megállapítás jött létre, hogy az ember személyéhez köthető intuíció bizonytalanságot visz a rendszerbe azáltal, hogy az intuíciót nagy mértékben befolyásolhatja a konstruktőr egyéni tapasztalata és kreativitása. Ezek a jellemzők fejleszthetők, de nincs garancia arra, hogy a befektetett önfejlesztő munka kedvezőbb intuíciók megszületését eredményezze. A tervezés tudományában mindig is fontos volt a folyamat időigényének és a terv várható minőségének becslése, amely olyan módszertani fejlődési irányt követelt meg, amelyben az emberhez köthető bizonytalanságot visszaszorítja a folyamatban.

Az ábrán szereplő különálló háromszögek horizontális és vertikális metszetei képezik a minőségbiztosítási szempontokat. Függőleges irányban helyezkednek el az egyes tervezési szemléletek és a vízszintes irány mentén találhatók az egyes jellemzők, amelyek arányát a vízszintes metszőegyenes levetített pontjai határoznak meg. Az intuitív tervezői modell esetén a hangsúly a megfelelő intuíció meglétére koncentrálódik, de a terv minősége és a kidolgozáshoz szükséges időmennyiség nem tervezhető előre. A diszkurzív tervezői modell esetében az intuíció szerepe lecsökken, ezáltal a bizonytalanságok mértéke csökken, így a terv sikeressége és a ráfordított időmennyiség jól becsülhető. Ezeknek a jellemzőknek továbbá az az alapja, hogy a módszeres tervezés eszközszerete jelentős mértékű és folyamatos bővülést mutat, amely párhuzamban van a különféle iCAD rendszerek fejlődésével.

A tervezői eszközszerete egyik legújabb tagja a generatív tervezési modul, amely egyre szélesebb körben épül be az egyes iCAD szoftverekbe. A generatív tervezői modul alapjait tekintve egy optimalizáló szoftver, amely felhasználja az egyes matematikai szemléletek halmazából a szerkezetoptimalásra irányuló eljárásokat. A szoftver alapvető működését evolúciós eszközszeretben alkalmazott genetikai algoritmusok egészítik ki, amelyeket természetben fellelhető evolúciós folyamatokról mintáztak. Ezeket próbálja integrálni a számítógépes tervezési folyamatokba. Tehát a diszkurzív tervezési modell tekinthető a fejlődés irányának, hiszen a folyamat eszközszeretbe integrálódott célszoftverek bevonják a különböző szemléletek vagy metódusok elemeit, így a diszkurzív szemlélet afféle tervezési multidiszciplínának tekinthető.

4. SZÁMÍTÓGÉPPEL TÁMOGATOTT GENERATÍV TERVEZÉS

A számítógéppel támogatott vagy más néven szimuláció vezérelt tervezés sikerességének az alapja a különféle termékfejlesztési szakaszok optimalizációja, amely a gazdasági szempontokon túl a kialakuló termék műszaki értékét is javítja. A módszer lényege, hogy a prototípus vizsgálat vagy más szóval termékszimuláció több folyamatszakaszba is beépíthető. A termékszimuláció magába foglalja a digitális mintadarab előállítását és sokrétű tesztelését is. A folyamat célja legtöbb esetben a tömegcsökkentés, valamint a statikus és dinamikus terhelések okozta kifáradási tulajdonságok javítása.

4.1. Elméleti alapok

Az elmúlt évtizedekben számos topológiaoptimáló eljárást fejlesztettek ki, amelyek alapvetően bináris programozási problémára vezethetők vissza. A módszer célja, hogy megfelelő anyageloszlást állítson elő egy előre definiált területen vagy térfogaton, amelyet tervezési tartománynak nevezünk. A klasszikus összetétel, amelyet bináris megfelelőségi problémának neveznek az a „fekete-fehér” elrendezés, azaz szilárd és üreges térrészek megtalálása, amely minimalizálja a külső erők által végzett munkát, a térfogatkorlátozásnak megfelelően. Az így kialakult alak nem mindig tekinthető végső megoldásnak, hiszen annak megkeresésére további szempontoknak vagy más feltételeknek megfelelő alak- és/vagy méretoptimálás adhat választ. A topológiaoptimáló módszerek alapvetően három csoportra oszthatók:

- matematikai alapokon nyugvó eljárások, amelyek globális kritériumok meghatározására alkalmazhatók, mint például a hajlékonyság vagy a térfogat, ilyen a: homogenizációs módszer, a SIMP módszer, a szintfüggvény módszer és a fázismező módszer,
- heurisztikákra alapuló módszerek, amelyek homogenizálásra törekszenek kis mennyiségű anyag eltávolításával a tervezési tartomány azon részéből, ahol a vezérlő kritérium – mint pl. a feszültség – alacsony értéket mutat: soft kill (SK); hard kill (HK); evolúciós módszerek (ESO, AESO, BESO, XESO); fordított adaptáció és a metamorf fejlődés,
- vegyes eljárások a topológia- és alakoptimalás kombinálásával, mint: buborék módszer és a szintvonalak módszere.

A topológia optimáló módszer megalkotásakor vagy kiválasztásakor egyfelől a megoldandó feladatot kell szem előtt tartani, például, hogy mi a célfüggvény, milyen optimálási feltételeket kell kielégítenünk és milyen sajátosságokkal bír a szerkezet viselkedését leíró peremérték feladat. Mivel a jó megoldás kiértékelése szerkezetanalízis segítségével történik, amely diszkretizálás útján megy végbe általában végeelem módszerrel, lényeges, hogy hol és milyen módon kapcsolódik a tervezési modell a szerkezetanalízis modellhez. Azok a módszerek, amelyek a változó testre illeszkedő hálóval értékelik ki a szerkezet viselkedését, a topológia megváltozásakor nehézségekbe ütköznek. A topológiaoptimáló eljárások között kiemelt szerepe van azoknak a

módszereknek, amelyek implicit módon modellezik a geometriát, és egy állandó, képzeletbeli tartományon végzik el a szerkezetanalízist, mivel így könnyen alkalmazkodnak a kialakítás megváltozásához, és megtakarítják a változó alak hálózását is.

4.1.1. Homogenizációs módszer

A homogenizációs módszer alapgondolata, hogy a szerkezetet porózusnak tekinti és a mikroszkopikus üregek optimális eloszlását keresi az előre megadott tervezési tartományon. A végeselemes szerkezetanalízis során a tervezési tartományt N végeselemre osztja, amelyek oldalainak hossza 1. Tervezési változóként az egyes elemekben létrehozott téglalap alakú üregek mérete és iránya szolgál, amelyet a és b paraméter jellemez, ezáltal a szerkezet minden egyes eleméhez tervezési változók tartoznak. Ha az optimálás eredményeként $a = b = 1$ adódik, akkor az üreg elfoglalja a teljes elemet, tehát az elem nem vesz részt a terhelésátadásban így ki lehet iktatni a geometriából. A másik véglet, ha $a = b = 0$ adódik, ebben az esetben tömör anyagrészre van szükség. A többi esetben inhomogén sűrűségű vagy porózus anyagot kell alkalmazni, amely a gyakorlatban nem minden esetben megvalósítható. A tervezési változók elemenként nagyszámú számítást tesznek szükségessé, így indokolt azok számának csökkentése például négyzet alakú nyitásokkal jellemezve az elemek porozitását. A homogenizációs módszer volt az első olyan módszer, amely fix tartományon végezte el a szerkezetanalízist, később ebből az alapgondolatból alakult ki a SIMP módszer [63].

4.1.2. SIMP módszer

A SIMP módszer a legeredményesebb és legnépszerűbb topológiaoptimalizációs eljárás, a kereskedelmi szoftverek szinte mindegyike ezt az eljárást tartalmazza. Gépészeti alkalmazás esetén a topológiaoptimalizálás általában alkatrész szintű merevségre összpontosít, figyelembe véve a terhelési állapotokat. A kapott eredményeket rendszerint meg kell vizsgálni az alapvető gyárthatósági szempontok alapján. A módszer alapelve, hogy a szerkezeti elemek topológiáját egy előre meghatározott tervezési térrészben anyageloszlásként keresi, amit N darab végeselemre bont fel. Az egyes elemekhez tartozó tervezési változó a x_i fiktív relatív anyagsűrűség, ahol $i = 1, 2, \dots, N$ értékeket vesz fel. Ha $x_i = 1$, akkor az elem tömör, ha $x_i = 0$, akkor üreges. A nem folytonos (diszkrét) leírás okozta számítási problémák elkerülése érdekében a $\{0, 1\}$ diszkrét értékek helyett egy folytonos tervezési változó kerül használatra, ahol $0 \leq x_{min} \leq 1$, ezáltal simább átmenetet biztosítva az anyagsűrűség változásai között. Mivel az anyag relatív sűrűsége folyamatosan változhat, az anyag Young modulusa is folyamatosan változhat minden egyes elemnél. Minden egyes i elemre az x_i relatív sűrűségtenyező és a hozzárendelt izotróp anyagmodell E_0 Young rugalmassági modulusa közötti kapcsolatot a hatványtörvény segítségével számoljuk ki, amely:

$$E_i(x_i) = x_i^p \cdot E_0, \quad x_i \in [0, 1] \quad (1)$$

A p büntetőfaktor csökkenti a köztes sűrűségű elemek hozzájárulását a teljes merevséghez. A büntetőfaktor az optimalizálási megoldást olyan elemek felé irányítja, amelyek vagy fekete

színűek ($x_i = 1$) vagy fehér színűek ($x_i = x_{min}$). Numerikus kísérletek alapján a $p = 3$ büntetőparaméter értéke megfelelő. A módosított SIMP megközelítést megadhatjuk, mint:

$$E_i(x_i) = E_{min} + x_i^p (E_0 - E_{min}), \quad x_i \in [0, 1] \quad (2)$$

ahol E_{min} az üreges anyag rugalmassági modulusa, amely nem nulla az adott végelemhez tartozó merevségi mátrix szingularitásának elkerülése érdekében [117]. A topológia optimalizálás módszerei numerikus nehézségekkel rendelkeznek, mint például a hálófüggőség és a helyi minimumok [72]. Az ilyen problémák megoldását a normalizálási technikák alkalmazása segíti [118]. Az egyik leggyakoribb megközelítés a sűrűségszűrők használata [119]. Az alapszűrő sűrűségfüggvénye:

$$\tilde{x}_i = \frac{\sum_{j \in N_i} H_{ij} v_j x_j}{\sum_{j \in N_i} H_{ij} v_j}, \quad (3)$$

ahol N_i a x_i szemközti elem a v_i térfogattal, és H_{ij} egy súlytényező. Az N_i az alábbiak szerint definiálható:

$$N_i = \{j : \text{dist}(i, j) < R\}, \quad (4)$$

ahol a $\text{dist}(i, j)$ operátor az elemek középpontja és a j elem középpontja közötti távolság, és R a szomszédság vagy a szűrő mérete. A H_{ij} súlytényezőt a szomszédos elemek közötti távolság függvényében lehet meghatározni, például:

$$H_{ij} = R - \text{dist}(i, j), \quad (5)$$

ahol $j \in N_i$. A szűrt $\tilde{x}_i$ sűrűség egy módosított fizikai sűrűségmezőt határoz meg, amelyet beépítettek a topológia optimalizálási összetételébe és a SIMP modellbe, amely:

$$E_i(\tilde{x}_i) = E_{min} + \tilde{x}_i^p (E_0 - E_{min}), \quad \tilde{x}_i \in [0, 1]. \quad (6)$$

Népszerű optimalizálási cél a szerkezet teljes merevségének maximalizálása, vagy a szerkezet hajlékonyságának minimalizálása adott mennyiségű tömegeltávolítás mellett. A hajlékonyság a szerkezet teljes rugalmasságának a mértéke, amely a merevség inverzének tekinthető. A globális hajlékonyság egyenlő az elemek rugalmas vagy alakváltozási energiájának összegével. A C globális hajlékonyság minimalizálása egyenértékű a globális merevség maximalizálásával. Az optimalizáló algoritmus a szerkezet globális hajlékonyságának minimalizálására törekszik. A (6) egyenlet által megadott szabványosított SIMP-módszert és az általánosított Hooke-törvényt követve az i izotróp elem háromdimenziós konstitutív mátrixát az üresről szilárdra interpolálva:

$$C_i(\tilde{x}_i) = E_i(\tilde{x}_i) C_i^0, \quad \tilde{x}_i \in [0, 1] \quad (7)$$

ahol $\mathbf{C}_i^0$ a konstitutív mátrix, a Young egység modulusával. A végelem módszerével az elasztikus szilárd elem merevségi mátrixa a $\mathbf{C}_i(\tilde{x}_i)$ alkotó mátrix térbeli integrálja és a $\mathbf{B}$ feszültség-elmozdulási mátrix térfogat-integrálja a következő formában írható:

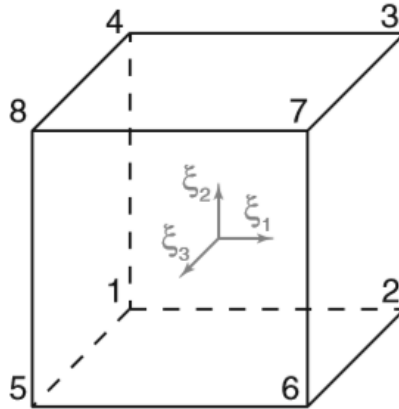
$$\mathbf{k}_i(\tilde{x}_i) = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \mathbf{B}^T \mathbf{C}_i(\tilde{x}_i) \mathbf{B} d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3, \quad (8)$$

ahol ξ_1 , ξ_2 és ξ_3 a természetes koordináták. A 11. ábrán látható sarkok hexaéderes koordinátáit az 1. táblázat mutatja. A $\mathbf{B}$ feszültség-elmozdulási mátrix a deformációt és a csomópont eltolódását mutatja. A SIMP módszer alkalmazásával az elem merevségi mátrixa az alábbiak szerint interpolálható:

$$\mathbf{k}_i(\tilde{x}_i) = \mathbf{E}_i(\tilde{x}_i) \mathbf{k}_i^0, \quad (9)$$

ahol:

$$\mathbf{k}_i^0 = \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \int_{-1}^{+1} \mathbf{B}^T \mathbf{C}^0 \mathbf{B} d\xi_1 d\xi_2 d\xi_3. \quad (10)$$



11. ábra. A nyolc csomópontú hexaéder és a természetes koordináták ξ_1 , ξ_2 és ξ_3

1. táblázat. A nyolc csomópontú hatszögletű elem csomópont számozási konvenciókkal

Csomópont	ξ_1	ξ_2	ξ_3
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	+1	+1	-1
4	-1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	+1	+1	+1
8	-1	+1	+1

A (10) egyenletben szereplő értékek kicserélésével a $\mathbf{k}_i^0$ 24×24 elem merevségi mátrix egy nyolc csomópontú hatszögletű elem esetében:

$$\mathbf{C}_i^0 = \frac{1}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} \mathbf{k}_1 & \mathbf{k}_2 & \mathbf{k}_3 & \mathbf{k}_4 \\ \mathbf{k}_2^T & \mathbf{k}_5 & \mathbf{k}_6 & \mathbf{k}_4^T \\ \mathbf{k}_3^T & \mathbf{k}_6 & \mathbf{k}_5 & \mathbf{k}_2^T \\ \mathbf{k}_4 & \mathbf{k}_3 & \mathbf{k}_2 & \mathbf{k}_1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

ahol a $\mathbf{k}_m$ ($m = 1, \dots, 6$) 6×6 szimmetrikus mátrix. A globális $\mathbf{K}$ merevségi mátrix az elemszintű társaik összeállításával adódik:

$$\mathbf{K}(\tilde{\mathbf{x}}) = A_{i=l}^n \mathbf{k}_i(\tilde{\mathbf{x}}_i) = A_{i=l}^n E_i(\tilde{\mathbf{x}}_i) \mathbf{k}_i^0, \quad (12)$$

ahol n az elemek teljes száma. A $\mathbf{k}_i$ és $\mathbf{k}_i^0$ elemek merevségi mátrixok teljes változatainak felhasználásával kifejezhető, mint:

$$\mathbf{K}(\tilde{\mathbf{x}}) = \sum_{i=l}^n \mathbf{k}_i(\tilde{\mathbf{x}}_i) = \sum_{i=l}^n E_i(\tilde{\mathbf{x}}_i) \mathbf{k}_i^0, \quad (13)$$

ahol $\mathbf{k}_i^0$ egy állandó mátrix. A (6) egyenletben meghatározott interpolációs függvény felhasználásával végül írható, hogy:

$$\mathbf{K}(\tilde{\mathbf{x}}) = \sum_{i=l}^n \left[E_{min} + \tilde{x}_i^p (E_0 - E_{min}) \right] \mathbf{k}_i^0 \quad (14)$$

így, az $\mathbf{U}(\tilde{\mathbf{x}})$ csomópont-elmozdulási vektor az egyensúlyi egyenlet megoldása:

$$\mathbf{K}(\tilde{\mathbf{x}}) \mathbf{u}(\tilde{\mathbf{x}}) = \mathbf{f}, \quad (15)$$

ahol $\mathbf{f}$ a csomóponti erők vektora és független az $\tilde{\mathbf{x}}$ fizikai sűrűségétől. Egy elem rugalmassági modulusának csökkentése az elem merevségének csökkenéséhez vezet. A SIMP-módszer szerint a globális merevség a következők szerint modulál:

$$\mathbf{K}(\tilde{\mathbf{x}}) = \sum_{i=l}^n \left[\tilde{x}_{min} + (1 - \tilde{x}_{min}) \tilde{x}_i^p \right] \mathbf{k}_i, \quad (16)$$

ahol $\mathbf{k}_i$ az elem merevségi mátrixa, $\tilde{x}_{min}$ a minimális relatív sűrűség, $\tilde{x}_i$ az elem relatív sűrűsége, p a büntető faktor, és n az elemek száma a tervezési tartományban. A külső erők munkája megegyezik a deformált szerkezetben tárolt alakváltozási energiával, így a célfüggvény a következő módon is írható:

$$\min \mathbf{C} = \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{K} \cdot \mathbf{u}, \quad (17)$$

$$\min \mathbf{C}(\{\tilde{\mathbf{x}}\}) = \sum_{i=l}^n (\tilde{x}_i)^p [\mathbf{u}_i]^T [\mathbf{K}_i] [\mathbf{u}_i], \quad (18)$$

ahol: $[\mathbf{u}_i]$ az e elem csomóponti elmozdulásvektora, $[\mathbf{k}_i]$ az e elem merevségi mátrixa, és a $\{\tilde{\mathbf{x}}\}$ vektor tartalmazza az elemek $\tilde{x}_i$ relatív sűrűségét. Minden egyes optimalizálási iteráció során teljesíteni kell a céltömeg-kényszert, a globális erő-merevség egyensúlyt és a szükséges funkcionális kényszereket.

$$\sum_{i=1}^n \{v_i\}^T \tilde{x}_i \leq M_{\text{cél}}, \quad (19)$$

ahol v_i az elem térfogata, és $M_{\text{cél}}$ az optimalizálás céltömege. A feladat folytonos megfogalmazásához bevezetve a Lagrange-multiplikátort, az optimálás szükséges feltétele:

$$p\tilde{x}(x)^{p-1} E_{ijkl}^0 \varepsilon_{kl}(u) \varepsilon_{ij}(u) = \Lambda, \quad (20)$$

amelynek értelmében a sűrűség eloszlása akkor optimális, ha a (20) bal oldalán lévő alakváltozási energiasűrűséget definiáló tag állandó. Mivel a nagy energiájú helyek merevsége kicsi, egy fix pont típusú változó frissítési eljárást lehet előírni, amely a kis alakváltozási energiájú helyeken anyagot vesz el, míg a nagy energiájú helyeken hozzáad:

$$\tilde{x}_{k+1} = \begin{cases} \max\{(1-\varsigma)\tilde{x}_k, \tilde{x}_{\min}\}, & \text{ha } \tilde{x}_k B_k^\eta \leq \{(1-\varsigma)\tilde{x}_k, \tilde{x}_{\min}\} \\ \min\{(1+\varsigma)\tilde{x}_k, 1\}, & \text{ha } \min\{(1+\varsigma)\tilde{x}_k, 1\} \leq \tilde{x}_k B_k^\eta \\ \tilde{x}_k B_k^\eta & \text{egyébként} \end{cases}, \quad (21)$$

$$B_k = \Lambda_k^{-1} p\tilde{x}(x)^{p-1} E_{ijkl}^0 \varepsilon_{ij}(u_k) \varepsilon_{kl}(u_k), \quad (22)$$

ahol: k az aktuális iterációs lépés, u_k a k -adik iterációs lépésben meghatározott, $\tilde{x}_k$ -től függő elmozdulás megoldása az egyensúlyi egyenletnek. Az optimum akkor teljesül köztes sűrűségű elemeken, ha $B_k = 1$. A lépések hatékonysága az η beállító paraméter és ς mozgási korláton keresztül ellenőrizhető, valamint $\tilde{x}_k + 1$ értéke a pillanatnyi Λ értékétől függ. Az egyértelmű monoton függvénykapcsolat miatt Λ értéke például intervallumfelezéssel megadható. A konvergencia gyorsítására és stabilitásának biztosítására szolgáló paraméterek értéke jellemzően $\eta = 0,5$ és $\varsigma = 0,2$. Továbbá az előírt térfogathányad megválasztása döntően befolyásolhatja az optimális kialakítást. A háló finomítása során az alapvető eljárás nem biztosítja, hogy egyértelmű megoldás álljon elő. Három, elvében különböző technika alkalmazásával érhető el konvergencia:

- gradiens/perem kontroll, minimális tagméret előírása;
- a paraméterter redukálása (durvább háló a tervezési tartományon, mint az analízisre);
- szűrési módszerek (érzékenységszűrés, ill. sűrűségyszűrés).

A köztes sűrűségű tartományok kiszűrése hatékonyan kezelhető az egyszerű p büntető kitevő előírásával. A SIMP módszerrel a feladat megoldása az alábbi lépésekben zajlik:

- a kezdeti tervezési tartomány meghatározása és a peremérték probléma megadása kezdeti homogén anyageloszlással;
- az elmozdulások és alakváltozások végeselemes módszerrel való kiszámítása az aktuális sűrűséggel;
- az aktuális design hajlékonyságának kiszámítása;
- amennyiben nincs jelentős változás az előző lépésben számolt értékhez képest vagy teljesül az optimum feltétele, akkor leállítás történik;
- egyébként kiszámításra kerül az új eloszlás és egy belső iterációban a λ Lagrange-multiplikátor értéke a térfogat kényszer alapján;
- az eljárás ismétlése a második lépéstől.

Amennyiben az optimum matematikai programozási módszerrel kerül kiszámításra, elsődlegesen meg kell határozni a célfüggvény és az optimálási feltétel érzékenységet. Ha diszkrét formában kerül felírásra az optimálási feladat az (1) és (2) szerint, az érzékenyséértékek az adjungált módszerrel számíthatók, minthogy ebben az esetben az adjungált változó megegyezik az elmozdulással és így a hajlékonyságérzékenysége [72]:

$$\frac{\partial C}{\partial \rho_i} = -p(\rho_i)^{p-1} [u_i]^T [K_i] [u_i]. \quad (23)$$

Az érzékenység tehát nem függ a többi elemtől, csak implicit módon az egyensúlyi egyenletet kielégítő elmozdulástól. Mivel az érzékenység negatív, ezért anyag hozzáadásával a hajlékonyság csökken és a merevség növekedik. A matematikai programozási módszerek közül a mozgó aszimptoták módszere Method of Moving Asymptotes (MMA) alkalmas a nagyszámú tervezési változó kezelésére. Hasonló a megoldás algoritmus és számítási szükséglete az optimumkritérium módszerhez. A számítási feladatok jelentős részét a szerkezetanalízisek képezik. A SIMP módszer a [64] alapján került kidolgozásra.

4.1.3. Szintfüggvény módszerek

A szintfüggvény módszere Level Set Methods (LSM) egy numerikus eljárás, amely egy határfelület változását követi le. A módszer a mozgó felületek és a folyadékok mechanikájának egyenletei közötti kapcsolatot használja ki. Amennyiben a mozgás csak egy irányba megy végbe, akkor stacionárius feladatra vezethető vissza a probléma. Az időfüggő szintfelület módszer lényegesen lassabb. Amennyiben adott két térrész egy határoló vonallal elválasztva, és ennek minden pontjára adott egy pozitív sebesség, akkor a mozgás sebessége az adott helyen érzékelt ellenállástól függ. Az eljárás a határfelületet csomópontokkal osztja fel és a csomópontok mozgására vezeti vissza a köztük levő határvonal mozgását. A gyorsan haladó algoritmus a stacionárius tulajdonságot használja ki a határvonal követése helyett. A problémát erre egy hálót fektetve minden csomóponthoz egy idő rendelhető, amikor a megváltozott határvonal odaér. Egy

kezdeti kör alakzattal, amely folyamatosan terjed és keresztezi az időmérő csomópontokat, a $T(x,y)$ függvény egy kúp palástfelülete lesz, amely az xy síkot pontosan a kezdeti határvonalnál metszi. Minden T időponthoz tartozik egy ponthalmaz, amely adott időpillanatban leírja a felület kontúrját. Ezt a módot peremérték megadásnak is nevezik. A módszer előnye, hogy a numerikus számításokat fix, derékszögű hálón végzi el. A határfelületet egy előjeles távolságfüggvény nulla szintjeként azonosítja. A határfelület változását a szintfüggvény változásának felelteti meg, és a szintfüggvény mozgását leíró kezdeti érték probléma megfelel a Hamilton–Jacobi egyenletnek. Így a görbületek, normálisok könnyen számíthatók, a topológiai változások természetes módon következnek be. Az egyenlet megoldása a hiperbolikus megmaradási törvények mintájára egy entrópiakielégítő séma alapján történik [64].

4.1.4. Topológiai deriváltak módszere

A topológiai deriváltak módszere egy matematikai eljárás szilárdságtani modellek optimalizálására, illetve geometriai vizsgálatra használatos. A módszer lehetővé teszi az optimalizálás során a kisebb változtatásokat egy adott geometriai objektumon, amely nem változtatja meg radikálisan a teljes szerkezetet, de mégis javítja a kitűzött szempontokat, mint például a feszültség eloszlás egységesítése. A topológiai derivált egy tartományon megjelenő kis mértékű topológiai változások szerinti derivált, mint például egy furat megjelenése, illetve eltűnése. Tehát a módszer leginkább a formák, struktúrák és térbeli elrendezések optimalizálásához kapcsolódik, amikor az objektumok közötti apró változtatások kerülnek elemzésre, amely gyakorlatilag egy pont vagy egy kis méretű térbeli szegmens hozzáadása, vagy eltávolítása. A módszer sajátossága, hogy a modell szempontjából nem szükséges minden részletet újra számolni, hanem csak a változtatott régiók újraszámolása történik, amely meggyorsítja az optimalizálás folyamatát. A térbeli formák finomítása tekintetében segíthet új design elemek hozzáadásában vagy a nem kívánt részek eltávolításában a mérnöki tervezés során. Hatékony optimalizálási technikák közé sorolandó. A módszer alapvetően a differenciálgeometria, a variációs elmélet és a numerikus módszerek kombinációjára épít. Az eljárás legfőbb előnye, hogy kevesebb iteráció és durvább háló esetén is elfogadható eredményeket szolgáltat, de az optimálási feltételek kezelésének hiánya egyelőre korlátozza a módszer általános használhatóságát [120].

4.1.5. Fázismezők módszere

A fázisfelület megközelítés a szintfelület módszerhez hasonlóan egy segédfüggvényen keresztül követi a perem változását. Működésében tehát igen hasonlít a szintfelület módszerhez, azonban egyszerűbb a számítás, minthogy itt nem szükséges a függvények újra inicializálása. A szerkezet alakját úgy tekinti, mint egy kétfázisú rendszer fázishatárát. Bevezetésre kerül a fázismező segédfüggvény és a függvény optimalizálása az időfüggő reakció diffúziós egyenlet megoldásával történik. Tehát a fázismezők módszere alapvetően egy folyamatosan változó skaláris mezőt használ a fizikai rendszerek leírására, amelyeknek nincsenek éles határfelületeik. A fázismezők módszere egy parciális differenciálegyenlet rendszer megoldásával valósul meg. A tervezett rendszerre egy fázismezőt rendelve meghatározható, hogy az egyes pontok anyagi

tulajdonságai hogyan változnak az egyik fázistól a másikig. Ez a mező egy fokozatos átmenetet modellez a különböző fázisok között. Az egyenletrendszer figyelembe veszi a fázisok közötti energia- és entrópiaváltozásokat is, hiszen a módszer az energia minimalizálására épít, ahol a cél az, hogy a rendszer egy stabil, alacsony energiaállapotba kerüljön. Topológiai optimalizálásban a fázismezők módszere lehetővé teszi a struktúrák optimalizálása esetén az egyenletes anyageloszlást. A módszer jellemzően nagy számítási igénnyel bír. A modellezéshez szükséges paraméterek, mint például a fázisátmeneti tartományok és energia pontos meghatározása kulcsfontosságú, azonban nem mindig ismert [121].

4.1.6. Evolúciós módszerek

Xie Y. M. és Steven G. P. bevezette az evolúciós szerkezeti optimalizálást, amely angol elnevezés alapján *Evolutionary Structural Optimization* (ESO). A módszer azon az elgondoláson alapul, hogy egy szerkezet optimális tulajdonságait jelentő maximális merevség és minimális tömeg úgy állítható elő, hogy fokozatosan eltávolításra kerülnek a tervezési területről a feleslegesnek bizonyuló anyagrészek. A tervezési tartomány felépítése után külső terhelések és kényszerfeltételek hatnak az elemmodellre. A szerkezetanalízis eredménye alapján a terhelésátadásban nem közreműködő anyagrészek eltávolításra kerülnek. A módszer előnye, hogy a megoldás során nem szükséges az újrarahálózás és a feladat több terhelés esetén is megoldható. Hátránya lehet, hogy a rögzített háló miatt a megoldás alakja lépcsőzetes lehet. A sarokpontokban található eliminált elemek sora és a csökkenő elemszám mellett felmerülhet a hálófinomítás szükségességének kérdése. Az eltávolítandó elemek mértékének megállapítására szolgáló paraméterek helyes megválasztása nagyon fontos, ellenben helytelen lépésközök esetén levágódhatnak a terhelésátadó és a megtámasztott felületek is. A metamorf fejlődés módszere egyfajta két irányú evolúciós módszer az anyaghozzáadási és anyagelvételi arány dinamikusan adaptálódik minden iterációban, amely gyorsítja a konvergenciát [122] - [124].

4.1.7. Fordított adaptáció módszere

A fordított adaptáció módszere, angol elnevezése alapján *Reverse Adaptivity Method* az evolúciós technikák egy továbbfejlesztett változata. A módszer fordított adaptív elemzéssel halad, amely során finomítja az alacsony feszültségű régiókban a végeelem hálót, és az előírt eltávolítandó anyagmennyiségnek megfelelően néhányat elhagy, majd ismétli a lépést. Az elemek méretének szukcesszív csökkentésével a módszer elkerüli az evolúciós technikák számos hátrányát, továbbá elfogadható számítási igénnyel jellemezhető. A szerkezet integritásának megőrzésére lépésenként ellenőrzés történik a peremfeltételek megtartása érdekében és a terheletlen, kapcsolódásmentes anyagszigetek eltávolítására [125].

4.1.8. Buborék módszer

A buborék módszer angol elnevezésén *Bubble Method* (BM) alapgondolata a topológia megváltoztatására iteratív módon új üregek és buborékok illesztése a vizsgált szerkezetbe, amelyek változó peremén alakoptimalás történik. Ez a folyamat különböző módszerekkel történhet, többek között variációs feladat megoldásával. Az alakoptimalás addig zajlik az adott

topológián megfogalmazott feladatra, amíg további javulás már nem érhető el. Ezt követően üreg beiktatásával próbálja javítani a szerkezetet. Az üreg optimális helyének meghatározása speciális esetben, a hajlékonyság vagy térfogatanalitikus összefüggésekkel, általános feladat esetén numerikusan történik. A pozicionálás után alakoptimalálás történik az új üregek optimális alakjának és a változó peremre történő hatásának meghatározására [126].

4.1.9. Szintvonalak módszere

A szintvonalak módszere egy lokális feszültségi állapotra történő optimalálás, amely során a szerkezet alakjára és topológiájára vonatkozóan globális változtatást végez fix hálózason alapuló végelelemes analízis alkalmazásával. A fix hálós végelelem módszer előnye, hogy az elemi merevségi mátrixok tekintetében változás csak a peremen levő elemeken van, így hatékonyan becsülhető a válaszfüggvények eloszlása. A módszer folyamatában kiszámításra kerül a kritériumként választott eloszlás a tervezési tartományban, majd egy minimumérték meghatározásával elvágva az eloszlást egy új szerkezeti határ jöhet létre lineáris interpoláció útján. A minimum szint alá eső tartományok eltávolítódnak a tervezési térből és a válaszfüggvény eloszlása újra kiszámításra kerül. A peremen lévő anyagrészek újra elosztódnak vagy eltávolítódnak. A ciklus addig ismétlődik, amíg el nem éri a végső térfogatot [127].

4.2. Topográfiai optimalálás és generatív tervezés kapcsolata

A topológia optimalizálás (TO) és a generatív tervezés (GD) két hatékony eljárás, amelyek rendelkezésre állnak a tervezői problémák megoldásához. Mindkét eljárás egyaránt használható kezdeti koncepció meghatározására, amelyből a tervezés későbbi szakaszaiban részletesebb tervet lehet kidolgozni. Az utóbbi években a GD-t a gépészeti területen is egyre nagyobb számban alkalmazzák, köszönhetően a kereskedelmi szoftverek fejlesztésének és bevezetésének [128], [129]. A GD egy parametrikus, számítógéppel támogatott tervezésen (CAD-en) alapuló koncepcionális projekttámogatás a tervezőmérnök számára, amely több megoldás generálására képes, amelyek eltérő gyártási technikával rendelkezhetnek [130]. A GD lényege az evolúciós és genetikus algoritmusok alkalmazása alternatív megoldások létrehozására és feltöltésére a tervezési térben [131]. Ezek az algoritmusok úgy optimalizálják a megoldásokat, hogy figyelembe veszik a terhelési állapotot, az anyagtulajdonságokat és a különféle kényszereket. Lényeges, hogy a GD algoritmusok használhatják az evolúciós tervezést (EV) és a TO-t is, de nem korlátozódnak ezek közül csak az egyik használatára [132].

A szakirodalomban nehéz olyan egzakt és következetes definíciót találni arra vonatkozóan, hogy mi a GD, azonban elmondható, hogy *„a generatív tervezési rendszerek célja olyan új tervezési eljárások létrehozása, amelyek a jelenlegi számítási és gyártási képességek kiaknázásával térben újszerű, ugyanakkor megfelelő és megvalósítható terveket hoznak létre”* [133]. A megfogalmazás alapján a GD eljárás segíthet a mérnököknek tervezőmérnökként gondolkodni, és fordítva [134].

Fontos megjegyezni, hogy a két eljárás közötti különbség sok esetben nem egyértelmű, mivel a TO algoritmusok a GD-ben is használhatók. Másrészt a GD számos olyan megoldást kínál,

amelyek megfelelnek a tervező igényeinek, ezáltal lehetővé téve azt, hogy egy probléma többféle megközelítéssel kerüljön megoldásra, majd jellemzően a tervezési folyamatban a megfelelő megoldás kiválasztása a tervező személyes megítélésén alapul. A GD lehetővé teszi a gyártási szempontok figyelembevételét olyan szempontok integrálásával, mint a végeselemes módszer (VEM) elemzés, a gyártási korlátok és előnyök, valamint a gyártási költségek. Ez az integráció pozitívan befolyásolja a tervezési folyamatot, hiszen a lehetséges problémák előreláthatók, így a kockázat csökken. Ez a termékfejlesztési stratégia vagy megközelítés lehetővé teszi a tervezők számára, hogy előre értékeljék az egyes megoldások vagy irányok megfelelőségét, részben elkerülve a költséges tesztelési folyamatokat [135]. A módszertan beleillik és átfogja a párhuzamos tervezési megközelítést, ahol egy projekt fejlesztési ciklus időtartama akár 70%-kal is csökkenthető [136].

A GD szoftveren alapuló szimulációvezérelt módszer célja egy olyan módszertan meghatározása, amellyel gyorsan kiválasztható a legígéretesebb megoldás a teljes megoldások portfóliójából, csökkentve ezzel a tervezési fázisban eltöltött időt. A megközelítés a koncepcionális tervezésre összpontosít, lehetővé teszi a különböző geometriák elemzését és rangsorolását. Lehetőséget nyújt a termék gyors azonosítására a funkcionalitás, a költségek és a gyártási szempontok alapján. Megnyitja az utat az előzetes és a végleges tervek következő lépései felé.

5. A GENERATÍV TERVEZÉSI FOLYAMATOT LEÍRÓ ÚJ MÓDSZERTAN

A fejezet bemutatja az általam létrehozott módszeres kódolási technikát, amely segítségével jellemezhetők a generatív tervezési technikával előállított megoldások. A módszer lefedi a teljes tervezési folyamatot, ahol az egyes lépések készültségi fokának megfelelően kódolja az egyes részmegoldásokat a végleges konstrukcióig. Az eljárás részletes ismertetése előtt bemutatásra kerülnek az iCAD rendszerekbe integrálódott generatív tervezői modulok és azok folyamatszakaszai.

5.1. A generatív tervezést támogató szoftverek felépítése

A korszerű szerkezetoptimaláló szoftverek két kategóriába sorolhatók. Az első kategóriát az úgynevezett általános célú rendszerek alkotják, amelyek különböző feladattípusokhoz alkalmas matematikai algoritmusokat és szimulációs eszközöket kínálnak, ahol grafikus felületen állítható össze a feladat modellje és a megoldóalgoritmushoz szükséges adatkapcsolat. Ezek a rendszerek többnyire programozhatók, de rendelkeznek beépített módszerekkel, amelyet kiegészítenek a statisztika eszközei. A geometria előkészítésére kellően rugalmasan kapcsolódnak a felhasználó által preferált beviteli rendszerekhez.

A másik csoportba a CAD/CAE rendszerek tartoznak, amelyek célzott problémakör megoldására használatosak egy szűkített eszköztárral, hogy a feladatmegoldás minél gyorsabb lehessen. A geometriai előkészítés jellemzően ugyanazon rendszerben készül.

A generatív tervezést támogató szoftverek a 2010-es évek első felében jelentek meg. Ezekben az években az Airbus részére fejlesztett az AutoDesk optimalizált szerkezeteket, ahol a fejlesztési részleg vezető mérnöke Jesse Coors-Blankenship volt. Az itt szerzett tapasztalatokat felhasználva alapította meg a Frustum nevű cégét, ahol kifejlesztette a TrueSOLID néven futó generatív tervezést támogató kernelt, ez a termék több tervezőszoftverben is elérhető. A másik nagy fejlesztő az AutoDesk, ahol a kutatási részlegén futó Dreamcatcher nevű projektből jött létre a generatív tervezést támogató termék, mely szintén elérhető. Felismerve a generatív tervezés igényét újabb szoftverfejlesztők termékei váltak elérhetővé. Ezek főbb jellemzői a széleskörű optimalizálást biztosító lehetőségek (pl. méret, tömeg, szilárdság, anyagminőség, költségek, ütemterv, gyárthatóság) valamint a felhőalapú szolgáltatás. A generatív tervezési folyamat iterációs eljárásaiban végzett számítási teljesítmény a hagyományos feladatokhoz viszonyítva jóval költségesebb, így a felhőalapú számítások költséghatékony hozzáférést biztosítanak a nagyszámú generált változathoz. A 2. táblázat összefoglalja és röviden bemutatja a legismertebb generatív tervezést támogató szoftvereket.

2. táblázat. Generatív tervezőszoftverek [137]

<i>Szoftverfejlesztő</i>	<i>Termék</i>	<i>Jellemzők</i>
<i>Frustum</i>	<i>Generate</i>	<i>Felhőalapú alkalmazás, a voxel-alapú tervezési algoritmust egyesíti végeselemes analízissel. 2018 novemberéig önálló termék, ezt követően a PTC felvásárolta.</i>
<i>nTopology</i>	<i>Element</i>	<i>Generatív, függvényalapú alkalmazás, amely azonnali visszajelzést ad a tervezés során, ahogy az objektum alakját, valamint a gyártási folyamatot optimalizálja.</i>
<i>ParaMatters</i>	<i>CogniCAD</i>	<i>Felhőalapú tervezési platform, amely elsősorban az additív gyártási folyamatokra fókuszál.</i>

A mérnöki fejlesztést támogató szimulációs - például VEM és CFD - szoftverekben is elérhetők a topológiai optimalizálást és a generatív tervezést támogató eljárások, amelyet a 3. táblázat mutat be.

3. táblázat. Generatív tervezést támogató CAE szoftverek [137]

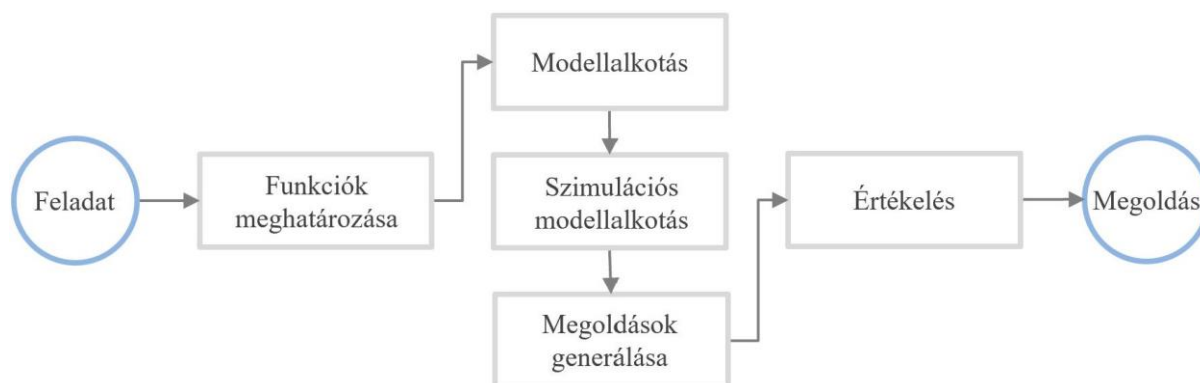
<i>Szoftverfejlesztő</i>	<i>Termék(ek)</i>	<i>Jellemzők</i>
<i>Altair</i>	<i>OptiStruct</i>	<i>Párhuzamos futtatást tesz lehetővé, hogy gyorsan végrehajthassa a nagyméretű optimalizálási feladatokat.</i>
<i>ANSYS</i>	<i>ANSYS Mechanical</i>	<i>Az ANSYS topológiai optimalizálási algoritmus a munkaasztalról indítható, így a szimulációs munkafolyamatba illeszthető.</i>
<i>Dassault Systèmes</i>	<i>Tosca Structure, Tosca Fluid</i>	<i>A Tosca szerkezet optimalizáló csomag az ABAQUS, ANSYS és MSC Nastran végeselemes megoldókkal együttműködve integrálódik a CAE környezetbe.</i>
<i>ESI Group</i>	<i>PAM-STAMP, ProCAST, SYSTUS</i>	<i>Beépülő generatív tervezési technikákat kínál, valamint speciális alakoptimalizálást a SYSTUS szimulációs csomagban</i>
<i>MSC Software</i>	<i>MSC Nastran Optimization</i>	<i>Többféle eljárást kínál, az alak és topológiai optimalizálástól a folyamatkezelési megoldásokig.</i>

A generatív tervezést támogató modulok a parametrikus tervezőrendszerekben is elérhetők, amelyet a 4. táblázat ismertet. Ezek alapvetően a fent bemutatott fejlesztők termékei, melyek integrált módon érhetők el a rendszerekben.

4. táblázat. Integrált rendszerek generatív tervező modullal [137]

<i>Szoftverfejlesztő</i>	<i>Termék(ek)</i>	<i>Jellemzők</i>
<i>AutoDesk</i>	<i>Fusion 360, Inventor</i>	<i>A prémium előfizetéseknél hozzáférést biztosít az optimalizálási beállításokhoz és számításokhoz, valamint a felhőalapú számítási erőforrásokhoz.</i>
<i>Dassault Systèmes</i>	<i>TOSCA suite</i>	<i>Hozzáférést biztosít a TOSCA optimalizáló csomaghoz a CATIA és a SOLIDWORKS CAD szoftvereknél.</i>
<i>Robert McNeel & Associates</i>	<i>Rhino</i>	<i>A Grasshopper vizuális programozási nyelvre és környezetére támaszkodik a tervezés automatizálásához. A felhasználók az alkatrészeket húzási műveletekkel, logikailag összekapcsolják a tervnek megfelelően.</i>
<i>PTC</i>	<i>Creo Simulate</i>	<i>A Vanderplaats K+F GENESIS programot használja az optimalizáláshoz. Az eredményeket szabadformájú (B-rep) objektumokká konvertálja, így elkerülhetők a máshol alkalmazott poligon modellek. A Creo 7.0 verziótól a Frustum technológiáját használja.</i>
<i>Siemens</i>	<i>NX, Solid Edge</i>	<i>A Frustum Generate kernelét integrálja a generatív tervezéshez. A felhasználók a generált eredményeket konvergens modellezéssel módosíthatják.</i>
<i>Altair</i>	<i>solidThinking Inspire</i>	<i>A topológiai optimalizáció a CAD modellezési folyamatba integrált.</i>

Az integrált rendszerekben elérhető modulok előnye, hogy a generatív tervezéssel előállított modellek közvetlenül felhasználhatók az adott CAD rendszerben, így nincs szükség a különböző szoftverek közötti termékadat cserére, ami konverziós hibákat okozhat. Az eljárás alapvetően a funkcionális megfelelésre összpontosít. Az alkatrész felépítése és annak formavilága megosztva tartalmaz ember által létrehozott és a szoftver által generált anyaghalmozatot. A generatív tervezési folyamat különféle szakaszokra bontható.



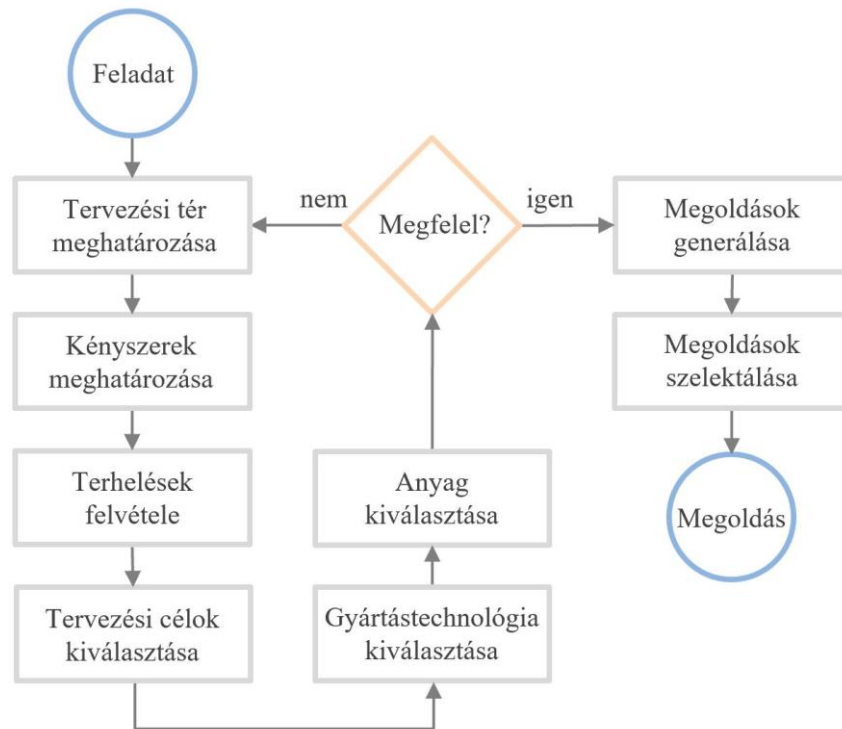
12. ábra. A generatív tervezési folyamat szakaszai

A 12. ábrán láthatók a generatív tervezési folyamat szakaszai. A feladatmegoldás a tervezendő alkatrész funkcionális peremfeltételeinek meghatározásával kezdődik. A következő szakasz a modellalkotás, amely során tervezési térfogatok létrehozása szükséges. Következő munkafázisban

a létrehozott modellek segítségével szimulációs modellalkotást kell végezni. Ezek után az egyes megoldások generálhatók és értékelhetők.

5.2. Új leírási módszer a generatív tervezés folyamatában

A generatív tervezés folyamatában alkalmazható új leírási módszer bemutatásához elengedhetetlen a tervezési folyamat lépéseinek ismertetése, amely a 13. ábrán látható folyamatábrával jellemezhető.



13. ábra. A generatív tervezési folyamat lépései iCAD rendszerben

A 13. ábrán látható lépések érvényesek és hasonlóságot mutatnak a 4. táblázatban feltüntetett valamennyi integrált CAD rendszer használatával. A továbbiakban egy-egy alfejezet segítségével kerülnek kifejtésre az egyes lépésekben elvégzendő feladatok és az arra vonatkozó új leírási technika, amely minden generatív tervezési technikával előállított alkatrészre használható.

5.2.1. Modellalkotási szakasz

A generatív tervezési folyamat modellalkotási szakaszában első lépésként a tervezési tér meghatározása szükséges, amely többcélú feladat. Szükség van egy befoglaló térfogat létrehozására, amely határt szab a tervezésnek, majd ez a térfogat anyagmegkötő és anyagkizáró geometriákkal egészíthető ki.

Első lépés a tervezési térfogat definiálása, amelyet a külföldi szakirodalmak és a különféle iCAD szoftverek jellemzően *Design Space* elnevezéssel illetnek. Ez a térrész sík és- vagy szabad felületekkel határolt zárt térfogat, amely korlátozza az optimalás során fellépő anyagterjedést. Ezt a geometriai peremfeltételt jellemzően a tervezendő alkatrész beépítettsége és a szomszédos komponensek helyzetei és geometriái határozzák meg.

A modellalkotási szakasz második lépésében kerül sor a különféle konstrukciós geometriák idegen szóval *Construction Body* meghatározására, amelyek megtartó *Preserve Geometries* vagy kizáró *Obstacle Geometries* feltételt szabnak az anyagterjedésnek. Mindkét esetben az objektum alakja változatlan marad, de megtartás esetén a geometria tömör, kizáró feltétel esetén a geometria üres marad. Gyakorlatilag ezek az elemek hordozzák a gyártmány funkcióit, amely a valóságban egy térbeli funkcióstruktúra segítségével felépíti a teljes alkatrészt. Minden egyes funkció rendelkezik egy alaksajátossággal, amely segítségével ellátja feladatát. Ezek a geometriák jellemzően olyan kontakt felületek, amelyek az optimálandó alkatrész mechanikai modelljében fontos peremfeltételeket hordoznak, mint például a külső terhelések felvétele és egyéb korlátozó kényszerek megvalósítása. A funkciók halmaza egy konstans jellemző, hiszen azt az optimálandó alkatrész konstrukciója határozza meg.

Hagyományos szemlélettel tervezett alkatrészek esetén nem kellett különbséget tenni az egyes funkciókat összekötő anyagfolytonosságok között. A topológiai optimáláshoz szükséges geometriai megkötések megadásához legtöbb esetben a struktúra felbontása és szegmentálása szükséges. A felbontás egy nyitott intervallumnak tekinthető, amely tartalmazza az alkatrész összes funkcióját. Az intervallum két szélsőértéke az, hogy egyetlen funkciópár között sincs anyagmegtartó feltétel vagy a struktúra gráf összes összekötő elemén anyagmegtartó feltétel van érvényben. A javasolt új leírásmód egyik fontos tulajdonsága és lényege, hogy az anyagmegtartó feltételek csupán a funkciók összekötésére vonatkoznak. Ezt azért fontos kiemelni, mert a konstrukciós geometriák megadása során létrehozhatók olyan fix kitöltésű vagy üres térfogatelemek, amelyek önmagukban testesítenek meg egy adott funkciót az alakzat geometriája segítségével, de a megkötés alapvetően nem kapcsol össze két különböző funkciót. Tehát az optimalizáláshoz szükséges folyamat a kiinduló struktúra feltérképezésével kezdődik, amely során meg kell határozni, hogy az egyes funkciók igényelnek-e előre megkötött geometriai alakzatot. Az alapvető konstrukciós geometriák létrehozása után meg lehet határozni az esetleges kapcsolatokat, amelyeket halmazszemlélettel ajánlott definiálni.

Az optimalizálandó alkatrészt tekintjük az alaphalmaznak, amelyben részhalmazok foglalnak helyet. A részhalmazok szimbolizálják azokat a konstrukciós geometriákat, amelyek az egyes funkciók közti kapcsolódásokat írják le. A kötött geometriákat a tervező szabadon határozhatja meg. Ez az alkotói szabadság sok esetben irányulhat az esztétika, mint funkció kielégítésére. Az egzakt funkciók kapcsolatát leíró részhalmazok nem rangsorolják az egyes kapcsolatokat, csupán azok megléte a fontos. A funkciók gráf, egyenlet és struktúra mátrix leírásában szereplő logikai kapcsolatok nem korlátozzák a részhalmazok felállítását, csupán segítséget nyújthatnak abban, hogy milyen szegmentálást és csoportosítást hozzanak létre az egyes konstrukciós geometriák. Abban az esetben, amikor két funkcióhoz csatolt alaksajátosságok szorosan kapcsolódnak egymáshoz, esetleg egymáson helyezkednek el, a szétválasztás nem indokolt.

Az új módszer értelmében az összekapcsolódó funkciókat ajánlott azonos tervezési térfogatokba rendezni. Ezek alapján meg lehet határozni, hogy hány részhalmazt célszerű alkalmazni, amelyből új, informatív jellemzőket lehet származtatni egy topológia optimált alkatrészhez. A korlátozásokból fakadó ajánlott jellemző a $g_{(k)}$ generálási kötöttség, amely

százalékos formában megadja a $V_{i(k)}$ konstrukciós terek által megkötött térfogatot a kiinduló V_0 tervezési térfogathoz képest:

$$g_{(k)} = \left[\frac{V_{i(k)}}{V_o} \right] \cdot 100. \quad (24)$$

A másik fontos jellemző a $g_{i(sz)}$ generálási szabadság, amely a $g_{i(k)}$ generálási kötöttség inverze:

$$g_{(sz)} = \left[1 - \frac{V_{i(k)}}{V_o} \right] \cdot 100. \quad (25)$$

A $g_{(sz)}$ generálási szabadság százalékos formában megadja a $V_{i(k)}$ konstrukciós terek által megkötött térfogat függvényében a fennmaradt, a szoftver által szabadon generálható V_0 tervezési térfogatot. A halmazszemlélettel való leírása a H alaphalmaz definiálásával kezdődik, amely egy véges halmaz, argumentumát az összes funkció alkotja:

$$H = \{F_1; F_i; \dots; F_n\}. \quad (26)$$

Következő lépésben a konstrukciós geometriákat leíró részhalmazokat kell definiálni, mint például A halmaz:

$$A \subseteq H. \quad (27)$$

Az A halmaz abban az esetben tekinthető H részhalmazának, ha az A halmaz összes elemét tartalmazza a H halmaz:

$$\forall a \in A : a \in H. \quad (28)$$

Amennyiben,

$$A \neq H \quad (29)$$

és H halmaz tartalmaz legalább egy olyan elemet, amely nem A halmaz eleme, akkor írható, hogy:

$$A \subset H \quad (30)$$

az A halmaz valódi részhalmaza a H alaphalmaznak. Az optimalizálendő alkatrészek módszertani leírásban ennek akkor van szerepe, amikor nem az összes funkció kerül szétosztásra az egyes konstrukciós térfogatokban, hanem fennmaradnak önálló funkciók, amelyek nem kapnak előre meghatározott fix kapcsolatot. Az alaphalmaz, a részhalmazok és a valódi részhalmazok argumentuma egy $\mathbf{X}$ konstrukciós tér kapcsolati mátrix segítségével írható le:

$$\mathbf{X} = \begin{matrix} & F_1 & F_2 & F_3 & F_i & F_n \\ \begin{matrix} H \\ A \\ B \\ C \\ D \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}. \quad (31)$$

Az $\mathbf{X}$ konstrukciós tér kapcsolati mátrix első sora minden esetben az alaphalmaz, amely az alkatrészre vonatkozó teljes tervezési térfogatot testesíti meg. A további sorok az egyes részhalmazokat tartalmazzák, amelyek az egyes konstrukciós geometriákat reprezentálják. A mátrix oszlopain helyezkednek el az alkatrész funkciói. Az egyes mátrix elemek bináris értéket vehetnek fel, amely 1, ha az adott részhalmaz tartalmazza a funkciót, ellenkező esetben 0 értéket képvisel. A (31) mátrix egyes sorait kiemelve létrehozhatók a konstrukciós geometriákra vonatkozó funkció kapcsolati vektorok. Szemléltetés céljából kiemelve a B részhalmaz argumentumát írható, hogy:

$$\mathbf{B} = [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0]. \quad (32)$$

5.2.2. Szimulációs modellalkotási szakasz

A generatív tervezési folyamat szimulációs modellalkotási szakaszában a korábban létrehozott modelleket megfelelő peremfeltételekkel kell ellátni, amely magában foglalja a terheléseket, kényszereket, anyagminőséget, gyártástechnológiát és a tervezési célokat. A peremfeltételek megfelelő definiálása biztosítja a végeselemes analízis sikerességét. A terhelések felvétele során választható adott nagyságú és irányú erő, csapágyterhelést imitáló hengeres felületen megoszló terhelés, felületi nyomás, nyomaték és gyorsulás. Kényszerek definiálásához választható fix, forgó, forgó-haladó és lineáris szabadságfok lekötés. Előállítási mód megválasztását illetően rendelkezésre állnak öntési, forgácsolási és additív gyártástechnológiák. Az eddig felsorolt peremfeltételeket kiegészítik az úgynevezett alak kényszerek, amely segítségével definiálható síkszimmetria, tengelyszimmetria és vektor menti kihúzás az alámetszések elkerülése végett.

5.2.3. Megoldások generálásának szakasza

A generatív tervezési folyamat megoldás generálási szakaszában meg kell határozni a tervezési célokat, hogy az optimalizálás mely paraméter minimumára vagy maximumára törekedjen. A kiválasztható lehetőségek között szerepel a konstrukcióra vonatkozó minimális tömeg, a belső feszültségek minimalizálása, a konstrukció térfogatának minimalizálása és az alakváltozás mértékének a minimalizálása.

A generálási szakasz előtt létrehozott szimulációs modellt az $\mathbf{X}$ konstrukciós tér kapcsolati mátrix segítségével lehet leírni, azonban a szoftver nyújtotta optimáló generálás következtében megváltozik a modell felépítése. Az alakváltozások leírására javasolt új módszer egy $\mathbf{G}$ generált kapcsolati mátrix segítségével definiálja az adott konstrukciót:

$$\mathbf{G} = \begin{matrix} & F_1 & F_2 & F_3 & F_i & F_n \\ \begin{matrix} H \\ A \\ B \\ C \\ D \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ x & 0 & x & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & x \\ x & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}. \quad (33)$$

A $\mathbf{G}$ generált kapcsolati mátrix első sora minden esetben az alaphalmazt tartalmazza, amely az alkatrészre vonatkozó teljes tervezési térfogatot testesíti meg. A további sorok az egyes részhalmazokat tartalmazzák, amelyek ez egyes konstrukciós geometriákat képezik. A mátrix oszlopaiban helyezkednek el az alkatrész funkciói. Az egyes mátrix elemek bináris értéket vehetnek fel, amely x , ha az adott részhalmaz kapott a szoftver által generált kapcsolatot az adott funkcióval, ellenkező esetben 0 értéket képvisel. Az optimált megoldás végső struktúrájának leírása az $\mathbf{M}$ megoldás mátrix alkalmazásával lehetséges, amely:

$$\mathbf{M} = \mathbf{X} + \mathbf{G}. \quad (34)$$

Az $\mathbf{M}$ megoldás mátrix nem más, mint az $\mathbf{X}$ konstrukciós tér kapcsolati mátrix és a $\mathbf{G}$ generált kapcsolati mátrix összege:

$$\mathbf{M} = \begin{matrix} & F_1 & F_2 & F_3 & F_i & F_n \\ \begin{matrix} H \\ A \\ B \\ C \\ D \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} & + & \begin{matrix} & F_1 & F_2 & F_3 & F_i & F_n \\ \begin{matrix} H \\ A \\ B \\ C \\ D \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ x & 0 & x & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & x \\ x & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} & = & \begin{matrix} & F_1 & F_2 & F_3 & F_i & F_n \\ \begin{matrix} H \\ A \\ B \\ C \\ D \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ x & 0 & x & \dots & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & x \\ x & 0 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \end{matrix} \quad (35)$$

Az $\mathbf{M}$ megoldás mátrix a generált megoldások struktúráját írja le, amelyet a funkciók és az egyes konstrukciós térfogatok kapcsolatával jellemez. Az egyes mátrix elemek 0, 1 és x értéket vehetnek fel. Amennyiben egy mátrixelem értéke 1, az adott részhalmaz tartalmazza a funkciót és a kapcsolat előre definiált peremfeltételnek minősül, ellenkező esetben 0 értéket vesz fel. Amennyiben egy mátrix elem x értéket tartalmaz, akkor az egy szoftver által generált funkció és konstrukciós tér kapcsolat. A módszeres tervezési technikák során legtöbb esetben az adott konstrukció funkcióinak kapcsolata kerül kódolásra. Ahhoz, hogy ez megfelelően elvégezhető legyen a generatív tervezési technikával előállított alkatrészek esetén is, bevezettem az $\mathbf{F}_g$ generált funkcióstruktúra mátrixot, amely leírja a funkciók logikai kapcsolatát és megtartja az anyagi kapcsolat megkülönböztetését. A generált megoldásra vonatkozó $\mathbf{M}$ megoldás mátrix alapján felírható az $\mathbf{F}_g$ generált funkcióstruktúra mátrix, amely:

$$\mathbf{F}_g = \begin{matrix} & F_1 & F_2 & F_3 & F_i & F_n \\ \begin{matrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_j \\ F_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & x & \dots & 1 \\ x & 0 & 1 & \dots & x \\ 1 & x & 0 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & 0 & \dots \\ x & 1 & x & \dots & 0 \end{bmatrix} & \cdot & \end{matrix} \quad (36)$$

Az $\mathbf{F}_g$ generált funkcióstruktúra mátrix főátlója 0 elemeket tartalmaz. A mátrix oszlopait és sorait a generált alkatrészt felépítő funkciók képezik. Az egyes mátrix elemek 0, 1 és x értéket vehetnek fel. Ha az érték 1, akkor az adott sorhoz és oszlophoz tartozó funkciók között előre megadott

anyagkapcsolat van. Amennyiben egy mátrix elem x értéket képvisel, akkor az adott sorhoz és oszlophoz tartozó funkciópáros között a szoftver által generált anyagkapcsolat jött létre. Egy mátrixelem 0 értéket képvisel, ha az adott funkciópáros között nincs közvetlen anyagi kapcsolat.

5.2.4. Értékelési szakasz

A generált megoldásokat nagymértékű alaki sokféleség jellemzi, amely részben pozitív tulajdonság, hiszen egy adott probléma esetén sokféle megoldáshoz juthatunk hozzá, azonban a megoldáshalmaz változatossága miatt az értékelési szakaszban végzendő összehasonlítás egyre nehezebb objektív szempontok és mérőszámok alapján. Ezen munkafázis megkönnyítésére vezettem be a γ_i generáltsági fok fogalmát, amely megmutatja, hogy a kötött konstrukciós térfogatokhoz képest milyen arányban van a szoftver által létrehozott anyagmennyiség. Az eredményt az i -edik megoldásra vonatkozó $V_{i(ga)}$ generált anyag és a $V_{i(k)}$ konstrukciós terek térfogathányada adja meg százalékos formában:

$$\gamma_i = \left[\frac{V_{i(ga)}}{V_{i(k)}} \right] \cdot 100. \quad (37)$$

A megoldások sokféleségéből adódóan az egyes konstrukciók eltérő teherbírással rendelkeznek. A generálási szakaszban szükséges megadni egy σ_{meg} feszültségértéket, amely során a felhasznált alapanyag folyáshatárát vesszük alapul:

$$\sigma_{meg} = \frac{R_{p0,2}}{b}. \quad (38)$$

Az eddigi tapasztalatok azt mutatják, hogy a generált megoldások belső feszültség maximuma nem éri el az előre beállított σ_{meg} feszültségértéket, amelynek oka, vélhetően a gyárthatósági kötöttségekben keresendő. Azonban a két érték közötti eltérés fontos jellemző, ezért bevezettem a $b_{i(r)}$ relatív biztonsági tényező fogalmát, amely segítségével objektív módon lehet összehasonlítani az egyes megoldások teherbírását:

$$\sigma_{i(max)} = \frac{\sigma_{meg}}{b_{i(r)}}, \quad (39)$$

$$b_{i(r)} = \frac{\sigma_{meg}}{\sigma_{i(max)}} \geq 1. \quad (40)$$

A $b_{i(r)}$ relatív biztonsági tényező megmutatja a generálás előtt megadott σ_{meg} megengedett feszültségérték és az i -edik generált megoldás $\sigma_{i(max)}$ maximális feszültség különbségét, amely megmutatja, hogy mekkora tartalék van a rendszerben. A (39) és (40) értelmében bevezettem az i -edik konstrukcióra vonatkozó $b_{i(v)}$ valós biztonsági tényezőt, amelyben a belső feszültségérték maximumát az alapanyag folyáshatárához viszonyítom:

$$b_{i(v)} = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_{i(max)}}. \quad (41)$$

6. ESETTANULMÁNY A SZERSZÁMGÉPTERVEZÉS TERÜLETÉN

Figyelembe véve egy műszaki berendezés vagy termék teljes életciklusát, kijelenthető, hogy a tömegcsökkentett alkatrészek felhasználása műszaki és gazdasági szempontok alapján javuló eredményeket hozhat. A jelenkor tervezési és fejlesztési folyamataiba integrálódott optimalizációs és szimulációs tevékenységek alkalmazása felelősségteljes mérnöki tevékenység, amely jelentős anyagi költségekkel járhat egy-egy tervezési vagy fejlesztési folyamatban. Fontos előre látni, hogy az optimalizáló tevékenységeknek a folyamatba illesztése arányaiban szolgáltatja-e azokat a műszaki és gazdasági sikereket, amelyek a befektetett erőforrások alapján elvárhatók. Az iparban ezen kérdéskörök megválaszolására használatos az úgynevezett ROI mutató, amely egy mozaikszó, mely az angol *Return on Investment* kifejezésből származik, magyar jelentése a befektetésarányos megtérülés. A mutató egy egységnyi befektetés megtérüléséről nyújt információt és segítségével megállapítható, hogy egy adott befektetés, milyen hatékonysággal bír. Ezen kérdéskörök létjogosultságát és fontosságát az is bizonyítja, hogy a témához kapcsolódóan többen is végeztek kutatásokat, amelyeket publikáltak is [138] - [141].

A különféle részegységek és alkatrészek tömegcsökkentésének elsődleges célja a felhasznált alapanyagköltség csökkentése. A mozgó alkatrészek tömegének csökkentése az alapanyag árakon túl a működtetéshez szükséges energiafelhasználás terén jelenthet kedvezőbb feltételeket. A gyártóeszközök terén egyre nagyobb törekvés a környezetbarát üzemeltetés, amit a berendezés működéséhez szükséges energiaigény jelentősen befolyásol. A CNC megmunkáló központok magas automatizáltságát az eredményezi, hogy a szerszámtár és a szerszámcsereelő egység alkalmazásával egy felfogásban több megmunkálási műveletet képesek elvégezni különböző szerszámokkal.

Az esettanulmányt és a hozzá kapcsolódó tervezésmódszertani vizsgálatokat egy nagy méretű fúró-maró megmunkáló központ szerszámellátó rendszerén fogom elvégezni.

6.1. Hagyományos módszerrel tervezett szerszámcsereelő

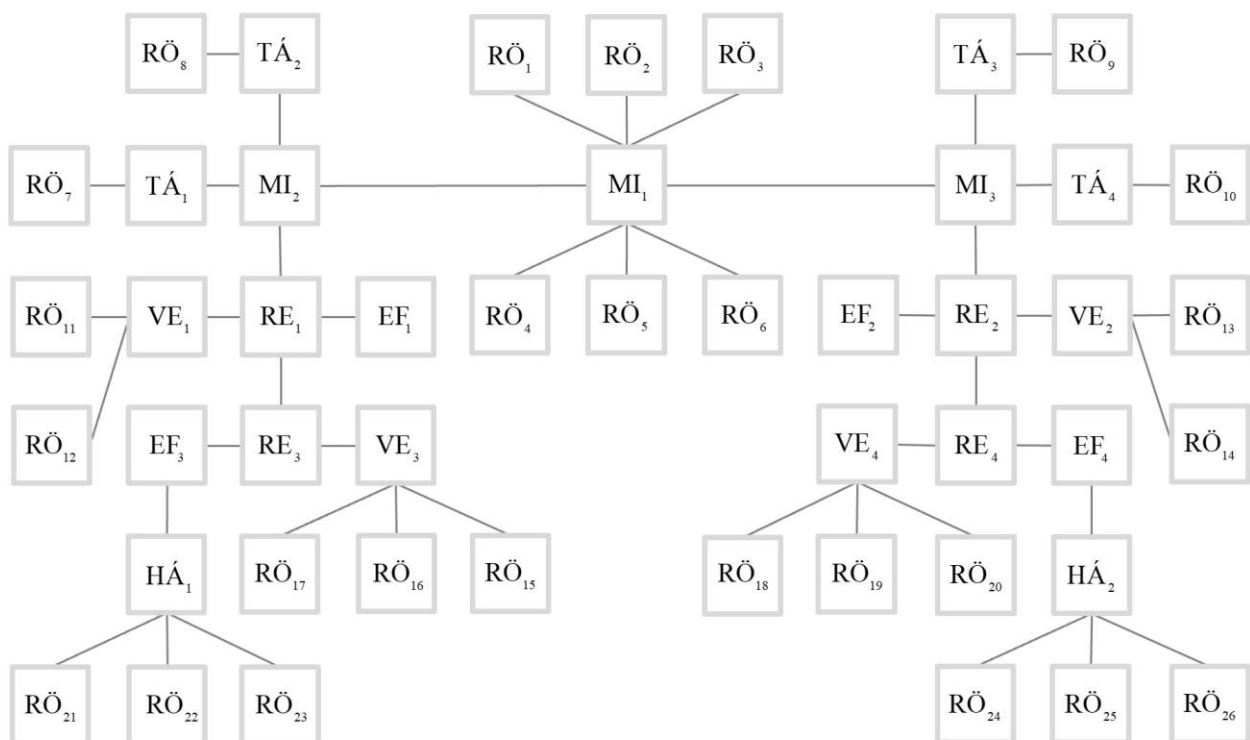
Tervezés szempontjából a korszerű szerszámgépek főegységekre, részegységekre azok pedig alkatrészeire bonthatók. Ezeken a csoportokon belül különbséget lehet tenni a kereskedelmi forgalomban kapható egységek és a szerszámgépgyártó cég által tervezett egyedi egységek és alkotóelemek között. A főegységek között nem húzható éles határvonal, inkább százalékosan definiálható, hogy milyen mértékű a szabványos és az egyedi tervezésű alkatrészek aránya.

A szerszámellátó rendszerek két fő szerkezeti egysége a tároló és a szerszámcsereelő mechanizmus. Kialakítását tekintve megkülönböztethető a dobtáras, az ernyőtáras és a lánc táras kivitel. A továbbiakban a disszertáció a legelterjedtebb kivitelnek tekinthető dobtáras szerkezettel foglalkozik, melynek elengedhetetlen részegysége a csereelő kar, amely általában ikerkaros kialakítású.

A szerszámellátó egység sokkal nagyobb mértékben tartalmaz kereskedelmi tételeket, mint egyedi alkatrészeket. A mozgatásért felelős kinematikai lánc kereskedelmi forgalomban megvásárolható egységekből épül fel, amely magába foglalja a szerszámtár és cserélőkar meghajtását is. A szerszámváltó kar egyedi tervezésű alkatrésznek minősül, amely megadott tengelytávolságban megfelelő csatlakozó felületeket biztosít a szabványos szerszámbe fogók számára. Egy csereperiódus alkalmával ez az alkatrész teremt fizikai kapcsolatot az orsó és a szerszámtár között. Sok esetben egy szerszámellátó rendszer gépcsaldokon belül több gépbe is integrálható vagy utólagosan beszerelhető, amely lehetőséget a szerszámváltó kar egyedi tervezése biztosítja. A CAD modell felépítéséhez szükség van a termék koncepció ismeretére.

Az alkatrész tervezésére vonatkozó peremfeltételek alapján a szerszámbe fogó típusa „HSK-A 100” és a két szerszámtengely közötti távolság 400 mm. Ehhez a kialakításhoz mechanikus működtetésű csapos reteszelő egység tartozik, amely az egyik legelterjedtebb megoldásnak tekinthető. A piackutatás során számos megmunkáló központ került elemzésre, melyek közül legjelentősebbek a JOHN FORD VMC 1000A, KITAMURA M4XD, KURAKI KV-700, MATSUURA RA-1G VMC, MAZAK H-500, MITSUBISHI M-V5CNL, MORI SEIKI MV-JR, OKUMA MC-40VB és a SUPERMAX MAX7.

A módszeres géptervezés szemléletei és lépései alapján egy funkcióstruktúra felállítása szükséges, amelyben az egyes funkciók logikai kapcsolata leírja a modellezni kívánt szerkezetet.



14. ábra. A szerszámcserélő kar funkcióstruktúrája

A 14. ábra mutatja be a szerszámcserélő kar gráf típusú funkcióstruktúráját, amely megértését az 5. táblázatban látható jelmagyarázat segíti.

A funkcióanalízis során olyan funkciókat kell feltárni, amelyek valamilyen egyedi geometriai adottságot követelnek meg az alaptesten, hiszen az alkatrész komplexitását és végső kialakítását a funkciók és azok geometriai igényei határozzák meg. Az alkatrész funkcióit tekintve a mechanikus interfész elemek jellemzően alakos csatlakozó felületeket, a vezető funkciók hengeres palástfelületet, az előfeszítés homlokfelületet és a rögzítési funkciók pedig menettel ellátott furatokat igényelnek.

A funkciókra vonatkozó gráf jellegű leírásmód átalakítható struktúra egyenletté, amely az egyes funkciók közötti kapcsolatra fókuszál és írja le azokat:

$$F_1 - F_2, F_i - F_n, F_j - F_n. \quad (42)$$

A struktúra egyenlet a struktúra gráf éleit határozza meg, tehát azokat az F funkció kapcsolatokat írja le, amely a valós alkatrészen létező kapcsolatokat képviselnek. A szerszámváltó kar konstrukciójára vonatkozó struktúraegyenlet az alábbiak szerint írható le:

$$\begin{aligned} & MI_1 - R\ddot{O}_1, MI_1 - R\ddot{O}_2, MI_1 - R\ddot{O}_3, MI_1 - R\ddot{O}_4, MI_1 - R\ddot{O}_5, MI_1 - R\ddot{O}_6, \\ & MI_1 - MI_2, MI_2 - T\acute{A}_1, MI_2 - T\acute{A}_2, T\acute{A}_1 - R\ddot{O}_7, T\acute{A}_2 - R\ddot{O}_8, MI_2 - RE_1, \\ & RE_1 - EF_1, RE_1 - VE_1, VE_1 - R\ddot{O}_{11}, VE_1 - R\ddot{O}_{12}, RE_1 - RE_3, RE_3 - VE_3, \\ & VE_3 - R\ddot{O}_{15}, VE_3 - R\ddot{O}_{16}, VE_3 - R\ddot{O}_{17}, RE_3 - EF_3, EF_3 - H\acute{A}_1, H\acute{A}_1 - R\ddot{O}_{21}, \\ & H\acute{A}_1 - R\ddot{O}_{22}, H\acute{A}_1 - R\ddot{O}_{23}, MI_1 - MI_3, MI_3 - T\acute{A}_3, MI_3 - T\acute{A}_4, T\acute{A}_3 - R\ddot{O}_9, \\ & T\acute{A}_3 - R\ddot{O}_{10}, MI_3 - RE_2, RE_2 - EF_2, RE_2 - VE_2, VE_2 - R\ddot{O}_{13}, VE_2 - R\ddot{O}_{14}, \\ & RE_2 - RE_4, RE_4 - VE_4, VE_4 - R\ddot{O}_{18}, VE_4 - R\ddot{O}_{19}, VE_4 - R\ddot{O}_{20}, RE_4 - EF_4, \\ & EF_4 - H\acute{A}_2, H\acute{A}_2 - R\ddot{O}_{24}, H\acute{A}_2 - R\ddot{O}_{25}, H\acute{A}_2 - R\ddot{O}_{26}. \end{aligned} \quad (43)$$

Az egyenleten alapuló funkcióanalízist felválthatja a $\mathbf{F}$ struktúra mátrix bevezetése, amelynek sorait és oszlopait az egyes F funkciók alkotják:

$$\mathbf{F} = \begin{matrix} & F_1 & F_2 & F_3 & F_i & F_n \\ \begin{matrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_j \\ F_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & f_{12} & f_{13} & \dots & f_{1n} \\ f_{21} & 0 & f_{23} & \dots & f_{2n} \\ f_{31} & f_{32} & 0 & \dots & f_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & 0 & \dots \\ f_{n1} & f_{n2} & f_{n3} & \dots & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad (44)$$

$$F := (f_{ij})_{n \times n}. \quad (45)$$

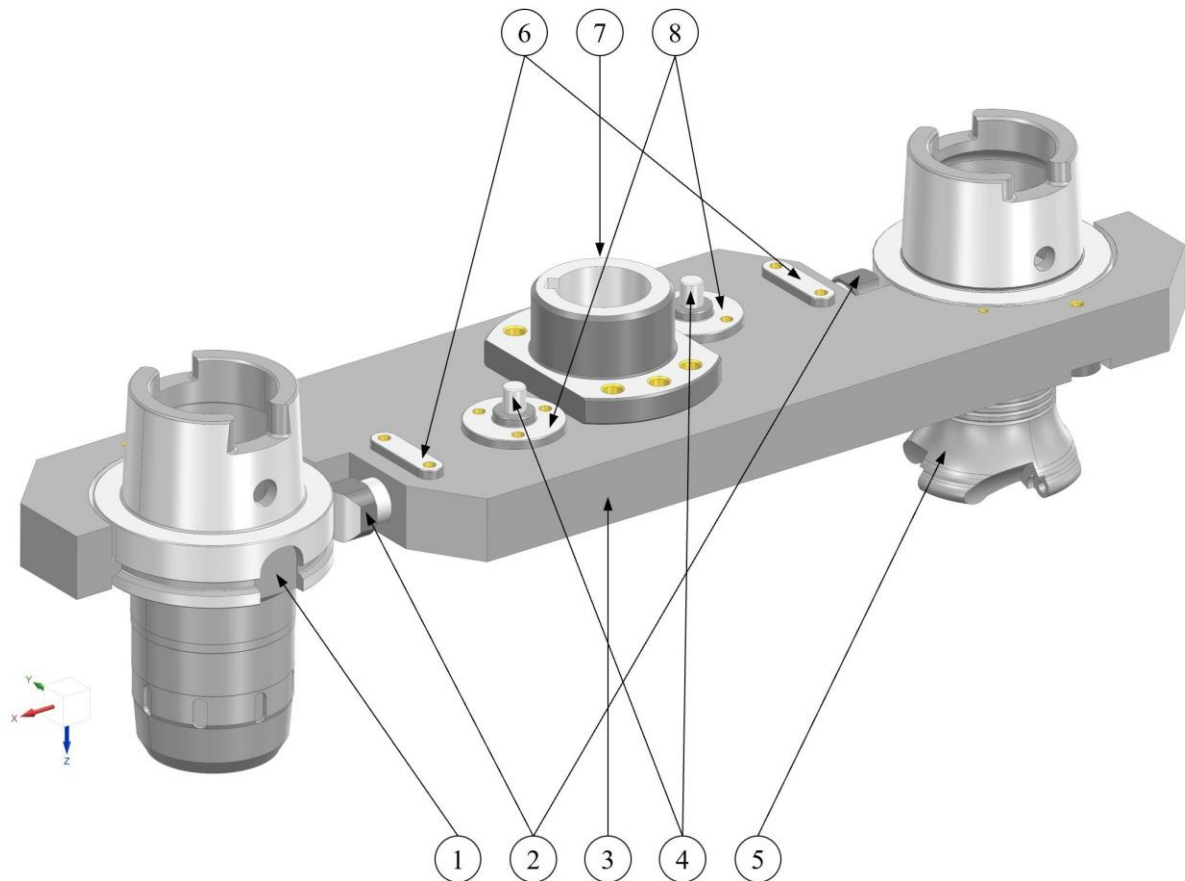
A mátrix bináris felépítésű, így az egyes mátrix elemek 0 vagy 1 értéket vehetnek fel. A továbbiakban a 14. ábrán és a (43) -ban feltüntetett funkciókat jellemzi az 5. táblázat.

5. táblázat. A szerszámcserélő kar funkciói

<i>Jel</i>	<i>Megnevezés</i>	<i>A funkció feladata</i>
MI ₁	Mechanikus interfész felület	Csatlakozó felület biztosítása a szerszámcserélő kar és a mozgó tengely között.
RÖ ₁	Rögzítés	Rögzítési pont biztosítása a mozgó tengely számára menetes furat segítségével.
RÖ ₂	Rögzítés	Rögzítési pont biztosítása a mozgó tengely számára menetes furat segítségével.
RÖ ₃	Rögzítés	Rögzítési pont biztosítása a mozgó tengely számára menetes furat segítségével.
RÖ ₄	Rögzítés	Rögzítési pont biztosítása a mozgó tengely számára menetes furat segítségével.
RÖ ₅	Rögzítés	Rögzítési pont biztosítása a mozgó tengely számára menetes furat segítségével.
RÖ ₆	Rögzítés	Rögzítési pont biztosítása a mozgó tengely számára menetes furat segítségével.
MI ₂	Mechanikus interfész felület	Csatlakozó felület biztosítása a szerszámcserélő kar és a szerszámbefogó között.
MI ₃	Mechanikus interfész felület	Csatlakozó felület biztosítása a szerszámcserélő kar és a szerszámbefogó között.
TÁ ₁	Tájolás	A megragadott szerszámbefogó tájolása.
TÁ ₂	Tájolás	A megragadott szerszámbefogó tájolása.
TÁ ₃	Tájolás	A megragadott szerszámbefogó tájolása.
TÁ ₄	Tájolás	A megragadott szerszámbefogó tájolása.
RÖ ₇	Rögzítés	Rögzítési pont biztosítása TÁ ₁ számára menetes furat segítségével.
RÖ ₈	Rögzítés	Rögzítési pont biztosítása TÁ ₂ számára menetes furat segítségével.
RÖ ₉	Rögzítés	Rögzítési pont biztosítása TÁ ₃ számára menetes furat segítségével.
RÖ ₁₀	Rögzítés	Rögzítési pont biztosítása TÁ ₄ számára menetes furat segítségével.
RE ₁	Reteszelés	A szerszámbefogó reteszelve a MI ₂ mechanikus interfész felületen.
RE ₂	Reteszelés	A szerszámbefogó reteszelve a MI ₃ mechanikus interfész felületen.
EF ₁	Előfeszítés	RE ₁ reteszelő mechanika előfeszítése.

EF_2	<i>Előfeszítés</i>	RE_2 reteszelő mechanika előfeszítése.
VE_1	<i>Vezetés</i>	RE_1 reteszelő mechanika megvezetése.
$RÖ_{11}$	<i>Rögzítés</i>	Rögzítési pont biztosítása VE_1 számára menetes furat segítségével.
$RÖ_{12}$	<i>Rögzítés</i>	Rögzítési pont biztosítása VE_1 számára menetes furat segítségével.
VE_2	<i>Vezetés</i>	RE_2 reteszelő mechanika megvezetése.
$RÖ_{13}$	<i>Rögzítés</i>	Rögzítési pont biztosítása VE_2 számára menetes furat segítségével.
$RÖ_{14}$	<i>Rögzítés</i>	Rögzítési pont biztosítása VE_2 számára menetes furat segítségével.
RE_3	<i>Reteszelés</i>	RE_1 mechanika reteszelése.
RE_4	<i>Reteszelés</i>	RE_2 mechanika reteszelése.
VE_3	<i>Vezetés</i>	RE_3 reteszelő mechanika megvezetése.
$RÖ_{15}$	<i>Rögzítés</i>	Rögzítési pont biztosítása VE_3 számára menetes furat segítségével.
$RÖ_{16}$	<i>Rögzítés</i>	Rögzítési pont biztosítása VE_3 számára menetes furat segítségével.
$RÖ_{17}$	<i>Rögzítés</i>	Rögzítési pont biztosítása VE_3 számára menetes furat segítségével.
VE_4	<i>Vezetés</i>	RE_4 reteszelő mechanika megvezetése.
$RÖ_{18}$	<i>Rögzítés</i>	Rögzítési pont biztosítása VE_4 számára menetes furat segítségével.
$RÖ_{19}$	<i>Rögzítés</i>	Rögzítési pont biztosítása VE_4 számára menetes furat segítségével.
$RÖ_{20}$	<i>Rögzítés</i>	Rögzítési pont biztosítása VE_4 számára menetes furat segítségével.
EF_3	<i>Előfeszítés</i>	RE_3 mechanika előfeszítése.
EF_4	<i>Előfeszítés</i>	RE_4 mechanika előfeszítése.
$HÁ_1$	<i>Ház</i>	EF_3 elem burkolata.
$RÖ_{21}$	<i>Rögzítés</i>	Rögzítési pont biztosítása $HÁ_1$ számára menetes furat segítségével.

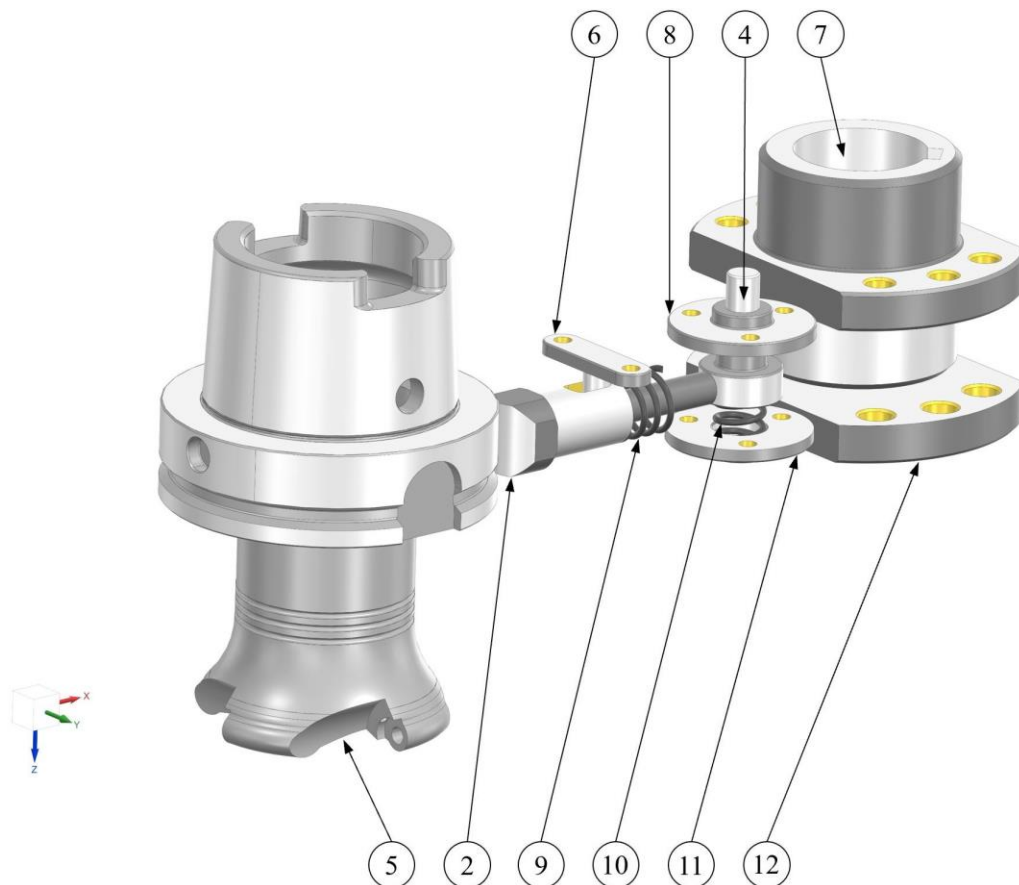
$RÖ_{22}$	<i>Rögzítés</i>	<i>Rögzítési pont biztosítása $HÁ_1$ számára menetes furat segítségével.</i>
$RÖ_{23}$	<i>Rögzítés</i>	<i>Rögzítési pont biztosítása $HÁ_1$ számára menetes furat segítségével.</i>
$HÁ_2$	<i>Ház</i>	<i>EF₄ elem burkolata.</i>
$RÖ_{24}$	<i>Rögzítés</i>	<i>Rögzítési pont biztosítása $HÁ_2$ számára menetes furat segítségével.</i>
$RÖ_{25}$	<i>Rögzítés</i>	<i>Rögzítési pont biztosítása $HÁ_2$ számára menetes furat segítségével.</i>
$RÖ_{26}$	<i>Rögzítés</i>	<i>Rögzítési pont biztosítása $HÁ_2$ számára menetes furat segítségével.</i>



15. ábra. A szerszámcsereelő kar összeállítási modellje

A 15. ábrán a szerszámcsereelő kar CAD modellje látható, amely a piackutatás és a funkcióanalízis elvégzése után az NX 2406 szoftverben készült el. A szerszámváltó kar (3) meglehetősen egyszerű, síklapokkal tagolt. Az alkatrész részleteit tekintve olyan felületeket tartalmaz, amelyek a beépült funkciókat kiszolgálják. Ezek jellemzően csatlakozó felületek és rögzítési pontok. Az alkatrésznek nincs szimmetriatengelye és szimmetriasíkja, az

alkaksajátosságok egy félköríves körkiosztással képezhetők le. A forgatónyomatékokat egy behajtótengely biztosítja, amely reteszkötéssel viszi át a kellő nyomatékokat a hajtóagy számára (7). A szerszámváltó kar és a hajtóagy csavarkötéssel rögzül egymáshoz. Az axiális rögzítést egy ellenoldali lemez (12) és csavarkötés biztosítja. A gyakorlatban ez a fajta kialakítás alkalmazott, mert így lehet megvalósítani a megfelelő méretű reteszkötést. A megoldás másik előnye, hogy a karon lévő csatlakozó felületek megváltoztatása nélkül is lehet másik mozgató egységet alkalmazni.

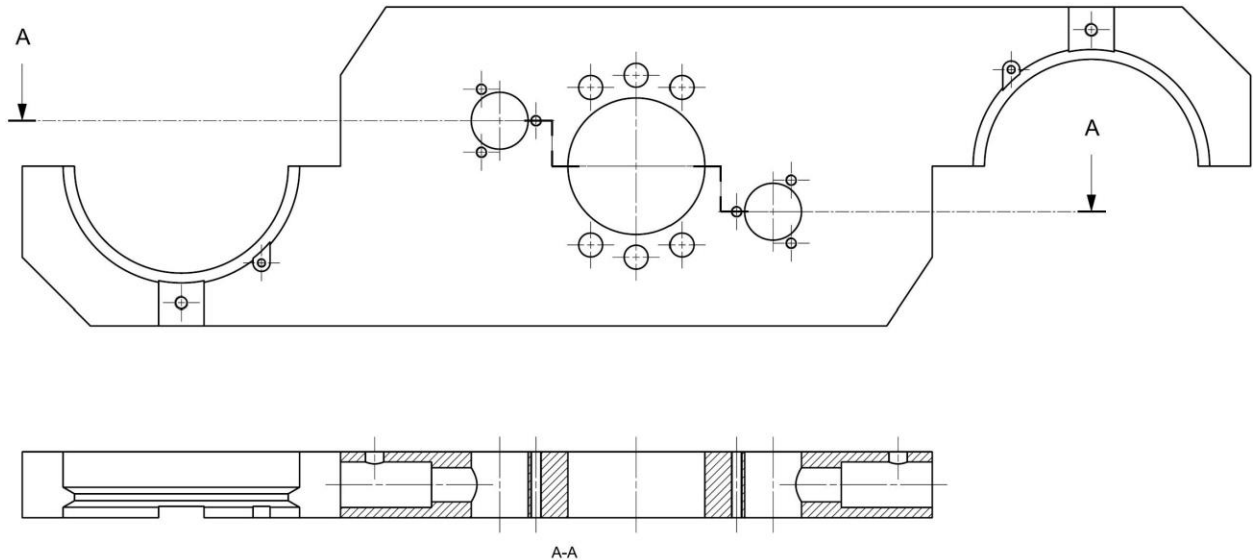


16. ábra. A szerszámbe fogók rögzítő mechanikája

A beváltandó (1) és leváltandó (5) szerszámok csereperiódusának legfontosabb tényezői a gyors és pontos működés. A mozgatókarra ható dinamikai hatások miatt fontos a szerszámbe fogók megfelelő rögzítése. A 16. ábra ezen funkció mechanikáját mutatja be.

A mechanizmus egy radiális (2) és egy axiális (4) irányú reteszelő csapból áll, amelyek rugós előfeszítéssel (9,10) rendelkeznek. A radiális csapot a szerszámbe fogó külső palástfelülete működteti rugóerő ellenében, azonban az csak akkor mozgítható, ha az axiális irányú csap is nyitott helyzetben van. Az axiális helyzetű reteszelő elem működtetése a hajtótengely pozíciójától függ, ugyanis egy csereperiódus alkalmával az orsóból és a tárból való szerszámkiemelés vagy orsóba és tárba való befogás esetén tengelyirányú mozgás szükséges. Ez a mozgás ütközős vezérlést biztosít a reteszelőcsap számára, ezáltal a szerszámbe fogók mindaddig rögzített állapotban helyezkednek el a karban, ameddig be nem kerülnek az orsóba vagy a tárba. A csapok megfelelő

megvezetést igényelnek. A radiális helyzetű elem egyenes vonalú mozgása korlátozott, amely intervallumát egy reteszhoronyban megvezetett menesztőcsap (6) biztosítja. Konstruktív és gyárthatósági okok miatt, az axiális csap vezetőpersellyel (8) és nyomólappal (11) van ellátva.



17. ábra. A klasszikus módszerekkel tervezett szerszámváltó kar 3D-s modellje

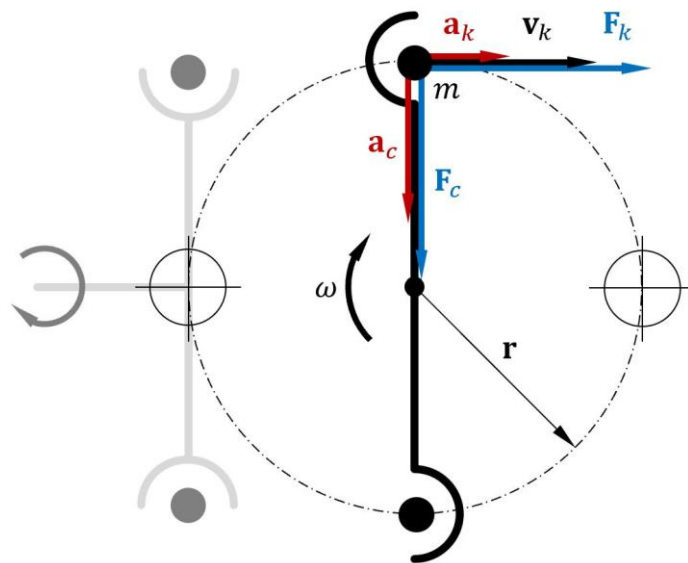
A 17. ábra a szerszámváltó kar 3D-s testmodelljét mutatja be. A befoglaló méret hosszúság, szélesség és magasság sorrendben 540 mm, 140 mm és 29 mm.

Az alkatrész alapanyaga az EN 10083 szabványú DIN 1.0503 C45 közepes széntartalmú, nagy szilárdságú acél, amerikai szabvány alapján AISI 1045. Az alapanyag sűrűsége $\rho = 7,85 \text{ g/cm}^3$, jellemző mechanikai tulajdonságai alapján a folyáshatár $R_{p0,2} = 340 \text{ MPa}$, a szakítószilárdság $R_m = 630 \text{ MPa}$ és a nyúlás $A = 16 \%$. Az anyag rugalmassági modulusa $E = 206 \text{ GPa}$ és a Poisson-tényezője $\nu = 0,3$. Csúsztató rugalmassági modulusa $G = 80 \text{ GPa}$. A konstrukció tömege $m_o = 9,265 \text{ kg}$. Az alkatrészen a hajtó tengely és a hajtóagy mechanikus interfész felületeit a központi furat és a körülötte kiosztott furatok képezik. A nagy furat palást és mindkét oldali homlokfelülete illesztő felület, a sárga színnel jelölt kisebb méretű furatok rögzítési funkciót látnak el. A szerszámbefogók számára szabványos, félköríves kúpos felületek alkotják a kontakt felületeket, amelyeket kiegészítenek tájoló és rögzítő elemek. A tájoló alkatrészeket csavarkötéssel rögzítik, amelyhez megfelelő méretű menetes furat szükséges. Ezek a tájoló és menesztő elemek nyitott zsebekben helyezkednek el, hogy a megfelelő pozíció garantált legyen.

A szerszámbefogó mechanika jellemzően egymásra merőleges hengeres felületeket igényel, amelyeket rögzítés céljából menetes furatok egészítenek ki. A beépülő funkciók által megkövetelt csatlakozó felületeken kívül a szerszámváltó kart síklapú felületek határolják. Az alkatrész topológiai optimalizálása és generatív tervezése előtt célszerű a jelenlegi konstrukciót végeelemes analízis segítségével elemezni, hogy fény derüljön az üzemi körülmények között fellépő terhelések okozta belső feszültségekre és deformációkra.

6.2. Mechanikai modellalkotás

A feladat elvégzéséhez ismerni kell az esettanulmányban szereplő alkatrészeire ható erők nagyságát és azok irányát, valamint a komplex terhelési állapotot, amely egy mechanikai modell megalkotásával határozható meg. A terhelések meghatározása továbbá azt a célt szolgálhatja, hogy a végeselemes analízis során egy időben változó, nem lineáris probléma helyett egy stacionárius állapot feltételezése esetén a szilárdságtani vizsgálatok jó közelítéssel elvégezhetők, amely jelentősen csökkentheti a célszoftver számítási igényét, ezáltal gyorsítva a numerikus megoldást és ellenőrzést.



18. ábra. A dobtáras szerszámellátó egység elvi vázlata

A 18. ábrán látható a dobtáras szerszámellátó egység egyszerűsített vázlata, amely bemutatja a mozgás közben fellépő terheléseket. A kar egy szerszámváltás során saját tengelye körül forgó és axiális mozgást végez. A mechanizmusnak egyszerre kell megfogni majd rögzíteni a tárban és az orsóban lévő szerszámot.

A szerszámbe fogó megfelelő tájolással foglal helyet a fészekben, amelyet radiális irányban egy reteszelő mechanizmus rögzít, meggátolva a szerszám kiesését. A reteszelést követően a kar forgástengelyén működő axiális elmozdulás segítségével kiemelődnek a szerszámok és egy fél fordulattal a helyzetük megcserélődik, majd az ellentétes tengelyirányú mozgás következtében a beváltott szerszám helyet foglal az orsó kúpban, a leváltott szerszám pedig a tárban.

A konstrukcióra vonatkozó tervezési peremfeltételek meghatározzák a szerszámcsere lő kar jellemző méreteit azáltal, hogy a befogott szerszámok közti távolság értéke $L = 400 \text{ mm}$. A szerszám gép „HSK-A 100” típusú szabványos szerszámbe fogóval kompatibilis, ezért a szerszámcsere lő egységet is erre a méretkategóriára kell tervezni. A szerszámbe fogó típusa meghatározza a szabványos csatlakozófelületeket, azonban a további geometriai kialakítások és méretek jellemzően a befogott szerszámok típusától és méretétől függenek.

A szerszámok és hozzájuk tartozó befogók sokféleségéből adódóan a szerszámgépgyártók a maximális gépbe fogható szerszámtömeget adják meg, amelyet a szerszámellátó egység kezelni tud. Az esettanulmány vonatkozásában a maximális tömeg mértéke 18 kg . A valóságot egy idealizált modell segítségével lehet megközelíteni, amelyben a szerszámbefogót és a szerszámot egy tömegpont helyettesíti, ami egy állandó $r = L/2$ sugarú körpályán egyenletesen gyorsuló és lassuló mozgást végez. A tömegpontok gyorsításából és lassításából fakadó tehetetlenségi erők az egyes kontakt felületeken hatnak. A szerszámcsereelő karon ébredő ellenerek jó közelítéssel meghatározhatók a klasszikus mechanika és dinamika összefüggéseivel, amelyet célszerű virtuális környezetben egy iCAD rendszerbe integrált végelem analízissel ellenőrizni és pontosítani.

A szerszámváltó kar kinematikai leírását a rendeltetésszerű működés időszükségletének meghatározásával kell kezdeni, amely egy csereperiódusra vonatkozik. Ez a paraméter egy új konstrukció megalkotásakor peremfeltételnek minősül, amely értékének megválasztása függhet piaci verseny esetén a konkurens termékek tulajdonságaitól vagy műszaki paraméterek esetén a kiválasztott működtető egység teljesítményétől. A disszertációban előre meghatározott időszávokkal dolgozom, amelyet a 19. ábra jellemez.



19. ábra. A szerszámváltó kar mozgásviszonya egy csereperiódus alkalmával

A 19. ábrán látható a szerszámcsereelő kar szögsebesség és idő függvényére vonatkozó grafikon, amelyen jól látható, hogy egy csereperiódus időszükséglete $1,2\text{ s}$. A grafikon három szakaszra bontható. Az első $0 - 0,1\text{ s}$ a gyorsító szakasz, ahol a szöggyorsulás értéke pozitív, a $0,1 - 1,1\text{ s}$ tartomány egyenletes körmozgás, ahol a kerületi sebesség állandó. A harmadik $1,1 - 1,2\text{ s}$ tartomány a lassulási szakasz, ahol a szöggyorsulás értéke negatív. Tekintettel a dinamikai hatásokra a mozgásviszonynak megfelelően a testre ható maximális terhelőerőket kell figyelembe venni. A mechanizmus kinematikai tulajdonságai alapján visszavezethető az egyenletes körmozgásra, ahol a mozgó tömegpont sebessége:

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{s}}{dt} = \mathbf{r} \frac{d\varphi}{dt} = \mathbf{r} \omega, \quad \text{ahol: } \frac{d\varphi}{dt} = \omega = \text{állandó.} \quad (46)$$

Adott egy körpályán mozgó tömegpont $\mathbf{v}_1$ és $\mathbf{v}_2$ kerületi sebesség vektora, amely között $d\varphi$ szög helyezkedik el. A két vektor között az alábbi összefüggés írható fel:

$$\mathbf{v}_2 = \mathbf{v}_1 + d\mathbf{v}. \quad (47)$$

Mivel $d\varphi$ szöge érték differenciálisan kicsi, ezért $d\mathbf{v}$ hossza megegyezik az ívdarab hosszával ezért írható, hogy:

$$d\mathbf{v} = \mathbf{v}_1 \cdot d\varphi = \mathbf{r} \cdot \omega \cdot d\varphi. \quad (48)$$

A sebesség időbeni változása a centripetális gyorsulás, amely:

$$\mathbf{a}_c = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{r} \cdot \omega \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \mathbf{r} \cdot \omega^2. \quad (49)$$

A gyorsulás iránya megegyezik a $d\mathbf{v}$ sebességváltozás vektorának irányával, tehát ha $d\varphi$ szög kellően kicsi, akkor $d\mathbf{v}$ gyakorlatilag merőleges a kerületi sebesség irányára és a körpálya középpontjába mutat. Ezek alapján meghatározható az $\mathbf{F}_c$ centripetális erő, amely a test körpályán tartásához szükséges:

$$\mathbf{F}_c = m \cdot \mathbf{a}_c = m \cdot \mathbf{r} \cdot \omega^2 = m \cdot \frac{\mathbf{v}^2}{\mathbf{r}}. \quad (50)$$

Amennyiben ω nem állandó, hanem az idő függvényében folyamatosan változik, akkor egyenletesen gyorsuló vagy egyenletesen lassuló mozgás feltételezhető, így:

$$\frac{d\omega}{dt} = \text{állandó}. \quad (51)$$

Ez az állandó érték a β szöggyorsulás, amely:

$$\beta = \frac{d\omega}{dt}. \quad (52)$$

Az egyenletesen gyorsuló vagy lassuló körmozgás esetén bevezethető a kerületi gyorsulás fogalma, amely:

$$\mathbf{a}_k = \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{r} \frac{d\omega}{dt} = \mathbf{r} \cdot \beta. \quad (53)$$

Meghatározva azt az érintő irányú erőt, amely a kerületi gyorsulást előidézi írható, hogy:

$$\mathbf{F}_k = m \cdot \mathbf{a}_k = m \cdot \mathbf{r} \cdot \beta. \quad (54)$$

A test körpályán való gyorsításáért felelős $\mathbf{F}_k$ erőnek a diagram első és harmadik szakaszában van maximuma, azonban irányuk ellentétes egymással, attól függően, hogy gyorsítást vagy lassítást végeznek.

A továbbiak során megkülönböztetés céljából bevezetésre kerül F_{gy} gyorsító erő, amelynek nagysága és iránya megegyezik F_k erővel és F_l lassító erő, amelynek nagysága megegyezik az F_k erővel, de ellentétes irányba hat. A v_k kerületi sebesség az egyenletes körmozgás szakaszában éri el a maximális értékét, ezért ezen a szakaszon ébred az F_c centripetális erő maximális értéke. A mozgás során fellépő dinamikai hatásokat egyszerűsítés céljából időben állandó, statikus terhelésekkel helyettesítem, amelynek célja, kifejezetten a karra ható erők vizsgálata. A modell több ponton egyszerűsítést igényel, ezért csak azoknak az alkatrészeknek vizsgálom dinamikai hatását, amelyek kontakt mezővel rendelkeznek a szerszámváltó karral, de nincs közöttük merev kapcsolat. A terhelések analitikus megoldásában vannak konstans paraméterek, amelyek minden vizsgált test esetén azonosak, mint például a gyorsító és lassító szakaszban érvényes szöggyorsulás, amelynek értéke a (52) alapján $\beta = 31,415 \text{ 1/s}^2$ és az egyenletes körmozgás szakaszában érvényes szögsebesség, amelynek értéke $\omega = 3,1415 \text{ 1/s}^2$. A továbbiakban táblázatos formában kerülnek bemutatásra az egyes komponensek által közölt erők.

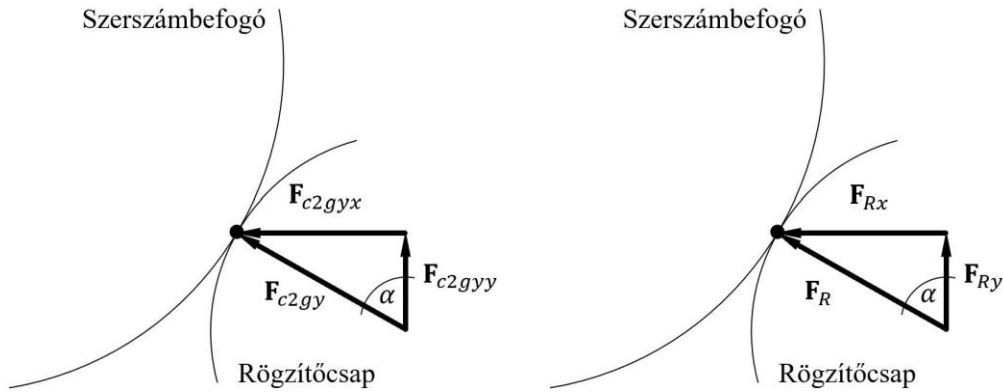
6. táblázat. A forgó mozgást végző komponensek által közölt erők

<i>Komponens</i>	<i>Tömeg [kg]</i>	<i>Helyvektor [m]</i>	<i>Centripetális erő [N]</i>	<i>Kerületi erő [N]</i>
<i>Szerszámbefogó</i>	<i>18</i>	<i>0,2</i>	<i>35,53</i>	<i>113,09</i>
<i>Radiális helyzetű csap</i>	<i>0,14</i>	<i>0,12</i>	<i>0,17</i>	<i>0,55</i>
<i>Axiális helyzetű csap</i>	<i>0,05</i>	<i>0,06</i>	<i>0,03</i>	<i>0,01</i>

A 6. táblázat összefoglalja a három vizsgált komponens mozgása során fellépő centripetális és kerületi erőket (50) és (54) alapján. A körpálya forgástengelyéhez viszonyítva a centripetális erő sugar irányú x , míg a kerületi erő érintőleges, tehát tangenciális y irányultság jellemzi.

Az erők meghatározásához szükség van a vizsgált testek tömegére és azok súlypontjába számított helyvektorára a körmozgás forgástengelyéhez viszonyítva. A táblázatban a mozgás egyes fázisaiban maximális erőket feltételeztem, amely közelíti a valóságot az egyes komponensekre vonatkozóan, azonban ezeket ki kell egészíteni a komponensek egymásra való hatásával. A pontos leíráshoz külön kell vizsgálni a gyorsítás és a lassítás fázisát.

Az egyes fázisokra vonatkozó korrekciót a szerszámbefogó és a radiális helyzetű csap kontakt kapcsolata és annak rugós előfeszítése adja. A radiális helyzetű csap centripetális és rugóereje pedig a szerszámbefogóra hat.



20. ábra. A szerszámbefogó és a radiális rögzítőcsap érintkezési pontjában fellépő erők gyorsításkor

A 20. ábrán látható az érintkezési pontban fellépő erők irányultsága. Az ábra bal oldalán láthatók a rögzítőcsap centrifugális erejéből fakadó erőkomponensek és a jobb oldalon láthatók a rugóerőből fakadó erőkomponensek. Az ábrán látható szögérték a konstrukciós kialakításból adódóan $\alpha = 71,3^\circ$. Kezdvé a centrifugális erő felbontásával a vízszintes erőkomponens ismert, amely $F_{c2gyx} = 0,17 \text{ N}$. A szögfüggvényeket alkalmazva belátható, hogy:

$$F_{c2gy} = \frac{F_{c2gyx}}{\sin \alpha} = \frac{0,17 \text{ N}}{\sin 71,3^\circ} = 0,18 \text{ N}, \quad (55)$$

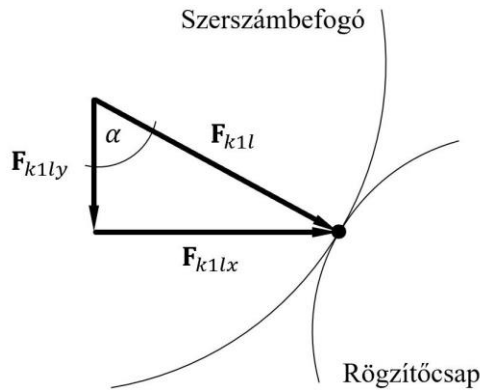
$$F_{c2gyy} = \frac{F_{c2gy}}{\cos \alpha} = \frac{0,18 \text{ N}}{\cos 71,3^\circ} = 0,56 \text{ N}. \quad (56)$$

A radiális helyzetű reteszelő csapra vonatkoztatva a rugóerő axiális irányú, amely a 20. ábra jobb oldalán látható, értéke: $F_{Rx} = 20 \text{ N}$. Az erő felbontását követően az egyes komponensek az alábbiak szerint határozhatók meg:

$$F_R = \frac{F_{Rx}}{\sin \alpha} = \frac{20 \text{ N}}{\sin 71,3^\circ} = 21,11 \text{ N}, \quad (57)$$

$$F_{Ry} = \frac{F_R}{\cos \alpha} = \frac{21,11 \text{ N}}{\cos 71,3^\circ} = 65,84 \text{ N}. \quad (58)$$

A valóságot egy egyszerűsített mechanikai modell helyettesíti, ahol az időben változó terheléseket maximális erők helyettesítik, ezért a körpálya tekintetében a radiális irányú erőkomponensek minden mozgási fázisban érvényesek, legyen szó gyorsítási, állandó vagy lassítási szakaszcól. A továbbiakban a lassítási szakaszban fellépő komponensek kölcsönhatását vizsgálom. A lassítás fázisában a szerszámbefogót a radiális helyzetű reteszelőcsap tartja a helyén. A két test között fellépő kontakterők a 21. ábrán láthatók.



21. ábra. A szerszámbefogó és a radiális rögzítőcsap érintkezési pontjában fellépő erők lassításkor

A három erő közül a (54) alapján számított kerületi erő nagysága, amely a 21. ábra feliratozásának megfelelően $F_{k1y} = 113,09 \text{ N}$. A szögfüggvényeket felhasználva meghatározható, hogy:

$$F_{kl} = F_{k1y} \cdot \cos \alpha = 113,09 \text{ N} \cdot \cos 71,3^\circ = 36,25 \text{ N}, \quad (59)$$

$$F_{k1x} = F_{kl} \cdot \sin \alpha = 36,25 \text{ N} \cdot \sin 71,3^\circ = 34,33 \text{ N}. \quad (60)$$

A szerszámbefogók feltételezett súlypontja axiális irányban változhat, attól függően, hogy milyen típusú szerszám kerül befogásra. Ebből fakadóan a testre ható centripetális és kerületi erők hatására forgatónyomaték lép fel, amely a szerszámbefogó és mozgatókar kontakt felületét terheli. Tekintettel a szerszámbefogók és szerszámok sokféleségére, a súlypontot 45 mm axiális eltolással feltételezem, így a centripetális erő okozta nyomaték az alábbiak szerint számítható:

$$M_c = F_{cl} \cdot l = 35,53 \text{ N} \cdot 0,045 \text{ m} = 1,59 \text{ Nm}. \quad (61)$$

A kiszámított nyomaték értékéből meghatározható, hogy a csatlakozó felületen milyen nagyságú F_{Tc} támaszerő ébred, amelynek nagysága:

$$F_{Tc} = \frac{M_c}{r} = \frac{1,59 \text{ Nm}}{0,05 \text{ m}} = 31,8 \text{ N}. \quad (62)$$

A gyorsítási és lassítási fázisában fellépő kerületi erők nagysága megegyezik, de irányuk ellentétes. Ez igaz lesz az általuk létrehozott forgatónyomatékokra is, amelynek értéke, megfelelő előjellel érvényes mind a két mozgásfázisra:

$$M_k = F_{kl} \cdot l = 113,09 \text{ N} \cdot 0,045 \text{ m} = 5,08 \text{ Nm}. \quad (63)$$

A csatlakozó felületen ébredő F_{Tk} támaszerő nagysága:

$$F_{Tk} = \frac{M_k}{r} = \frac{5,08 \text{ Nm}}{0,05 \text{ m}} = 101,6 \text{ N}. \quad (64)$$

Végezetül figyelembe kell venni a vizsgált testek súlyerejét, amely:

$$\mathbf{G}_i = m_i \cdot \mathbf{g}. \quad (65)$$

A meghatározott erők felületen megoszló terhelések, ezért a VEM analízis során fontos, hogy ezeket az erőket megfelelő felületekhez párosítsuk. Összegezve az erőket a gyorsítási fázisban, a szerszámbefogó kontakt felületére ható radiális x , tangenciális y és axiális z irányú erők:

$$\mathbf{F}_{1gx} = \mathbf{F}_{c1} + \mathbf{F}_{c2gx} + \mathbf{F}_{Rx}, \quad (66)$$

$$\mathbf{F}_{1gy} = \mathbf{F}_{k1gy} + \mathbf{F}_{c2gy} + \mathbf{F}_{Ry}, \quad (67)$$

$$\mathbf{F}_{1gz} = \mathbf{G}_1 - \mathbf{F}_{Tk} - \mathbf{F}_{Tc}. \quad (68)$$

A gyorsítási fázisban, a radiális csap kontakt felületére ható radiális x , tangenciális y és axiális z irányú erők:

$$\mathbf{F}_{2gx} = 0, \quad (69)$$

$$\mathbf{F}_{2gy} = \mathbf{F}_{k2gy} - \mathbf{F}_{Ry}, \quad (70)$$

$$\mathbf{F}_{2gz} = \mathbf{G}_2. \quad (71)$$

A gyorsítási fázisban, az axiális csap kontakt felületére ható radiális x , tangenciális y és axiális z irányú erők:

$$\mathbf{F}_{3gx} = \mathbf{F}_{c3gy}, \quad (72)$$

$$\mathbf{F}_{3gy} = \mathbf{F}_{k3gy}, \quad (73)$$

$$\mathbf{F}_{3gz} = \mathbf{G}_3. \quad (74)$$

A lassítási fázisban, a szerszámbefogó kontakt felületére ható radiális x , tangenciális y és axiális z irányú erők:

$$\mathbf{F}_{1lx} = \mathbf{F}_{c1} + \mathbf{F}_{k1lx} + \mathbf{F}_{Rx}, \quad (75)$$

$$\mathbf{F}_{1ly} = 0, \quad (76)$$

$$\mathbf{F}_{1lz} = \mathbf{G}_1 + \mathbf{F}_{Tk} + \mathbf{F}_{Tc}. \quad (77)$$

A lassítási fázisban, a radiális csap kontakt felületére ható radiális x , tangenciális y és axiális z irányú erők:

$$\mathbf{F}_{2lx} = 0, \quad (78)$$

$$\mathbf{F}_{2ly} = \mathbf{F}_{k2l} + \mathbf{F}_{k1ly} + \mathbf{F}_{Ry} + \mathbf{F}_{c2gy}, \quad (79)$$

$$\mathbf{F}_{2lz} = \mathbf{G}_2. \quad (80)$$

A lassítási fázisban, az axiális csap kontakt felületére ható radiális x , tangenciális y és axiális z irányú erők:

$$\mathbf{F}_{3lx} = \mathbf{F}_{c3} - (\mathbf{F}_{k1lx} - \mathbf{F}_{Rx} - \mathbf{F}_{c2gx}), \quad (81)$$

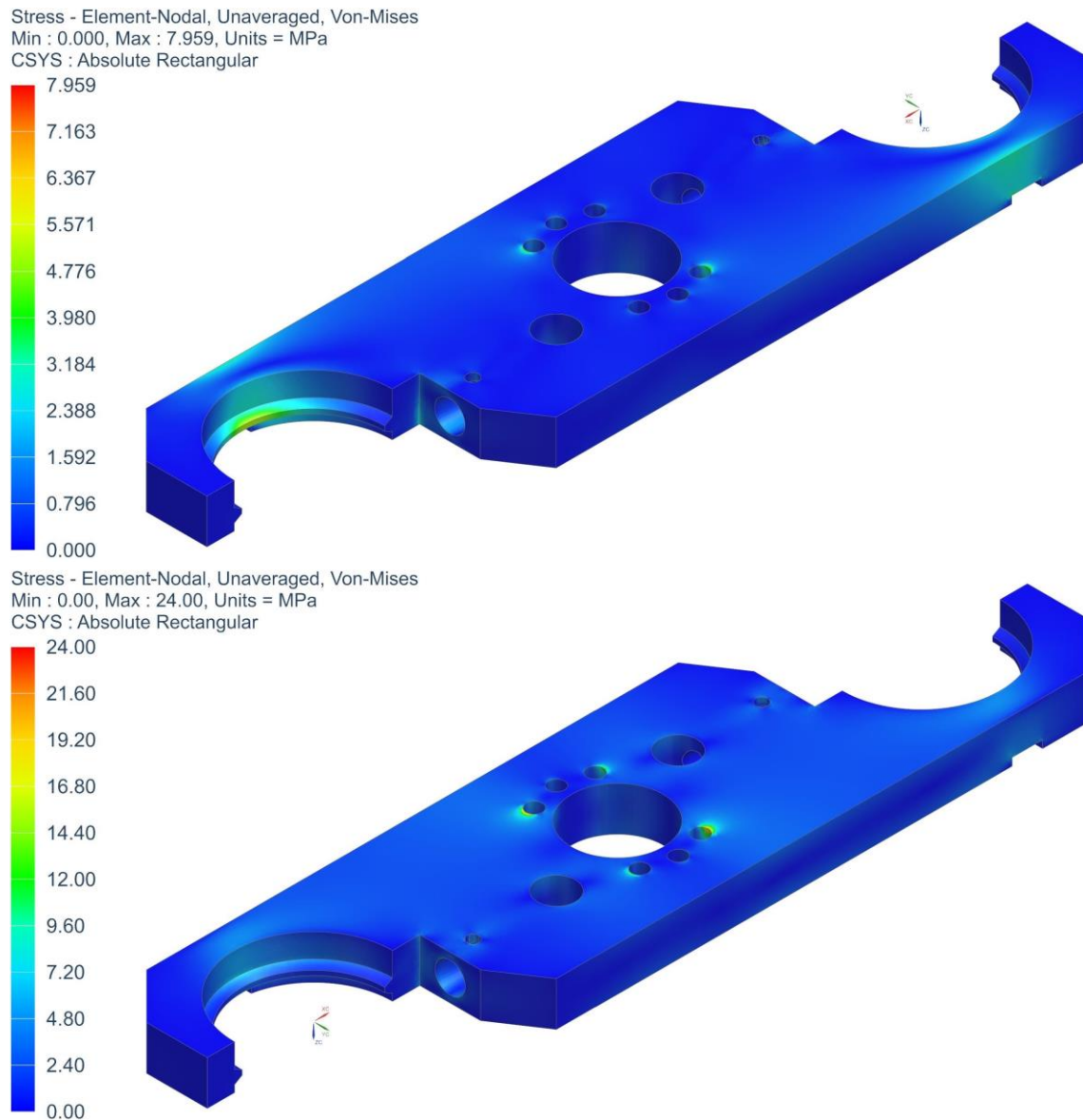
$$\mathbf{F}_{3ly} = \mathbf{F}_{k3l}, \quad (82)$$

$$\mathbf{F}_{3lz} = \mathbf{G}_3. \quad (83)$$

Az axiális csap előfeszítésének rugóereje minden mozgásfázisban azonos és a kontakt felületre ható radiális x , irányú erő:

$$\mathbf{F}_{4x} = \mathbf{F}_{Rx}. \quad (84)$$

A terhelések meghatározása után az analízist a 2406 verziószámú NX szoftverben végeztem el a 17. ábrán látható modell geometriai méreteivel és anyagminőségével.



22. ábra. A szerszámváltó kar statikus vizsgálatának szimulációs modelljei

A 22. ábrán láthatók a végelelemes vizsgálat eredményei, amelyből a felső a gyorsítási, az alsó pedig a lassítási szakaszra vonatkozik. Készítettem egy egyszerűsített modellt, amely nem tartalmazza a menetes furatokat és a kisebb alaksajátosságokat, ezáltal a modell hálózása homogénebb és a szimuláció lefutása gyorsabb lehet. A modellen tetragonális hálózást

alkalmaztam, amelynek maximális elemmérete 4 mm . Az alkatrész megfogása a hat darab központi furat palástfelületén történt. Az erőket a 6.2. alfejezetben meghatározott nagysággal és irányultsággal helyeztem el a hozzájuk párosított kontaktfelületeken. A 22. ábrán látható modelleken az analízist követően méréseket végeztem a kitüntetett felületeken. A felületen ébredő von Mises feszültségértékeket a 7. táblázat összegzi, amelynek jelmagyarázatában a szerszámbefogó kontakt felülete az *I* számot, a radiális csap kontakt felülete a *II* számot, az axiális csap kontakt felülete a *III* számot és a rugó csatlakozási felülete a *IV* számot képviseli.

7. táblázat. Egy szerszámcseré periódus alatt fellépő terhelések

<i>Mozgásfázis</i>	<i>Kontakt felület</i>	<i>Erő iránya</i>	<i>Erő nagysága [N]</i>	<i>Maximális feszültség [N/mm²]</i>	<i>Átlag feszültség [N/mm²]</i>
<i>Gyorsítás</i>	<i>I</i>	<i>x</i>	55,7	5,39	1,04
		<i>y</i>	179,49		
		<i>z</i>	69,9		
	<i>II</i>	<i>x</i>	-	2,22	0,56
		<i>y</i>	65,29		
		<i>z</i>	1,37		
	<i>III</i>	<i>x</i>	0,03	1,51	0,47
		<i>y</i>	0,01		
		<i>z</i>	-		
	<i>IV</i>	<i>x</i>	20	1,14	0,39
		<i>y</i>	-		
		<i>z</i>	-		
<i>Lassítás</i>	<i>I</i>	<i>x</i>	89,86	7,26	2,15
		<i>y</i>	-		
		<i>z</i>	283,26		
	<i>II</i>	<i>x</i>	-	5,67	1,47
		<i>y</i>	180,04		
		<i>z</i>	1,37		
	<i>III</i>	<i>x</i>	14,13	4,63	1,65
		<i>y</i>	0,01		
		<i>z</i>	-		
	<i>IV</i>	<i>x</i>	20	1,59	0,71
		<i>y</i>	-		
		<i>z</i>	-		

A szimulációs vizsgálat egyik célja az, hogy számszerű adatokkal bizonyosodjak meg arról, hogy az eredeti alkatrész mekkora biztonsággal felel meg az üzemi körülmények során fellépő terheléseknek. A 22. ábrán jól látható a gyorsítási szakaszban a maximális belső feszültség értéke $7,959\text{ MPa}$, lassításkor pedig 24 MPa . A feszültségmaximumokhoz gyorsítási fázisban $0,01\text{ mm}$ maximális alakváltozás párosul, amely a lassítási szakaszban $0,03\text{ mm}$. A feszültségérték közül a nagyobbat kell figyelembe venni, amely az alkalmazott anyagminőség $R_{p0,2} = 340\text{ MPa}$ folyáshatárának a $7,05\%$ -a, amely feszültséghányad alapján $b = 14,16$ biztonságot eredményez. Ezek a mérőszámok egyre inkább alátámasztják azt, hogy a szerszámcserélő jelenlegi geometriája meglehetősen túlméretezett, amelyet célszerű optimalizálás útján fejleszteni a kisebb tömeg érdekében.

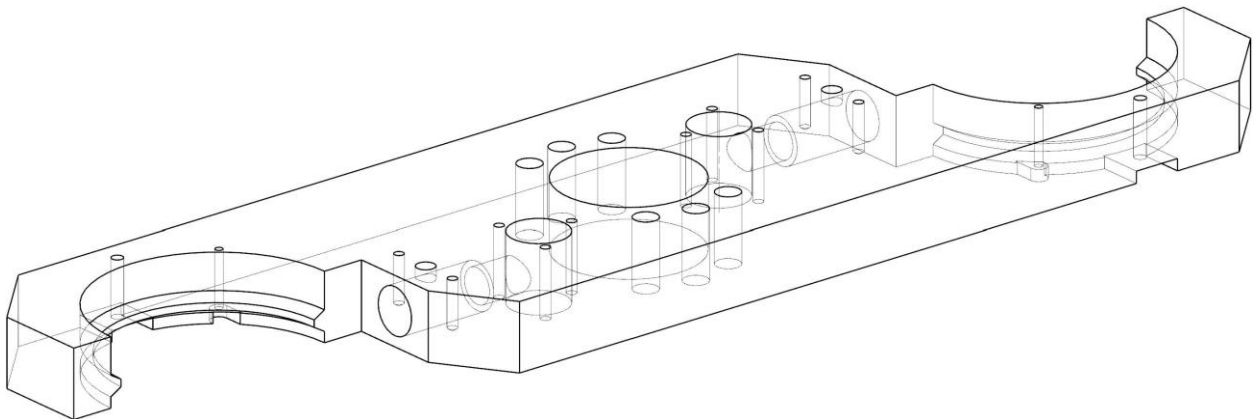
A vizsgálat másik célja, hogy a generatív tervezés alkalmazása során ismerjük azokat a terhelőerőket és feszültségértékeket, amelyek a kitüntetett kontakt zónákat terhelik. Ezeknek az erőknek a nagyságát, irányát és a felületen ébredő feszültségértékeket a 7. táblázat foglalja össze, amely fontos szerepet játszik majd a generatív tervezés modellépítés és szimulációs modellépítés szakaszában a peremfeltételek definiálása során.

6.3. Generatív módszerrel tervezett szerszámcserélő

A szerszámcserélő kar generatív módszerrel történő megtervezését és optimalizását a 13. ábrán látható folyamatnak megfelelően végzem el. A tervezéshez az NX 2406 szoftvert használom.

6.3.1. Tervezési térfogat

A generatív tervezési folyamat első lépésében a tervezési térfogat definiálását végeztem el. A disszertáció esettanulmányában az optimált alkatrész kiterjedése nem haladhatja meg az eredeti alkatrész geometriai méreteit.

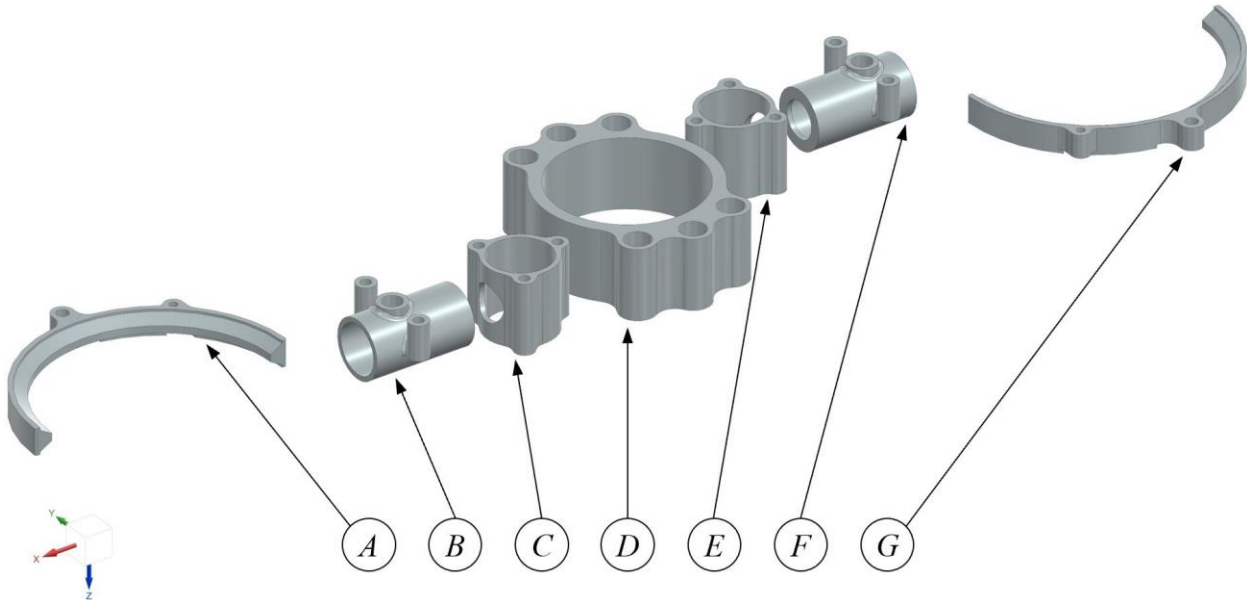


23. ábra. A szerszámcserélő kar tervezési térfogata

A 23. ábrán látható a szerszámcserélő kar tervezési térfogata, amely tartalmazza az eredeti alkatrész összes alaksajátosságát. A továbbiak során ez a modell testesíti meg a V_0 térfogatot, amelynek értéke $V_0 = 1176770,7\text{ mm}^3$.

6.3.2. Konstruktív geometriák

A generatív tervezési folyamat második lépésében a konstrukció geometriák létrehozására kerül sor, amelyeket a 14. ábrán látható funkciók alaksajátosság igényei alapján hoztam létre.



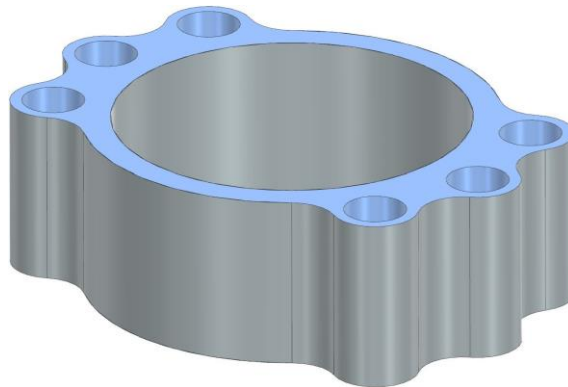
24. ábra. A szerszámváltó kar konstrukció geometriái

A 24. ábrán láthatók a szerszámváltó kar konstrukció térfogatai, amelyek anyagmegtartó feltételt biztosítanak a tervezési tartományon belül. Azoknak a funkcióknak a geometriái kerültek csoportosításra, amelyek eleve kapcsolatot létesítettek egymással. A különféle alakzatokat egy elvárt, minimális falvastagsággal hoztam létre. Jó példa erre a menettel ellátott furatok falvastagságának megadása, amely során ügyelni kell a szabványos magátmérő meglétére és a menetárok mélységéből adódó minimális átmérőre. Ezek biztosítják azt a feltételt, hogy az alkatrész alaksajátosságai megfelelően utómunkálhatók legyenek az optimalizációs folyamatot követően. A kar alaksajátosságai egy félköríves kiosztással előállíthatók, ezért vannak olyan elemek, amelyek megegyeznek egymással, de az 5.2.1. alfejezetben bevezetett leírásmód alapján külön-külön létre kell hozni a testeket és a megkülönböztethetőség miatt egyedi jelöléssel kell ellátni őket. Így az egyező alakzatok azonos funkciókat hordoznak, azonban a módszertani leírhatóság szempontjából eltérő kódolással rendelkeznek az egyes konstrukció térfogatok és az általuk hordozott funkciók is. A konstrukció geometriák összterfogata $V_{(k)} = 94546,2 \text{ mm}^3$, amelyet felhasználva (24) alapján kiszámítható a $g_{(k)} = 8,03 \%$ generálási kötöttség és a (25) alapján számítható $g_{(sz)} = 91,97 \%$ generálási szabadság jelző. Az A1 mellékletben látható a szerszámváltó kar konstrukció térfogatának és a funkcióinak logikai kapcsolatát leíró $\mathbf{X}$ mátrix, amely a (31) alapján értelmezendő.

6.3.3. Kényszerek

A kényszerek létrehozása a szimulációs modellalkotás első lépése. A szabadsági fokok lekötésének módját az alkatrész valós beszerelési állapotának és működésének mintájára kell

megválasztani és megfelelő helyen létrehozni. Az alkatrész rögzítési pontjai a 24. ábrán látható központi D elemen helyezkednek el.



25. ábra. Kényszerek elhelyezése a konstrukciós térfogaton

A 25. ábrán láthatók azok a kék színnel jelölt felületek, amelyeken szabadságfok lekötést alkalmaztam. A konstrukciós geometria hat darab csavarkötést tartalmaz, amelyek furatainak belső palásfelületei és a homlokfelületek kerültek kiválasztásra. A hat palástfelület a szoftver biztosította megkötések közül a csap kényszert, angolul *Pin* vagy *Pinned Constraint*-t elnevezést hordozzák magukon, amely megfelelően szimbolizál egy valós csavarszár és furatpalást kapcsolatot. A két homlokfelület fix kényszert hordoz, hiszen a csavarok feszítési ereje a kapcsolódó homlokfelületeket összeszorítja.

6.3.4. Terhelések

A szerszámváltó karra ható terheléseket a 7. táblázat összefoglalta, azonban különválasztja a gyorsítás és a lassítás fázisát. Az időfüggetlen VEM analízis során logikus és praktikus volt a mozgástípusok szétválasztása, azonban ezeket összegezni kell.

Az összegzés oka az, hogy a topológiai optimalítás és a generatív tervezés során nem egy-egy alkatrészt szeretnék létrehozni egyik másik mozgási fázisra, hanem olyan végeredményre van szükség, amely mindkét fázisban megfelelőnek bizonyul. Az optimalítás és generálás során a tervezési térfogaton belüli anyagterjedés a feszültségi állapot hatására változik, amely alapvetően a testre ható erők nagyságának és irányainak a függvénye. Abból adódóan, hogy a geometriai megoldások mind a két mozgásfázisnak megfeleljenek, elvégeztem az összevonást.

A művelet során azt a logikát követtem, hogy a két eltérő mozgás során az azonos felületet terhelő és azonos irányultsággal rendelkező erők közül a nagyobb érvényesül. Ebben az esetben az összeadás nem szükséges, mert adott időpillanatban a megkülönböztetett erők közül mindig csak az egyik hat a felületre. Abban az esetben, mikor az azonos felületet terhelő erők ellentétes irányultsággal rendelkeznek, mind a két erő megtartásra kerül, hogy az anyagterjedés elinduljon mind a két irány mentén. Ezáltal az érhető el, hogy az egyik erő okozta anyagterjedés függvénye lesz a másik erő okozta anyagterjedésnek és ez igaz lesz fordított esetben is. A módosított terheléseket a 8. táblázat foglalja össze.

8. táblázat. Módosított terhelések

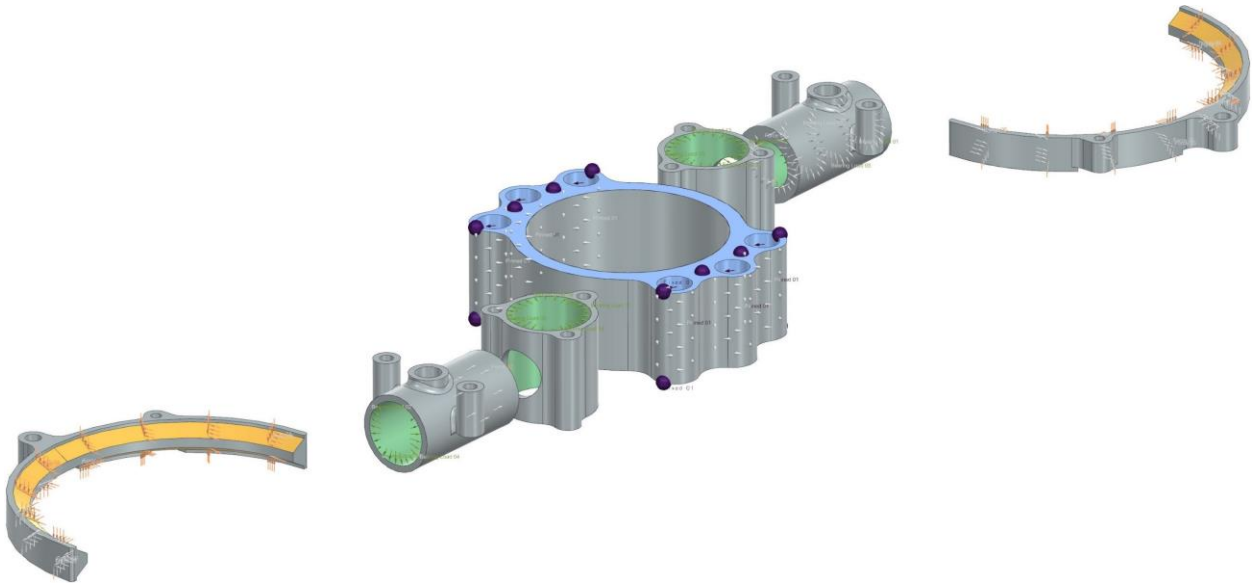
<i>Kontakt felület</i>	<i>Erő iránya</i>	<i>Erő nagysága [N]</i>	
I	<i>x</i>	-89,86	
	<i>y</i>	-179,49	
	<i>z</i>	-69,9	283,26
II	<i>x</i>	-	
	<i>y</i>	180,04	
	<i>z</i>	1,37	
III	<i>x</i>	-0,03	14,13
	<i>y</i>	-0,01	0,01
	<i>z</i>	-	
IV	<i>x</i>	20	
	<i>y</i>	-	
	<i>z</i>	-	

A módosított terhelésekkel kiegészíthető a szimulációs modell. Az egyes irányokban meghatározott erők a modellen belül felületen megoszló terheléseket képviselnek, amelyet a 26. ábra szemléltet.



26. ábra. A szerszámváltó kar terheléseinek kontakt felületei

A 26. ábra a szerszámváltó kar terhelt felületeit mutatja, ahol a színek jelentése a szoftverben megadott terhelés milyenségére utal. A 8. táblázat jelölésrendszere alapján, a sárga színű jelölés az I-es számot képviselő szerszámbefogó kontakt felülete, ahol az erő kúpos palástfelületen hat. Ebben az esetben a szoftver erő létrehozását engedi, megfelelő irányultsággal és nagysággal. Zöld színű jelölést kaptak a II-es számot hordozó radiális és III-as számot képviselő axiális csap kontaktfelületei, ahol a terhelések hengeres palástfelületen oszlanak meg. Ebben az esetben a szoftver úgynevezett csapágyterhelés definiálását teszi lehetővé az erő megfelelő irányának és nagyságának meghatározásával. A IV-es egy homlokfelület, ahol a terhelés egy körgyűrűn oszlik meg. A 8. táblázatban feltüntetett terheléseken túl a gravitációs erő felvétele szükséges, amelynek iránya a pozitív *z* vektor a 24. ábra alapján.



27. ábra. A szerszámváltó kar peremfeltételekkel ellátott modellje

A 27. ábrán látható a szerszámváltó kar szimulációs modellje, amely tartalmazza a kötött geometriákon elhelyezett szabadságfok lekötéseket és a különféle terheléseket. A tengelyszimmetriának megfelelő leképezést a szoftver lehetővé teszi, amely az alakkényszer, a szoftver elnevezés szerint *Shape Constraint* parancson belül definiálható. A sík vagy tengely szimmetriák kihasználása nagy mértékben csökkenti a számítási feladatokat, így a megoldás generálásának időszükséglete csökken. A tervezési folyamat ezen szakaszában meghatározásra kerültek a szerszámváltó karra vonatkozó fix peremfeltételek. A következőkben az esettanulmány számos beállítás variálásával végez megoldáskeresést, amely jellemzően a geometriai kényszerekre összpontosít. Ezek a feltételek vonatkoznak a különféle eljárásoknak megfelelő gyárthatóságra, amelyek a legnagyobb mértékben befolyásolják a generált forma milyenségét. A jelenlegi peremfeltételekre vonatkozó fix jelző abban az értelemben állja meg a helyét, hogy az esettanulmány folytatásában ezek állandónak tekinthetők.

6.3.5. Megoldások generálása

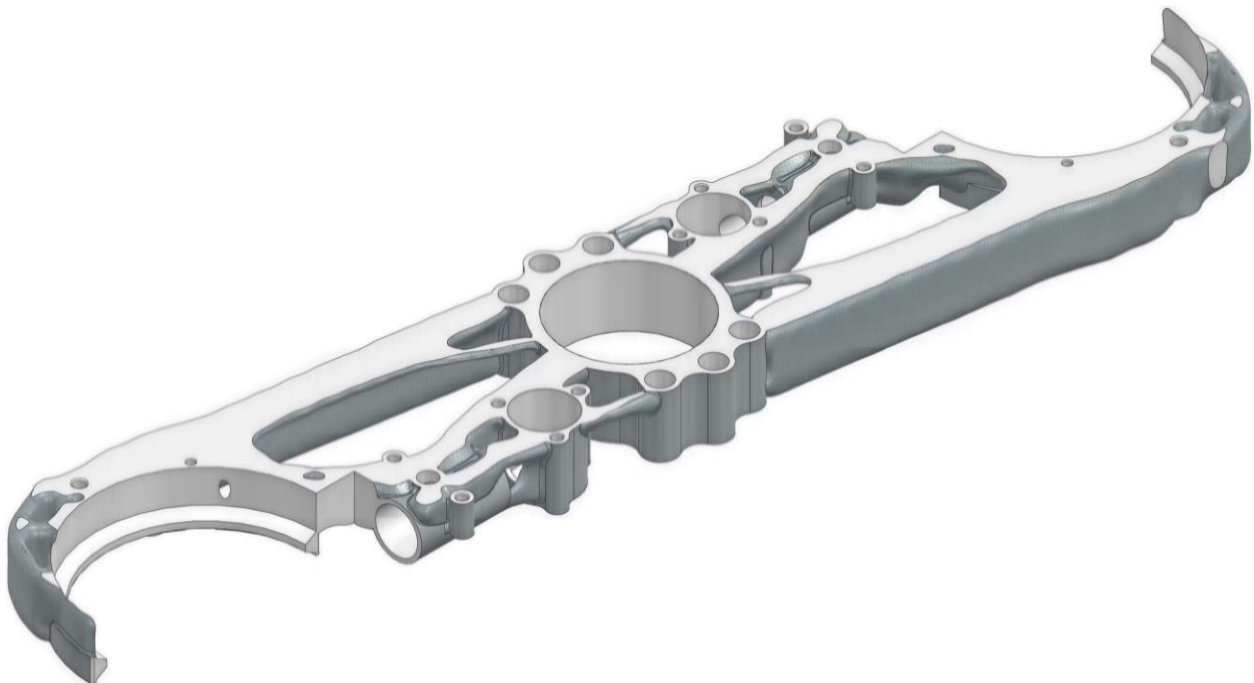
Az esettanulmány ezen szakaszában a megoldások előállítása kerül főszerepbe. A kombináción alapuló megoldáskeresést a variációk sokasága nehezítheti, ezért a keresési utat racionalizálni kell. A generatív tervezéssel végzett tervezés és fejlesztés esetén el kell dönten, hogy milyen gyártási eljárások használhatók az adott feladat során. Ezt a döntést nagy mértékben befolyásolhatja a tervezendő alkatrész milyensége, de ezen felül döntő tényező lehet az adott technológia gazdasági vonzata. A disszertációban végzett tanulmányban nincs korlátozás az előállítási módra vonatkozóan, ezért a szoftver által biztosított gyártástechnológiák közül mindegyik szerepel a létrehozott megoldások között. A felhasznált anyagminőség esetében lényegesen szűkül a lista, amelyben az eredeti DIN 1.0503 C45 anyag mellé az Al 7075-T6-ot párosítom. Az 5.2. alfejezetben megfogalmazott leírasmód bemutatását segíti, ha a generált megoldások darabszáma minél több és az egyes megoldások geometriai felépítése és alakja lényegesen különbözik egymástól. A 9.

táblázat összefoglalja generálni kívánt megoldásokat, amelyek különféle gyártási eljárásból fakadó geometriai megkötésekkel és anyagminőséggel vannak ellátva.

9. táblázat. A megoldások generálására vonatkozó variációk

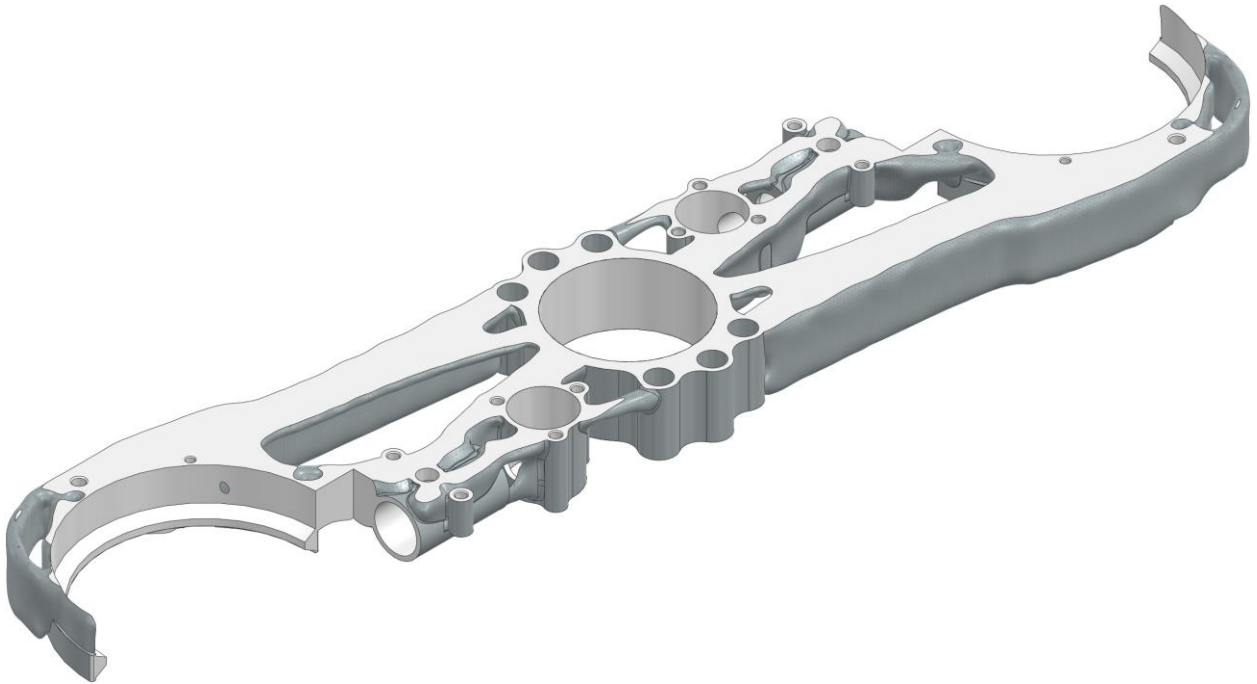
<i>Cél</i>	<i>Gyártástechnológia</i>	<i>Anyag</i>	<i>Optimalizációs limit</i>	<i>Jel</i>
A tömeg minimalizálása	Öntés	C45	feszültség érték, amely: $(\sigma_{\max} = \frac{R_{p0,2}}{2})$	M_1
		Al 7075-T6		M_2
	Forgácsleválasztás	C45		M_3
		Al 7075-T6		M_4
	Additív	C45		M_5
		Al 7075-T6		M_6

A 9. táblázat alapján előállítom az egyes variációknak megfelelő szimulációs modelleket és elvégzem a generálást. Az összes generált megoldásra együttesen érvényes, hogy a tervezési térfogat $V_0 = 1176770,7 \text{ mm}^3$, a konstrukciós geometriák össztérfogata $V_{(k)} = 94546,25 \text{ mm}^3$, amelyet (24) alapján $g_{(k)} = 8,03 \%$ generálási kötöttség és a (25) alapján $g_{(sz)} = 91,97 \%$ generálási szabadság jellemez. Az (31) alapján értelmezett $\mathbf{X}$ mátrix minden generált megoldás esetén egyezik és az A1 melléklet tartalmazza. A következőkben bemutatásra kerülnek a 9. táblázat alapján generált megoldások.



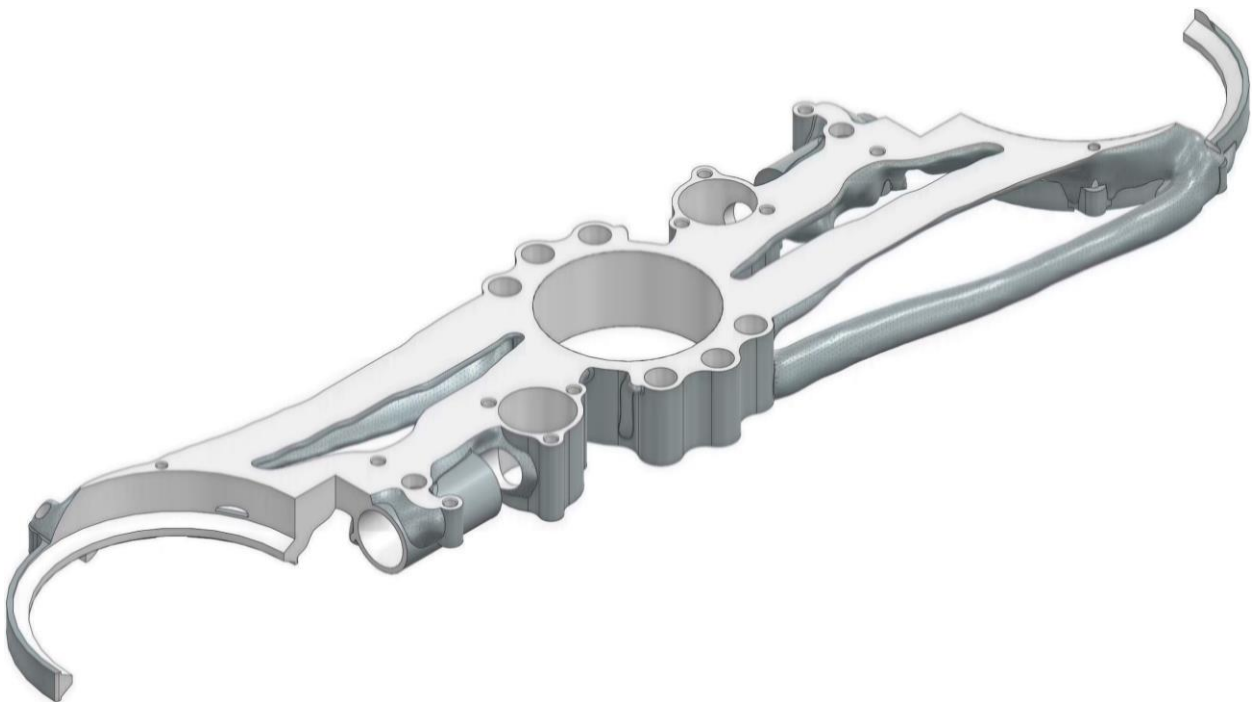
28. ábra. M_1 generált megoldás

A 28. ábrán az M_1 megoldás látható, amely paramétereinek összefoglaló táblázatát, a $\mathbf{G}_1$ generált kapcsolati mátrixát és az $\mathbf{M}_1$ megoldás mátrixát az A2 melléklet tartalmazza.



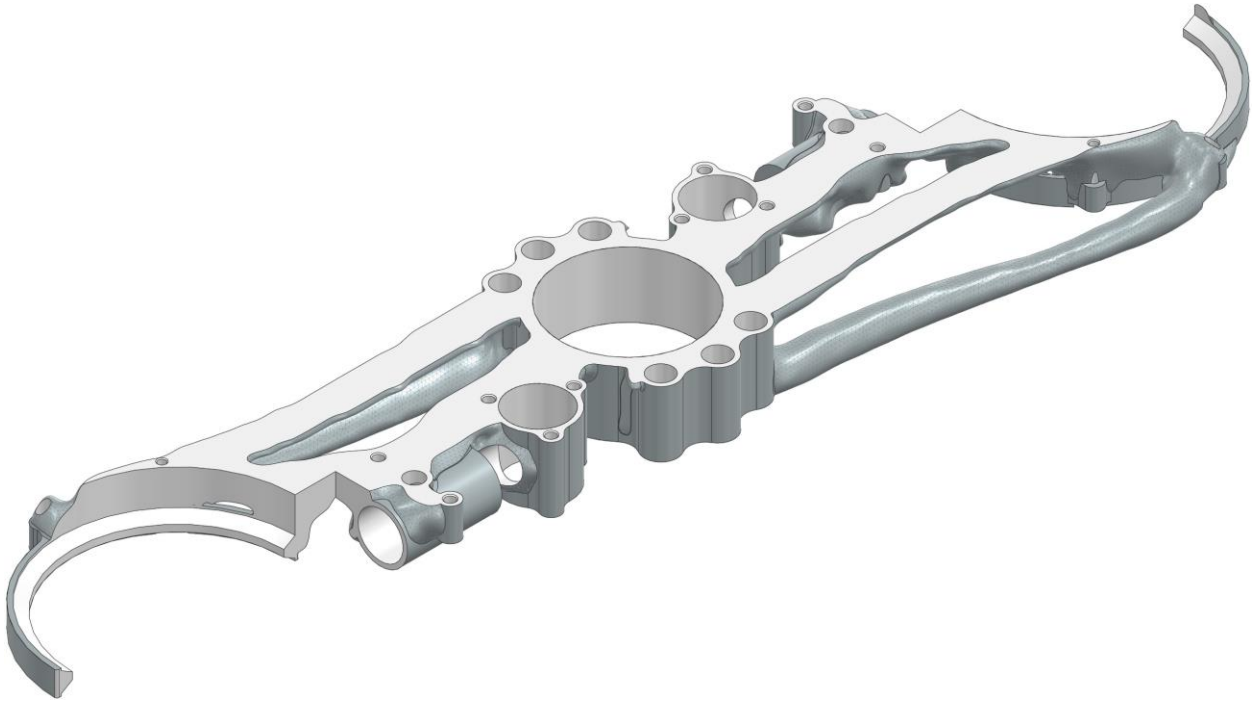
29. ábra. M2 generált megoldás

A 29. ábrán az M2 megoldás látható, amely paramétereinek összefoglaló táblázatát, a G_2 generált kapcsolati mátrixát és az M_2 megoldás mátrixát az A3 melléklet tartalmazza.



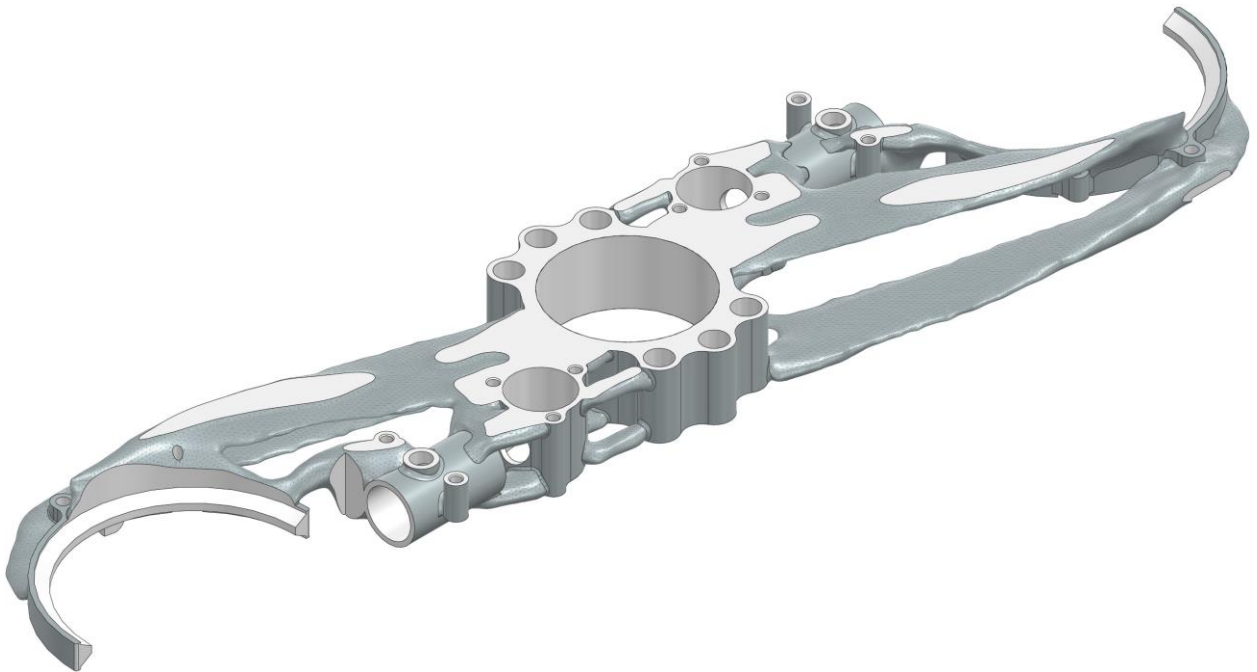
30. ábra. M3 generált megoldás

A 30. ábrán az M3 megoldás látható, amely paramétereinek összefoglaló táblázatát, a G_3 generált kapcsolati mátrixát és az M_3 megoldás mátrixát az A4 melléklet tartalmazza.



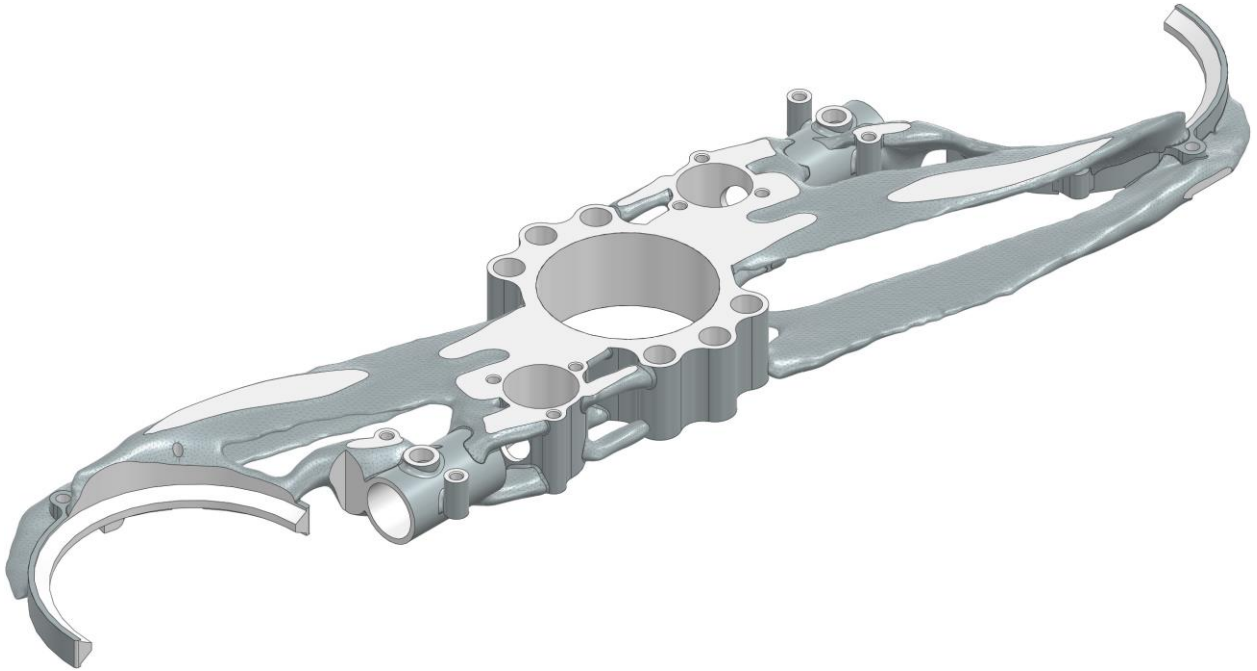
31. ábra. M4 generált megoldás

A 31. ábrán az M4 megoldás látható, amely paramétereinek összefoglaló táblázatát, a **G**₄ generált kapcsolati mátrixát és az **M**₄ megoldás mátrixát az A5 melléklet tartalmazza.



32. ábra. M5 generált megoldás

A 32. ábrán az M5 megoldás látható, amely paramétereinek összefoglaló táblázatát, a **G**₅ generált kapcsolati mátrixát és az **M**₅ megoldás mátrixát az A6 melléklet tartalmazza.



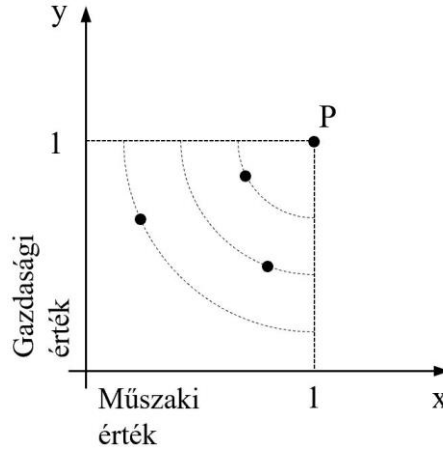
33. ábra. M6 generált megoldás

A 33. ábrán az M6 megoldás látható, amely paramétereinek összefoglaló táblázatát, a G_6 generált kapcsolati mátrixát és az M_6 megoldás mátrixát az A7 melléklet tartalmazza. A generált megoldások szimulációs eredményeit az A9 melléklet tartalmazza.

6.4. Eredmények kiértékelése

A módszeres tervezés fontos jellemzője, hogy a megoldáskeresés több szálon történik, amely határozottságot ad a tervezőnek abban a tekintetben, hogy a feladatot a rendelkezésre álló technikai, anyagi és szellemi erőforrások nyújtotta lehetőségek alapján jó hatásfokkal végezte el. A feladathoz választott megfelelő logika alapján generált megoldások elméleti síkon kielégítik az előzetesen meghatározott követelményjegyzék kritériumhalmazát, de egy nagy elemszámú megoldáshalmaz újabb kihívásokat vonhat maga után, amelyhez ugyancsak a tervező felelőssége párosul. A nagyfokú módszerességet és kellő tapasztalatot igénylő folyamatfázis a szelektálás, amely során a létrehozott változatok elbírálása és szelektálása megy végbe, amely segítségével kiválasztásra kerülhet a végleges megoldás. A generatív tervezés nyújtotta szoftveres környezet különféle összehasonlításokkal segíti ezt a munkafolyamatot, azonban a végső kiválasztás az emberi jelenlétet igényli a meglehetősen komplex döntési tényezők miatt. A szoftverek nyújtotta összehasonlítások leginkább a megoldáshalmaz peremén elhelyezkedő egyedek felderítésére használatosak, ahol egy-egy kiugró jellemző kizáró feltételt nyújthat a kiválasztási folyamatban.

Az esettanulmány során a feltárt megoldások kiértékelésére a kétdimenziós értékelemzési módszerek közül a műszaki-gazdasági értékelemzést fogom alkalmazni. Az egyes konstrukciók külön-külön osztályozásra kerülnek műszaki és gazdasági szempontok alapján, amely során számszerű érték rendelhető minden egyes megoldáshoz.



34. ábra. A műszaki-gazdasági értékelemzés [1]

A 34. ábrán látható a műszaki-gazdasági értékelemzés vizuális leírása, mely lényege, hogy a konstrukciók értékét egy síkbeli koordináta-rendszerben elfoglalt pozíció határozza meg. A pozitív térség vízszintes x tengelye képviseli a műszaki értéket, a függőleges y tengely pedig a gazdasági értéket határozza meg. Az ábrán látható P pont az úgynevezett ideális pont. Annál sikeresebb egy konstrukció, minél közelebb helyezkedik el az ideális ponthoz. A sikeres értékelés alapja a megfelelő értékelési szempontok meghatározása mind műszaki, mind gazdasági szempontok alapján. Minden konstrukció kap egy $e_{m\ddot{u}i}$ pontértéket a műszaki és egy e_{gi} értéket a gazdasági szempontok alapján. Jellemzően a különféle minősítési szempontok nem tekinthetők egyformán fontosnak, ezért a kritériumokat fontosságuk alapján sorba kell állítani és ennek megfelelően egy-egy $\lambda_{m\ddot{u}i}$ és λ_{gi} súlyfaktort kell hozzájuk rendelni. A súlysámok összege legtöbb esetben 1 vagy 100. A megfogalmazott műszaki szempontok alapján számított i megoldás műszaki értéke:

$$x_i = \left[\frac{\lambda_{m\ddot{u}1}e_{m\ddot{u}1} + \lambda_{m\ddot{u}2}e_{m\ddot{u}2} + \dots + \lambda_{m\ddot{u}i}e_{m\ddot{u}i}}{(\lambda_{m\ddot{u}1} + \lambda_{m\ddot{u}2} + \dots + \lambda_{m\ddot{u}i})e_{m\ddot{u}(max)}} \right]_i \leq 1. \quad (85)$$

A megfogalmazott gazdasági szempontok alapján számított i megoldás gazdasági értéke:

$$y_i = \left[\frac{\lambda_{g1}e_{g1} + \lambda_{g2}e_{g2} + \dots + \lambda_{gi}e_{gi}}{(\lambda_{g1} + \lambda_{g2} + \dots + \lambda_{gi})e_{g(max)}} \right]_i \leq 1. \quad (86)$$

A műszaki-gazdasági értékelemzési módszer nagyfokú részletességgel szolgáltat eredményt a vizsgált megoldáshalmaz egyedeiről, azonban fontos megjegyezni, hogy a módszer igen érzékeny a minősítésre és a súlyozásra. Ebből fakadóan ezzel a vizsgálattal olyan értékelési szempontrendszer szükséges összeállítani, amelyet számszerű értékek alapján, esetlegesen kiegészítő vizsgálatok segítségével lehet megválaszolni. Az értékelési eljárás eltérő szakterületekhez kapcsolódó ismereteket és tapasztalatokat igényel, ezért a döntési fázisban egy szakértői csoportot célszerű összeállítani, hogy a különféle értékeléseket kiemelkedő szakmai háttér alapozza meg.

6.4.1. Műszaki értékelési szempontok

A műszaki gyakorlatban talán az egyik legfontosabb jellemző, hogy a vizsgált alkatrész milyen mértékben viseli a rá ható terheléseket. Műszaki tervezésben és ellenőrzésben jellemzően a felhasznált alapanyag folyáshatárát vesszük figyelembe a megengedett feszültségérték kiszámításában:

$$\sigma_{meg} = \frac{R_{p0,2}}{b}. \quad (87)$$

Az esettanulmányban a megoldások $b = 2$ biztonsági tényezővel kerültek generálásra, amely során a tényező értéke a felhasznált alapanyag folyáshatárára vonatkozott. Az első műszaki értékelési szempont a teherbírási és terhelhetőségre vonatkozik, amelyet az egyes megoldásokra vonatkozóan a $b_{i(r)}$ relatív biztonsági tényező segítségével lehet objektív módon összehasonlítani:

$$\sigma_{i(max)} = \frac{\sigma_{meg}}{b_{i(r)}}, \quad (88)$$

$$b_{i(r)} = \frac{\sigma_{meg}}{\sigma_{i(max)}} \geq 1. \quad (89)$$

A relatív biztonsági tényező megmutatja a generálás előtt megadott σ_{max} maximálisan megengedett feszültségérték és az i generált konstrukcióban kialakuló $\sigma_{i(max)}$ maximális feszültség különbségét. A két feszültségérték közötti különbség megmutatja, hogy statikai szempontból mekkora tartalék van a rendszerben. A különbség valójában a geometriára vonatkozó kényszerek és korlátok eredménye, amelyet a megválasztott gyártástechnológiához rendelt szabályrendszerek határoznak meg és általánosan a gyárthatósággal jellemezhető. A (76) és (77) értelmében meghatározható az i konstrukcióra vonatkozó $b_{i(v)}$ valós biztonsági tényező, amelyet az anyag folyáshatárához viszonyítva lehet értelmezni:

$$b_{i(v)} = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_{i(max)}}. \quad (90)$$

Az esettanulmányban a $b_{i(r)}$ relatív biztonsági tényező szerepel a terhelhetőség értékelő szempontban. Minél nagyobb a jelző értéke, az adott megoldás annál előnyösebb.

A második műszaki értékelési szempont a $m_{i(g)}$ generált konstrukció tömegére vonatkozik. A generált alkatrész az alapján kerül pontozásra, hogy az m_0 eredeti alkatrész tömegéhez képest, százalékban kifejezve milyen mértékű δ_i tömegcsökkentést sikerült elérni. A tömegcsökkentés mértékének meghatározására az alábbi összefüggés használatos. Minél nagyobb eredményt kapunk, az alkatrész annál sikeresebb:

$$\delta_i = \left[1 - \frac{m_{i(g)}}{m_o} \right] \cdot 100. \quad (91)$$

A szerszámváltó kar tekintetében számos pozitív tulajdonságot eredményezhet a tömegcsökkentés. Az esettanulmány harmadik műszaki értékelő szempontjában az optimalizált geometria tehetetlenségi nyomatéka és forgási energiája alapján kívánja osztályozni az egyes megoldásokat. Ennek oka, hogy a szerszámgépipar egyre energiatakarékosabb gépekre és eszközökre törekszik. Az optimalásból fakadó tömegcsökkentés további pozitív vonzata, hogy ugyanazon erőforrás és energiafelhasználás mellett a kisebb tömeg mozgatása gyorsabban valósulhat meg. Ezt tovább motiválja, hogy a szerszámgépészetben a fejlődési irányt alapvetően a mellékidőt képző feladatok automatizálása és azok gyorsítása jelenti. A mozgási energia nagyságának meghatározása a 6.2 alfejezet jelölésrendszerén és számításain alapszik, amely a generált megoldások jellemzőivel az alábbi összefüggések alapján kerül meghatározásra. Az $\mathbf{F}_k$ kerületi erő a körpálya középpontjára számított nyomatéka:

$$\mathbf{M}_{közp.} = \mathbf{F}_k \cdot \mathbf{r} = m \cdot \mathbf{r}^2 \cdot \beta. \quad (92)$$

Az összefüggésben az $m \cdot \mathbf{r}^2$ szorzat a gyorsulást végző m tömegű anyagi pont tehetetlenségi nyomatéka, melynek jele θ . Így a körpálya középpontjába számított nyomaték:

$$\mathbf{M}_k = \theta \cdot \beta. \quad (93)$$

Az előző összefüggések alapján meghatározható a körpályán mozgó m tömegű anyagi pont mozgási energiája:

$$E_f = \frac{m \cdot \mathbf{r}^2 \cdot \omega^2}{2} = \frac{\theta \cdot \omega^2}{2}. \quad (94)$$

Az eredmények szoftveres segítséggel ellenőrzésre kerülnek. Az iCAD rendszerek gyors eredményt tudnak szolgáltatni a virtuális modell tömegéről és annak súlypontjáról. A szoftveres vizsgálat azzal bonyolódik, hogy az alkatrész tengelyszimmetriájából fakadóan minden egyes konstrukció tömegközéppontja a z forgástengelyen helyezkedik el. A kívánt eredményt úgy lehet előállítani, hogy az alkatrészt a forgástengelye mentén egy függőleges síkkal két egyenlő testre bontjuk és a tömegközéppontot a fél alkatrészeire vonatkozóan meghatározzuk. Az értékelés folyamán minél kisebb a kinetikus energia a forgómozgásra, annál előnyösebb az alkatrész.

A negyedik műszaki értékelési szempont az egyes megoldásokat gyárthatóság szempontjából rangsorolja. Az értékelés magában foglalja az adott eljárás technológiaigényét és a gyártáshoz szorosan kapcsolódó elő és utómunkálatokat. Az egyes megoldások három eltérő technológiával kerültek generálásra, amelyek az öntés, marás vagy tágabb értelemben forgácsleválasztás és a fémnyomtatás. Ezen technológiák közül az öntés és a forgácsleválasztó eljárások kiforrott technológiának tekinthetők, amelyekről számos technológiai ismeretekkel rendelkezünk a felhasználható alapanyagokra, a szerszámokra és a gyártóeszközökre vonatkozóan. A fémnyomtatás egy újkeletű eljárás, amely bizonyította a létjogosultságát az ipar számos területén, azonban jelentős része még kísérleti fázisban van. Minden gyártási eljárás rendelkezik elő és utómunkálatokkal, amelyek során az alapanyagból előgyártmány majd az előgyártmányból pedig gyártmány születhet.

Az egyes megoldások minél nagyobb értéket képviselnek, annál előnyösebbek:

$$Gy_{(öntés)} < Gy_{(additív)} < Gy_{(forg.)}. \quad (95)$$

A műszaki értékelési szempontokat és azok súlyfaktorát a 10. táblázat foglalja össze.

10. táblázat. A műszaki értékelési szempontok és azok súlyértéke

<i>Műszaki értékelési szempont</i>	<i>Sorszám</i>	<i>Súlyfaktor</i>
Terhelhetőség	$mű_1$	0,1
Tömegcsökkentés	$mű_2$	0,25
Forgási energia	$mű_3$	0,5
Gyárthatóság	$mű_4$	0,15

6.4.2. Gazdasági értékelési szempontok

Az első gazdasági értékelő szempont a felhasznált alapanyag mennyiségi csökkentésére vonatkozik, amely majd az alapanyag költségben realizálódik. Az értékelés az alábbi összefüggés alapján történik, amely a $V_{i(g)}$ generált megoldás térfogatát az eredeti alkatrész V_0 térfogatához viszonyítva százalékos formában megmutatja, hogy milyen mértékű volt az $a_{i(cs)}$ anyagtakarékosság. Minél nagyobb a százalékos érték, az alkatrész annál előnyösebb:

$$a_{i(cs)} = \left[1 - \frac{V_i}{V_0} \right] \cdot 100. \quad (96)$$

A gazdasági értékelés második szempontja az alkatrész előállításához szükséges szerszámköltségére vonatkozik. A felhasznált gyártástechnológiák tekintetében a szerszámköltségek széles skálán mozognak, így a rá vonatkozó értékelési szempont aránypárok megfogalmazása alapján hasonlítja össze az egyes megoldásokat. Az értékelés az alábbi költség rangsor alapján történik, ahol $K_{sz(öntés)}$ az öntőszerszám költsége, a $K_{sz(forg.)}$ a forgácsolószerszámok költsége és a $K_{sz(additív)}$ a fémnyomtatás szerszámozási költsége. Az értékelés során minél kisebb az alkatrész előállításához szükséges szerszámköltség, annál nagyobb pontértéket érdemel:

$$K_{sz(additív)} < K_{sz(forg.)} < K_{sz(öntés)}. \quad (97)$$

A gazdasági értékelés harmadik szempontja az alkatrész előállításához megkövetelt berendezés gépköltségre vonatkozik. A különféle eljárások más és más gépparkot igényelnek, ezért az értékelés az alábbi költség rangsor alapján történik, ahol $K_g(öntés)$ az öntőszerszám költsége, a $K_g(forg.)$ a forgácsolószerszámok költsége és a $K_g(additív)$ a fémnyomtatás gépköltsége. Az értékelés során minél kisebb az alkatrész előállításához szükséges gépköltség, annál nagyobb pontértéket érdemel:

$$K_g(öntés) < K_g(forg.) < K_g(additív). \quad (98)$$

A gazdasági értékelési szempontokat és azok súlyfaktorát a 11. táblázat foglalja össze.

11. táblázat. A gazdasági értékelési szempontok és azok súlyértéke

<i>Gazdasági értékelési szempont</i>	<i>Sorszám</i>	<i>Súlyfaktor</i>
Anyagtakarékosság	g_1	0,35
Szerszámköltség	g_2	0,25
Gépköltség	g_3	0,4

A generált megoldások kiértékelését a 12. táblázat foglalja össze. Az egyes megoldások értékelése 1-10 skálán történik, amely során az elért pontszám egyenesen arányos az értékelés és rangsorolás alapjául szolgáló számszerű adatokkal.

12. táblázat. Műszaki és gazdasági értékelés összefoglalása

<i>Megoldás</i>	<i>Műszaki érték</i>				<i>Gazdasági érték</i>			<i>Összesített értékvektor</i>
	$m\ddot{u}_1$	$m\ddot{u}_2$	$m\ddot{u}_3$	$m\ddot{u}_4$	g_1	g_2	g_3	
M1	0,5	1,25	0,5	0,15	1,05	0,25	2	0,408
M2	1	1,75	3,5	0,15	0,35	0,25	2	0,69
M3	0,1	1	2	1,5	2,1	2,5	4	0,975
M4	0,2	2,5	5	1,5	3,5	2,5	4	1,358
M5	0,3	1,25	2,5	0,75	2,8	1,25	0,4	0,654
M6	0,5	2,5	5	0,75	3,15	1,25	0,4	0,998

A 12. táblázat megmutatja, hogy az egyes megoldások milyen súlyozott értéket képviselnek az egyes műszaki és gazdasági szempontok alapján. A részletes értékelés a A8 mellékleten látható, amely alapján a legjobb konstrukciónak az M4 megoldás bizonyul. Az M4 optimált alkatrész forgási energiáját összehasonlítva az eredeti alkatrészével, meghatározható a ψ_4 forgási energia csökkenés százalékos értéke:

$$\psi_4 = \left[1 - \frac{E_{f4}}{E_{f0}} \right] \cdot 100. \quad (99)$$

Az optimalás hatására a szerszámváltó kar mozgásához szükséges energia tekintetében 95,2 %-os csökkenés állapítható meg, amely kiemelkedő eredménynek bizonyul a szerszámgépészetben kitűzött energiahatékonyság növelésében, az ökológiai lábnyom csökkentésében, avagy a „zöldebb” működésben.

7. ÖSSZEFOGLALÁS

A műszaki tervezés célja, hogy olyan optimális megoldást szolgáltatson egy adott műszaki problémára, hogy a társadalom igények kielégítésén kívül feleljen meg a jelenkor műszaki tudományok fejlettségi szintjének is. Egy műszaki tervezés és fejlesztési feladat sikeres elvégzéséhez ismerni kell a megoldáshoz vezető gondolatmenet logikai lépéseit, amely a megoldásokat szolgáltatja az adott feladatra vonatkozóan. A tervezés teljes eszközszerét a különféle iCAD tervezői programcsomagok és ezen rendszerekbe integrálódott CAXx célszoftverek alkotják, amelyek közé sorolandó a topológiai optimálási modul és az arra épülő generatív tervezési modul is. Ezek az eszközök képviselik a szimuláció vezérelt tervezési folyamatot, amely során nagy darabszámú virtuális prototípus segítségével lehet megoldani egy műszaki tervezési vagy fejlesztési feladatot.

A disszertáció célja a generatív tervezési módszerek feltárása, amely arra keresi a választ, hogy milyen tervezési szemlélet képviselőjében és milyen tervezői lépésekben célszerű megoldani a feladatot. A kutatásom során feltártam a történelmi előzményeket, amely alapján irodalmi áttekintést fogalmaztam meg a tervezésmódszertan és a topológiai optimálás fejlődésére vonatkozóan. Megvizsgáltam a tervezési szemléletek legfőbb társadalomtudományi és természettudományos szemléleteit, amelyek rendszerébe foglaltam a generatív tervezést és annak szemléletét. Fókuszálva a műszaki gyártmányok tervezésére megvizsgáltam a soros, párhuzamos és a generatív tervezési folyamatok logikai lépéseit és feladatait, amelyet egy összehasonlítással összegeztem. Kutatást végeztem a számítógéppel támogatott generatív tervezés témájában, amely során összefoglaltam az eljárás alapját jelentő topológia optimálás elméleti alapjait és azok különféle típusait. Összefoglaltam a generáló szoftverek fejlődésének és integrálódásának folyamatát és tanulmányoztam a legelterjedtebb iCAD rendszerek generatív tervezési moduljainak felépítését és annak használatához szükséges lépéseit, amelyet folyamatábrával jellemeztem. Egy automata szerszámcserélő mechanizmus fejlesztésére vonatkozó esettanulmány segítségével megvizsgáltam a generatív tervezés szerepét a szerszámgéptervezés tudományában. A tanulmány során új módszertani leírásmódot alkalmaztam. Az előállított megoldásokra vonatkozóan értékelési szempontokat fogalmaztam meg, amely során előállítottam az optimális megoldást.

A disszertáció során olyan módszeres leírásmódot javasoltam, amely kiegészíti a klasszikus módszertani leírásokat. A generatív tervezést a szakma „paradigma váltás” jelzővel illeti, amelyet elsődlegesen a leírásmódban, tehát a lehetséges megoldások kódolásában kell keresni. Az ajánlott módszer és szemlélet segítséget nyújthat az amorf és szabályos geometriák permutációjából felépülő konstrukciók és gyártmányok módszeres leírásában, megkülönböztetésében, jellemzésében és azok értékelésében.

A további fejlesztési lehetőség a konstrukciókra és megoldásokra vonatkozó új leírásmód és értékelési jellemzők különféle topológiai optimáló és generatív tervezési modulokba való integrálása lehetne. A szoftverbe ágyazás segítséget nyújthatna a szimulációs modell kódolás alapján történő módszeres felépítésében és azok objektív értékelésében. A relatív biztonság és valós biztonság értékét befolyásoló gyárthatósági jellemzők pontos meghatározása javítaná a várható eredmények tulajdonágainak becslését.

8. TÉZISEK – ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

T1. Generatív tervezési eljárással előállított konstrukciókra vonatkozóan kidolgoztam egy új elvű leírásmódot és bevezettem az $\mathbf{X}$ konstrukciós tér kapcsolati mátrixot, amely a tervezési teret alaphalmazra, részhalmazokra és valódi részhalmazra bontja. Az $\mathbf{X}$ mátrixban az egyes halmazok argumentumai a funkciók bináris kódolásával kerülnek meghatározásra.

$$\mathbf{X} = \begin{matrix} & F_1 & F_2 & F_3 & F_i & F_n \\ \begin{matrix} H \\ A \\ B \\ C \\ D \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

- Az $\mathbf{X}$ konstrukciós tér kapcsolati mátrix első sora minden esetben az alaphalmaz, amely az alkatrészre vonatkozó teljes tervezési térfogatot testesíti meg. A további sorok az egyes részhalmazokat tartalmazzák, amelyek ez egyes konstrukciós geometriákat reprezentálják. A mátrix oszlopain helyezkednek el az alkatrész funkciói. Az egyes mátrix elemek bináris értéket vehetnek fel, amely 1, ha az adott részhalmaz tartalmazza a funkciót, ellenkező esetben 0 értéket képvisel.
- A kötött geometriákat a tervező szabadon határozhatja meg. Ez az alkotói szabadság sok esetben irányulhat az esztétika, mint funkció kielégítésére. A funkciók kapcsolatát leíró részhalmazok nem rangsorolják az egyes kapcsolatokat, csupán azok megléte a fontos. A funkciók gráf, egyenlet és struktúra mátrix leírásában szereplő logikai kapcsolatok nem korlátozzák a részhalmazok felállítását, csupán segítséget nyújthatnak abban, hogy milyen szegmentálást és csoportosítást hozzanak létre az egyes konstrukciós geometriák. Abban az esetben, amikor két funkcióhoz csatolt alaksajátosságok szorosan kapcsolódnak egymáshoz, esetleg egymáson helyezkednek el, a szétválasztás nem indokolt.
- Az $\mathbf{X}$ mátrix egyes sorait kiemelve létrehozhatók a konstrukciós geometriákra vonatkozó funkció kapcsolati vektorok.

T2. Generatív tervezési eljárással előállított konstrukciókra vonatkozóan bevezettem a $\mathbf{G}$ generált kapcsolati mátrixot, amely leírja az előállított megoldások funkciói és a konstrukciós térfogatok közötti szoftver által generált anyagi kapcsolatot.

$$\mathbf{G} = \begin{matrix} & F_1 & F_2 & F_3 & F_i & F_n \\ \begin{matrix} H \\ A \\ B \\ C \\ D \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ x & 0 & x & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & x \\ x & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

- A $\mathbf{G}$ generált kapcsolati mátrix első sora minden esetben az alaphalmazt tartalmazza, amely az alkatrészre vonatkozó teljes tervezési térfogatot testesíti meg. A további sorok az egyes részhalmazokat tartalmazzák, amelyek az egyes konstrukciós geometriákat képezik. A mátrix oszlopain helyezkednek el az alkatrész funkciói. Az egyes mátrix elemek bináris értéket vehetnek fel, amely x , ha az adott részhalmaz kapott szoftver által generált kapcsolatot az adott funkcióval, ellenkező esetben 0 értéket képvisel.
- T3. Generatív tervezési eljárásokkal előállított konstrukciókra vonatkozóan bevezettem az $\mathbf{M}$ megoldás mátrixot, amelyet az $\mathbf{X} + \mathbf{G} = \mathbf{M}$ összefüggéssel származtattam. A $\mathbf{M}$ mátrix leírja a generált megoldások funkcióinak és konstrukciós geometriáinak kapcsolatát úgy, hogy különbséget tesz az előre definiált és a szoftver által generált anyagi kapcsolatok között.

$$\mathbf{M} = \begin{matrix} & F_1 & F_2 & F_3 & F_i & F_n \\ \begin{matrix} H \\ A \\ B \\ C \\ D \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} + \begin{matrix} & F_1 & F_2 & F_3 & F_i & F_n \\ \begin{matrix} H \\ A \\ B \\ C \\ D \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ x & 0 & x & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & x \\ x & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{matrix} & F_1 & F_2 & F_3 & F_i & F_n \\ \begin{matrix} H \\ A \\ B \\ C \\ D \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ x & 0 & x & \dots & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & x \\ x & 0 & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

- Az $\mathbf{M}$ mátrix elemei 0, 1 és x karaktert vehetnek fel. Amennyiben egy mátrixelem értéke 1, az adott részhalmaz tartalmazza a funkciót és a kapcsolat előre definiált peremfeltételnek minősül, máskülönben 0 értéket képvisel. Amennyiben egy mátrix elem x karaktert tartalmaz, akkor az egy szoftver által generált funkció és konstrukciós tér kapcsolat.
- T4. Generatív tervezési eljárásokkal előállított konstrukciókra vonatkozóan bevezettem az $\mathbf{F}_g$ generált funkcióstruktúra mátrixot. Az $\mathbf{F}_g$ mátrix a módszeres tervezés tudományterületén elterjedt leírásmódot egészíti ki azáltal, hogy a funkciókapcsolatok esetén különbséget tesz az előre definiált és a szoftver által generált anyagi kapcsolatokban. Az $\mathbf{F}_g$ mátrix felírását az $\mathbf{M}$ mátrix segíti.

$$\mathbf{F}_g = \begin{matrix} & F_1 & F_2 & F_3 & F_i & F_n \\ \begin{matrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ F_j \\ F_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & x & \dots & 1 \\ x & 0 & 1 & \dots & x \\ 1 & x & 0 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & 0 & \dots \\ x & 1 & x & \dots & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

- Az $\mathbf{F}_g$ generált funkcióstruktúra mátrix főátlója 0 elemeket tartalmaz. A mátrix oszlopait és sorait a generált alkatrészt felépítő funkciók képezik. Az egyes mátrix elemek 0, 1 és x értéket vehetnek fel. Ha az érték 1, akkor az adott sorhoz és oszlophoz tartozó funkciók között előre megadott anyagkapcsolat van. Ha egy mátrix elem x értéket képvisel, akkor az adott sorhoz és oszlophoz tartozó funkciópáros között a szoftver által generált anyagkapcsolat jött létre. 0 érték esetén a funkciópáros között nincs közvetlen anyagi kapcsolat.

T5. Generatív tervezési eljárással előállított termékek és alkatrészek értékelési rendszereként kidolgoztam geometriai és fizikai tulajdonságokból származtatható jelzőket. Bevezettem a geometriai sajátosságból meghatározható $g_{(k)}$ generálási kötöttség, a $g_{(sz)}$ generálási szabadság és a γ_i generáltsági fok fogalmakat. Bevezettem a fizikai tulajdonságok alapján számítható $b_{i(r)}$ relatív biztonsági tényezőt és a $b_{i(v)}$ valós biztonsági tényező fogalmát.

$$g_{(k)} = \left[\frac{V_{i(k)}}{V_o} \right] \cdot 100, \quad g_{(sz)} = \left[1 - \frac{V_{i(k)}}{V_o} \right] \cdot 100 \quad \text{és} \quad \gamma_i = \left[\frac{V_{i(ga)}}{V_{i(k)}} \right] \cdot 100$$

- A $g_{(k)}$ százalékos formában megadja a $V_{i(k)}$ konstrukciós terek által megkötött térfogatot a kiinduló V_o tervezési térfogathoz képest. A $g_{(sz)}$ generálási szabadság a $g_{(k)}$ inverze, amely százalékos formában megadja a $V_{i(k)}$ konstrukciós terek által megkötött térfogat függvényében a szoftver által szabadon generálható V_o tervezési térfogatot. A $g_{(k)}$ és a $g_{(sz)}$ az $\mathbf{X}$ mátrix alapján leírt geometriából származtatható. A két paraméter fontos jelzője egy topológia optimált alkatrésznek, hiszen alapvető viszonyítási alapként szolgál a tervezési és értékelési szakaszokban.
- A γ_i generáltsági fok megmutatja, hogy a kötött konstrukciós térfogatokhoz képest milyen arányban van a szoftver által létrehozott anyagmennyiség. Az eredményt a $V_{i(ga)}$ generált anyag és $V_{i(k)}$ konstrukciós terek térfogathányada adja meg százalékos formában. A γ_i az $\mathbf{M}$ mátrix alapján leírt geometriából származtatható.

$$b_{i(r)} = \frac{\sigma_{meg}}{\sigma_{i(max)}} \geq 1 \quad \text{és} \quad b_{i(v)} = \frac{R_{p0,2}}{\sigma_{i(max)}}, \quad \text{ahol:} \quad \sigma_{meg} = \frac{R_{p0,2}}{b}$$

- A relatív biztonsági tényező megmutatja a generálás előtt megadott σ_{meg} megengedett feszültségérték és az i -edik generált konstrukcióban kialakuló $\sigma_{i(max)}$ maximális feszültség különbségét. A két feszültségérték közötti különbség megmutatja, hogy statikai szempontból mekkora tartalék van a rendszerben. A különbség valójában a geometriára vonatkozó kényszerek és korlátok eredménye, amelyet a megválasztott gyártástechnológiához rendelt gyárthatósági szabályok határoznak meg. Az i -edik konstrukcióra vonatkozó $b_{i(v)}$ valós biztonsági tényezőt, az anyag folyáshatárához viszonyítva lehet értelmezni. Ez a két jelző a módszeres tervezés értékelési szakaszában megfelelő értékelési szempont lehet, amelyek segítségével objektív módon osztályozhatók az egyes megoldások (27).

9. SUMMARY

The goal of technical design is to provide an optimal solution to a given technical problem that considers the needs of society and meets the level of development of current technical sciences. The logical steps, which leads to the results and provides solutions for the given problem, must be known to successfully complete a technical design and development task. The entire design tool system consists of various iCAD design software packages and the CAxx target software integrated into these systems, including generative design module, which is based on the topology optimization module of the software. These represent the simulation-driven design process, during which a technical design or development task can be solved using many kinds of virtual prototypes.

The aim of the dissertation is to explore generative design methods, which seek to answer the question of which design approach and its steps are the most appropriate in order to solve a given problem. During my research, the historical background was explored, based on which literature review was formulated as regards for the development of design methodology and topology optimization. The main social and natural science approaches of design methodology were studied, including generative design and its approach in the system. Focusing on the design of technical products, the logical steps and tasks of serial, parallel and generative design processes were conducted, which is summarized by a comparison. Research on the field of CAD generative design was conducted with consideration of the theoretical basis of topology optimization as well as its different types. The development and integration process of generative software were summarized, and the structure of the generative design modules of the most common iCAD systems and the steps required for the usage of these were characterized by a flowchart. The role of generative design in science of machine tool design was examined by a case study on the development of an automatic tool changer mechanism. New methodological descriptions were applied in the study. For the produced results, evaluation criteria were formulated, and the optimal solution was created.

In the course of the dissertation, a methodological description was proposed, that complements classical methodological descriptions. In the professional world, generative design is referred to as a “paradigm shift”, which must be sought primarily in the way it is described, i.e. in the coding of possible solutions. The recommended method and approach can provide support in case of systematic description, differentiation, characterization and evaluation of constructions and products built from the permutation of amorphous and regular geometries.

A further development opportunity could be the integration of new notation and evaluation features for constructions and solutions into various topological optimization and generative design modules. Embedding in software could help in the systematic construction of simulation models based on coding and their objective evaluation. Precise determination of the manufacturability characteristics that influence the value of relative safety and real safety would improve the estimation of the properties of the expected results.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Elsősorban szeretném köszönetemet kifejezni témavezetőmnek Dr. Hegedűs Györgynek, aki folyamatos segítséggel és szakmai tanácsokkal látott el a kutatómunkám során.

Köszönet illeti Dr. Takács Györgyöt és Dr. Szilágyi Attilát, akik bevezettek a Szerszámgépek Intézeti Tanszék kutatási és fejlesztési tevékenységeibe, amely a tudományos pályafutásom kezdetét jelentette. Dr. Takács György folyamatos szakmai tanácsadással és útmutatással segítette a munkámat. Köszönöm továbbá kollégáim segítségét, akik közül kiemelném Dr. Rónai Lászlót, aki lektorálással és építő kritikákkal segítette a disszertációm elkészítését.

Szeretném megköszönni családom támogatását, akik közül külön köszönet illeti feleségemet, aki folyamatos támogatást nyújtott és biztatott az elém gördülő akadályok legyőzésében. Köszönöm szüleimnek, hogy megteremtették azt a családi háttérrel, amely támogathatta a szakmai pályafutásomat.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Kesselring, F.: *Die starke Konstruktion*, 1942.
- [2] VDI 2225 BLATT 3: *Konstruktionsmethodik -Technisch-wirtschaftliches Konstruieren – Technisch-wirtschaftliche Bewertung*, 1998.
- [3] Wögerbauer, H.: *Die Technik des Konstruierens*, München, Berlin, 1943.
- [4] Biniek, G.: *Konstruktionssystematik*. Feingerätetechnik, 1952.
- [5] Cross, N.: *History of design methodology*, Behavioral and social Sciences, Vol. 71., Kluwer Academic Publishers, Netherlands, (1993), DOI:10.1007/978-94-015-8220-9_2.
- [6] Hansen, F.: *Konstruktionssystematic – Grundlagen für eine allgemeine Konstruktionslehre*, ETO 621.002.2, VEB Verlag Technik, Berlin, 1965.
- [7] Rodenacker, W. G.: *Methodisches Konstruieren*, 2. kiadás, Springer Verlag, Berlin, (1976), ISBN 3 540 07513 5.
- [8] Pahl, G.; Beitz W.: *Konstruktionslehre – Handbuch für Studium und Praxis*, Springer-Verlag, Berlin, (2007), ISBN 963 10 3796 7, DOI: 10.1007/978-3-662-57303-7.
- [9] Hubka, V.; Eder, W. E.: *Einführung in die Konstruktionswissenschaft*, Springer-Verlag, Berlin, (1992), ISBN 3 54054832 7.
- [10] Hubka, V.: *Theorie der Maschinensysteme– Grundlagen einer wissenschaftlichen Konstruktionslehre*, Springer-Verlag, Berlin, (1973), ISBN 3 540 06122 3.
- [11] Roth, K.: *Konstruieren mit Konstruktionskatalogen*, VEB Verlag Technik, Berlin, (1982), ISBN 963 10 7246 0.
- [12] Althsuller, G. S.; Shapiro, R.V.: *About a technology of creativity*, Questions of Psychology, No.6., 1956.
- [13] Linde, H.; Hill, B.: *Erfolgreich erfinden – Widerspruchsorientierte Innovationstrategie für Entwickler und Konstrukteure*, Hoppenstedt Technik Tabellen Verlag, Darmstadt, 1993.
- [14] Bercsey, T.: *A tervezésemélet és a CAD oktatása*, GÉP, Vol. 40., No 10., 1988.
- [15] Bercsey, T.: *A gépszerkesztés tudományának fejlődése és jellemző vonásai*. GÉP Vol. 42., No. 2., 1990.
- [16] Bercsey, T.; Lirincz, S.: *A terméktervezés megújulás: az új alapelvek és integrált módszerek*, Gyártástechnológia, No 7-8., 1996.
- [17] Bercsey, T.; Döbröczöni, Á.; Dupcsák, ZS.; Horák, P.; Kamondi, L.; Kelemen. T.; Péter, J.; Tóth, J.: *Terméktervezés és fejlesztés*, PHARE TDQM, Budapest, 1997.
- [18] Bercsey, T.; Döbröczöni, Á.; Dupcsák, ZS.; Horák, P.; Kamondi, L.; Péter, J.; Scholtz, P.: *Új termék kifejlesztése és bevezetése, a piacra vitel ideje és az azt meghatározó tényezők*, PHARE TDQM, Miskolc, 1997.
- [19] Bercsey, T.; Vajna, S.: *Ein autogenetischer Ansatz für die Konstruktionslehre*. Teil I. CAD-CAM Report, Vol. 13., Nr. 2. 1994., Teil II. CAD-CAM Report, Vol. 13., Nr. 3. 1994.
- [20] Vajna, S.; Bercsey, T.; Clement, S.; Jordan, A.; Mack, P.: *Autogenetische Konstruktionstheorie ein Beitrag für eine erweiterte Konstruktionstheorie*, Konstruktion, Springer-Verlag, March 3, (2004) pp. 71-77.

- [21] Bercsey, T.; Horváth, I.: *A korszerű géptervezés feltételei, módszerei és eszközrendszere*, GÉP, Vol. 37., No 11., 1985.
- [22] Kamondi, L.: *Tervezéselmélet*, Phare HU0008-02, Miskolc, 2003.
- [23] Kamondi, L.; Döbröczöni, Á.; Takács, Á.: *Objektum semleges géptervezés*, Miskolc, 2006.
- [24] Tajnafői, J.: *Mechanizmusok származtatáselméletének alapjai és hatása a kreatív gondolkodásra*, Akadémiai doktori értekezés, Miskolc, 1991.
- [25] Tajnafői, J.: *Szerszámgéptervezés I.*, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest 1973.
- [26] Tajnafői, J.: *Szerszámgéptervezés II.*, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest 1990.
- [27] Lipóth, A.: *Megmunkáló központ konstrukciós változatok módszeres előállítása és értékelése*, kandidátusi értekezés, Budapest, 1993.
- [28] Takács, GY.: *Szerszámgépek strukturális tervezése grafikus adatbázisokkal*, egyetemi doktori értekezés, Miskolc, 1996.
- [29] Takács, Á.: *Számítógéppel segített koncepcionális tervezési módszer*, egyetemi doktori értekezés, Miskolc, 2009.
- [30] Furka, Á.: *A kombinatorikus kémia*, Természet világa, Vol. 131, 2000.
- [31] Furka, Á.: *Visszapillantás a kombinatorikus kémia kialakulásának korai időszakára*, Kémikusok Lapja, Vol. 56, 2001.
- [32] Nagy, L.: *Személygépjármű indítómotorok fejlesztése*, PhD értekezés, Miskolc, 2015.
- [33] Zsáry, Á.: *Gépelemek I.*, Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest, 1989.
- [34] Dömötör, Cs.: *Természeti analógiák adatbázisa, statisztikai elemzése és alkalmazási módszerei a koncepcionális tervezésben*, PhD értekezés, Miskolc, 2014.
- [35] Otto, N. K., Wood, L. K.: *Product Design, Techniques in Reverse Engineering and New Product Development*, (2001), ISBN 978-81-7758-821-7.
- [36] Gotthard, V.: *Moduláris felépítésű gyártósorok tervezésének elmélete és gyakorlata*, PhD értekezés, BME, 2008.
- [37] Michell, A. G. M.: *The limits of economy of material in frame-structures*, Philosophical Magazine, Vol. 8 (47), (1904) pp. 589-597.
- [38] Schmit, L. A.: *Structural Design by Systematic Synthesis*, Proceedings, 2nd Conference on Electronic Computation, ASCE, New York, (1960) pp. 105-132.
- [39] Schmit, L. A. and Thornton, W. A.: *Synthesis of an Airfoil at Supersonic Mach Number*, NASA CR 144, January 1965.
- [40] Fox, R. L.: *Constraint Surface Normals for Structural Synthesis Techniques*, AIAA Journal, Vol. 3, No. 8, (1965), pp. 1517-1518.
- [41] Lee, V. A., Wadsworth, A. E., Moran, W. J. and McLeod, J. D.: *Computerized Aircraft Synthesis*, AIAA J. Aircraft, Vol. 4, September-October (1967), pp. 402-408.
- [42] Fox, R. L., & Kapoor, M. P.: *Rates of change of eigenvalues and eigenvectors*. AIAA Journal, 6 (12), (1968) pp. 2426-2429. DOI:10.2514/3.5008.
- [43] Thornton, W. A. and Schmit, L. A.: *The Structural Synthesis of an Ablating Thermostructural Panel*, NASA CR-1215, 1968.
- [44] Venkayya, V. B., Khot, H. S., and Reddy, V. S.: *Optimization of Structures Based on the Study of Energy Distribution*, Proceedings, 2nd Conference on Matrix Methods in Structural Mechanics, WPAFB, AFFDL-TR-68-150, S.S.A.F., (1969) pp. 111-153.
- [45] Gallatly, R. A., Berke, L., Gibson, W.: *The Use of Optimality Criteria in Automated Structural Design*, Proceedings of the 3rd Conference on Matrix Methods in Structural Mechanics, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, 1971.
- [46] Fleury, C. and Sander, G.: *Relations between Optimality Criteria and Mathematical Programming in Structural Optimization*, Proceedings, Symposium on Applications of Computer Methods in Engineering, California, 1977.

- [47] Shelangoskie, D. L.: *Approximation Methods of Structural Synthesis*, M. S. Thesis, Case Institute of Technology, Cleveland, OH, 1971.
- [48] Rozvany, G. I. N.: *Grillages of maximum strength and maximum stiffness*. International Journal of Mechanical Sciences, 14 (10), (1972) pp. 651–666. doi:10.1016/0020-7403(72)90023-9.
- [49] Picket, R. M., Jr., Rubinstein, M. R. and Nelson, R. B.: *Automated Structural Synthesis Using a Reduced Number of Design Coordinates*, AIAA Journal, Vol. 11, No. 4, (1973), pp. 489-494.
- [50] Schmit, L. A., Farshi, B.: *Some Approximation Concepts for Structural Synthesis*, AIAA J., Vol. 12, No. 5, (1974) pp. 692-699.
- [51] Vanderplaats, G. N., and Hicks, R. M.: *Numerical Airfoil Optimization Using a Reduced Number of Design Coordinates*, NASA TM X-73,151, 1976.
- [52] Vanderplaats, G. N.: *Automated Optimization Techniques for Aircraft Synthesis*, AIAA Paper 76-909, AIAA Aircraft Systems and Technology Meeting, Dallas, Texas, September 27-29, 1976.
- [53] Nelson, R. B.: *Simplified Calculation of Eigenvector Derivatives*, AIAA J., Vol. 14, No. 9, September (1976), pp. 1201-1205. DOI:10.2514/3.7211.
- [54] Prager, W., & Rozvany, G. I. N.: *Optimization of Structural Geometry*. Dynamical Systems, (1977) pp. 265–293. doi:10.1016/b978-0-12-083750-2.50023-0.
- [55] Vanderplaats, G. N.: *Efficient Algorithm for Numerical Airfoil Optimization*, AIAA J. Aircraft, Vol. 16, No. 2, December 1979, pp. 842-847.
- [56] Arora, J. S., and E. J. Haug: *Methods of Design Sensitivity Analysis in Structural Optimization*, AIAA Journal, Vol. 17, No. 9, (1979), pp. 970-974. DOI: 10.2514/3.61260.
- [57] Vanderplaats, G. N.: *Comment on Methods of Design Sensitivity Analysis in Structural Optimization*, AIAA Journal, Vol. 18, No. 11, November 1980, pp. 1406-1407.
- [58] Schmit, L. A.: *Structural Synthesis - Its Genesis and Development*, AIAA Journal, AIAA 81-4270, Vol. 19, (10) (1981) pp. 1249-1263.
- [59] Bofang, Z. and Zhanmei, L.: *Optimization of Double-Curvature Arch Dams*, (In Chinese), Chinese Journal of Hydraulic Engineering, No. 2, (1981), pp. 11-21.
- [60] Sobieszcanski-Sobieski, J.: *A Linear Decomposition Method for Large Scale Optimization Problems – Blueprint for Development*, NASA Technical Memorandum 83, (248), 1982.
- [61] Strang, G., & Kohn, R. V.: *Hencky-Prandtl nets and constrained Michell trusses*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 36 (2), (1983) pp. 207–222. doi:10.1016/0045-7825(83)90113-5.
- [62] Vanderplaats, G. N., Salejgheh: *A New Approximation Method for Stress Constraints in Structural Synthesis*, AIAA J., Vol. 27, No. 3, (1989) pp. 352-358.
- [63] Bendsoe, M. P., Kikuchi, N.: *Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 71(2), (1988) pp. 197–224. doi:10.1016/0045-7825(88)90086-2.
- [64] Bendsoe, M.P.: *Optimal shape design as a material distribution problem*. Structural and Multidisciplinary Optimization, (1989), 1:193-202. DOI: 10.1007/BF01650949.
- [65] Zhou, M., Rozvany, G.I.N.: *The COG algorithm, Part II: Topological, geometrical and general shape optimisation*. Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., 89, (1991) pp. 309-336.
- [66] Canfield, R. A.: *High-Quality Approximations of Eigenvalues in Structural Optimization*, AIAA J., Vol. 28, No. 6, (1990) pp. 1116-1122. doi.org/10.2514/3.25175.
- [67] Rozvany, G. I. N., Zhou, M., Birker, T.: *Generalized shape optimization without homogenization*. Structural Optimization, 4(3-4), (1992) pp. 250–252. doi:10.1007/bf01742754.
- [68] Rozvany, G. I. N., Birker, T.: *On singular topologies in exact layout optimization*. Structural Optimization, 8(4), (1994) pp. 228–235. doi:10.1007/bf01742707.
- [69] Haber, R. B., Jog, C. S., Bendsoe, M. P.: *A new approach to variable topology shape design using a constraint on perimeter*. Structural Optimization, 11(1-2), (1996) pp. 1-12. doi.org/10.1007/BF01279647.

-
- [70] Vanderplaats, G. N.: *EMDO – An Engineering Approach to Multidisciplinary Design Optimization*, 11th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference, Portsmouth, VA, September 5-8, 2006.
 - [71] Hassani B., Hinton E.: *Homogenization and structural topology optimization: theory, practice and software*. Springer, 1998.
 - [72] Bendsøe MP., Sigmund O.: *Topology optimization: theory, method and applications*. Springer, (2003), ISBN: 978-3-642-07698-5, DOI: 10.1007/978-3-662-05086-6.
 - [73] Christensen PW, Klarbring A.: *An introduction to structural optimization*. Springer, (2009), DOI: 10.1007/978-1-4020-8666-3.
 - [74] Sigmund O.: *A 99 line topology optimization code written in matlab*. Struct Multidiscip Optim 21 (2), (2001) pp. 120–127. DOI: 10.1007/s001580050176.
 - [75] Wang MY., Chen S., Xia Q.: *Structural topology optimization with the level set method*, (2004), doi.org/10.1007/s00466-008-0287-x.
 - [76] Zhou S., Wang MY.: *3d structural topology optimization with the simp method*, 2005.
 - [77] Liu Z., Korvink JG., Huang I.: *Structure topology optimization: fully coupled level set method via FEMLAB*. Struct Multidiscip Optim 6 (29), (2005) pp. 407–417. doi.org/10.1007/s00158-004-0503-z.
 - [78] G. Allaire, O. Pantz: *Structural optimization with FreeFem ++*, Struct Multidisc Optim 32, (2006) pp. 173–181., DOI 10.1007/s00158-006-0017-y.
 - [79] Hunter W.: *Predominantly solid-void three-dimensional topology optimisation using open source software*. Master's thesis, University of Stellenbosch, 2009.
 - [80] Challis VJ.: *A discrete level-set topology optimization code written in matlab*. Struct Multidiscip Optim 41 (3), (2010) pp. 453–464. DOI 10.1007/s00158-009-0430-0.
 - [81] Suresh K.: *A 199-line matlab code for pareto-optimal tracing in topology optimization*. Struct Multidiscip Optim 42, (2010) pp. 665–679. DOI: 10.1007/s00158-010-0534-6.
 - [82] Sokół T.: *A 99 line code for discretized michell truss optimization written in mathematica*. Struct Multidiscip Optim 43 (2), (2011) pp. 181–190. DOI: 10.1007/s00158-010-0557-z.
 - [83] Andreassen E., Clausen A., Schevenels M., Lazarov BS., Sigmund O.: *Efficient topology optimization in matlab using 88 lines of code*. Struct Multidiscip Optim 43 (1), (2011) pp. 1–16. DOI: 10.1007/s00158-010-0594-7.
 - [84] Talischi C., Paulino GH., Pereira A., Menezes IFM.: *Polymesher: a general-purpose mesh generator for polygonal elements written in matlab*. Struct Multidiscip Optim 45, (2012) pp. 309–328. DOI: 10.1007/s00158-011-0706-z.
 - [85] Aage N., Nobel-Jørgensen M., Andreassen CS., Sigmund O.: *Interactive topology optimization on hand-held devices*. Struct Multidiscip Optim 47(1), (2013) pp. 1–6. DOI: 10.1007/s00158-012-0827-z.
 - [86] Kai Liu, Andr es Tovar: *An efficient 3D topology optimization code written in Matlab*, Struct Multidisc Optim, (50), (2014) pp. 1175–1196. DOI: 10.1007/s00158-014-1107-x.
 - [87] Némethné Erd di, K.: *Term ktervez si módszerek min s g gyi fejlesztése*. PhD  rtekez s. NymE – CJDI. (2009), pp. 20-29.
 - [88] Veryzer Jr., R. W.: *Discontinuous innovation and the new product development process*. Journal of Product Innovation Management (15), (1998) pp. 304-321.
 - [89] Brown, S. L. – Eisenhardt, K. M.: *Product Development: Past research, present findings, and future directions*. The Academy of Management Review 20 (2) (1995), pp. 343-378..
 - [90] Bracke, S., Hinz, M., Inoue, M., Patelli, E., Kutz, S., Gottschalk, H., Ulutas, B., Hartl, C., M rs, P., Bonnaud, P.: *Reliability engineering in face of shorten product life cycles: Challenges, technique trends and method approaches to ensure production, Risk, Reliability and Safety: Innovating Theory and Practice* Walls, Revie & Bredford (Eds.) Taylor&Francis Group, London (2017), pp. 2284-289. 1. ISBN: 978-1-138-02997-2.

- [91] Cooper, R.: From experience: *The invisible success factors in product innovation*. Journal of Product Innovation Management 16 (1999), pp. 115-133. DOI: 10.1111/1540-5885.1620115.
- [92] Ayağ, Z.: *An integrated approach to concept evaluation in a new product development*. Journal of Intelligent Manufacturing 27 (5), (2014), pp. 991-1005. DOI: 10.1007/s10845-014-0930-7.
- [93] Roóz, J., Heidrich, B.: *Vállalati gazdaságtan és menedzsment alapjai*. Budapest, 2013.
- [94] Horák, P.: *Tervezés elmélet és módszertan 4. előadás* MGTm. Online jegyzet, (2010), http://gt3.bme.hu/wp-content/uploads/2016/06/MTGE_Ea_4.pdf.
- [95] Selye, J.: *Álomtól a felfedezésig – Egy tudós vallomásai*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1967.
- [96] Pólya, Gy.: *A gondolkodás iskolája – hogyan oldjunk meg feladatokat?* Akkord Kiadó, 2000, ISBN 963 7803 75 0.
- [97] Takács Gy., Zsiga Z., Szabóné M. I., Hegedős Gy.: *Gyártóeszközök módszeres tervezése*, Nemzeti Tankönyvkiadó, Miskolc, 2011.
- [98] Koller, R.: *Konstruktionsmethode für den Maschinen-, Geräte- und Apparatebau*, Springer-Verlag, Berlin, (1979), doi.org/10.1007/978-3-662-12183-2.
- [99] Koller, R.: *Konstruktionslehre für den Maschinenbau – Grundlagen zur Neu- und Weiterentwicklung technischer Produkte*, Springer-Verlag, Berlin, (1994), doi.org/10.1007/978-3-662-08165-5.
- [100] Deciu, E. R.; Ostorosi, E.; Ferney, M.; Gheorghe, M.: *Configurable product design using multiple fuzzy models*, Journal of Engineering Design, ISSN 0954-4828, Vol. 16., No. 2., (2005), DOI: 10.1080/09544820500031526.
- [101] Nagy, Sz.: *Evolúciós módszerek alkalmazása a szerkezetoptimalizálásban*, PhD értekezés, Miskolc, 2022.
- [102] Szabó, F. J.: *Evolúciós alapú eredményértékelés*, GÉP 67 (7-8), 2016. pp. 89-96.
- [103] Erdősné, S. Cs., Gyurecz, Gy., Janik, J., Körtélyesi, G.: *Mérnöki Optimalizáció*, egyetemi tananyag. 2012. ISBN 978-963-279-538-6.
- [104] Goldberg, D. E., Manohar, P. Samtani.: *Engineering optimization via genetic algorithm*, ASCE. (1986), pp. 471-482.
- [105] Holland, J.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, MIT Press. 1992. ISBN 978-0262581110.
- [106] Mitchell, Melanie.: *An Introduction to Genetic Algorithms*, MIT Press. (1996), ISBN 9780585030944.
- [107] Darwin, C. R.: *The origin of species by means of natural selection, or the preservation of favoured races in the struggle for life*, London. 1872.
- [108] Molnár, L.: *CAD alapjai*. Eduweb Multimédia Zrt. I. fejezet. www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0017_43_cad_alapok/ch01.html, 2012.
- [109] Kamondi, L., Sarka, F., Takács, Á.: *Fejlesztés-módszertani ismeretek*. Miskolci Egyetem, 2011.
- [110] Hegedűs, J., Kö, F.: *Az értékelemzésre alapozott terméktervezés módszertana*. Kecskeméti Főiskola, Műszaki Főiskolai Kar, 2001.
- [111] Miles, L. D.: *Értékelemzés*. Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó, Budapest, 1979.
- [112] Iványi, A. Sz.: *Az értékelemzés módszertana*, Tankönyvkiadó, Budapest, 1987.
- [113] Kovács, Zs.: *Termékszimuláció*. NymE-SKK Egyetemi előadás. <https://slideplayer.hu/slide/3039146/>, 2011.
- [114] Halliday, I.: *Getting the business benefits from rapid prototyping*. Proceeding of 4th European Conference on rapid prototyping and manufacturing. (1995), pp. 297-306.
- [115] Kumar, L., Kumar, V., Haleem, A.: *Rapid prototyping technology for new product development*. International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology 3 (1) (2016), pp. 287-292. ISSN 2348 – 7968.

- [116] Czvikovszky, T., Nagy, P., Gaál, J.: *A polimertechnika alapjai*. BME jegyzet. Kempelen Farkas Hallgatói Információs Központ, 2007.
- [117] Sigmund, O.: *Morphology-based black and white filters for topology optimization*. Struct Multidisp Optim, (33) (2007) pp. 401–424. doi.org/10.1007/s00158-006-0087-x.
- [118] Sigmund, O., Peterson, J.: Numerical instabilities in topology optimization: a survey on procedures dealing with checkerboards, mesh-dependencies and local minima. Struct Optim (16) (1998), pp. 68–75.
- [119] Brunsand, T., Tortorelli, D.: *Topology optimization of non-linear elastic structures and compliant mechanisms*. Comput Methods Appl Mech Eng 190 (26–27) (2001), pp. 3443–3459. DOI: 10.1016/S0045-7825(00)00278-4.
- [120] Norato J., Bendsøe M. P., Haber R. B., Tortorelli, D. A.: *Topological derivative method for topology optimization*. Structural and Multidisciplinary Optimization, (33) (2007), pp. 375–386. doi.org/10.1007/s00158-007-0094-6.
- [121] Takezawa A., Nishiwaki S., Kitamura M.: *Shape and topology optimization based on the phase field method and sensitivity analysis*. Journal of Computational Physics, (229) (2010) pp. 2697–2718. doi.org/10.1016/j.jcp.2009.12.017.
- [122] Xie Y. M., Steven G. P.: *A simple evolutionary procedure for structural optimization*. Computers and Structures, (49) (1993) pp. 885–896. doi.org/10.1016/0045-7949(93)90035-C.
- [123] Querin O. M., Steven G. P., Xie Y. M.: *Evolutionary structural optimization (ESO) using a bidirectional algorithm*. Eng Comput, (15) (1998), pp. 1031–1048. DOI: 10.1108/02644409810244129.
- [124] Sauter J.: *CAOS oder die Suche nach der optimalen Bauteilform durch eine effiziente Gestaltoptimierungsstrategie*. FEM '91, IKOSS CONGRESS, Baden-Baden, (1991), pp. 159–187.
- [125] Reynolds D., McConnachie J., Bettess P., Christie W. C., Bull J.W.: *Reverse adaptivity – a new evolutionary tool for structural optimization*. Int. J Numer Methods Engrg, 1999; 45:529–552.
- [126] Eschenauer H. A., Kobelev H. A., Schumacher A.: *Bubble method for topology and shape optimization of structures*. Struct Optim, (8) (1994), pp. 142–151. DOI: 10.1007/BF01742933.
- [127] Victoria M., Marti P., Querin O. M.: *Topology design of two-dimensional continuum structures using isolines*. Computers & Structures, 87(1-2) (2009), pp. 101–109. DOI: 10.1016/j.compstruc.2008.08.001.
- [128] Plocher J., Panesar A.: *Review on design and structural optimisation in additive manufacturing: towards next-generation lightweight structures*. Mater Des (183) (2019), pp. 108–164. doi. org/10. 1016/j. matdes. 2019. 108164.
- [129] All3DP.: *The best generative design software of 2022*. [https:// all3dp. com/1/ the- best- generative- design- softw are- of-2022/](https://all3dp.com/1/the-best-generative-design-software-of-2022/), (2022).
- [130] Autodesk Inc Product documentation. [https:// help. autod esk. com/ view/ fusio n360/ ENU/? guid= GUID- 4EB16 696- 8951-47BC- 8F15- 10E61 4D899 4F](https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?guid=GUID-4EB16696-8951-47BC-8F15-10E614D8994F). (2022).
- [131] Zhang Y, Wang Z, Zhang Y, Gomes S, Bernard A.: *Bioinspired generative design for support structure generation and optimization in additive manufacturing (AM)*. CIRP Ann 69(1) (2020), pp.117–120. doi. org/ 10. 1016/j. cirp. 2020. 04. 091.
- [132] Bagassi S., Lucchi F., De Crescenzo F., Persiani F.: *Generative design: advanced design optimization processes for aeronautical applications*. In: 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS, 2016.
- [133] Shea K, Aish R, Gourtovaia M.: *Towards integrated performance-driven generative design tools*. Autom Constr 14(2) (2005), pp. 253–264. doi. org/10.1016/j.autcon.2004.07.002.
- [134] Rubaiat, H. K., Grossman, T., Cheong, H., Hashemi, A., Fitzmaurice, G., DreamSketch: *Early stage 3D design explorations with sketching and generative design*, (2017), doi.org/10.1145/3126594.3126662.
- [135] Karlberg, M., Löfstrand, M., Sandberg, S., Lundin, M.: *State of the art in simulation-driven design*. Int J of Product Development (18) (2013), pp. 68–87. DOI: 10. 1504/ IJPD. 2013. 052166.

- [136] Groover, M.: *Automation, production systems and computer integrated manufacturing*. Pearson, London, (2016), ISBN 10: 1-292-07611-9.
- [137] An Introduction to Generative Design – A Digital Guide from the Editors of Cadalyst, Cadalyst, Longitude Media, https://cadalyst.tradepub.com/free/w_cada04/prgm.cgi, (2018).
- [138] Brandenberger, M., Kehl, G.: *Coupled Simulation using FEM, MBS and Control Simulation Tools using the Example of a Machine Tool*. In: Proceedings of the NAFEMS Seminar Mechatronics in Structural Analysis, Wiesbaden, 2004.
- [139] Keller, K., Kehl, G.: *Coupled FE Analysis of Structure and Control of High Dynamic Machine Tools considering the Machining Centre HELLER MCH 250 as an Example*. In: Proceedings of the PERMAS Users Conference, Strasbourg, 2006.
- [140] Nyhuis, P., Wiendahl, H. P.: *Fundamentals of Production Logistics Theory, Tools and Applications*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2009), DOI: 10.1007/978-3-540-34211-3.
- [141] Wiendahl, H.-P.: *Betriebsorganisation für Ingenieure*. Hanser-Verlag München, 2010.

PUBLIKÁCIÓK AZ ÉRTEKEZÉS TÉMÁJÁBAN

Magyar nyelvű konferencia előadások

- (1) Szabó, K.: *A genetikai algoritmusok alapjai*, A PEME XXV. PhD – Konferenciájának előadásai, poszterszekció, Budapest, Magyarország: Professzorok az Európai Magyarországiért Egyesület (2023. április 27. Budapest)
- (2) Szabó, K.: *A genetikai algoritmusok működésének áttekintése*, XXVI. Tavaszi Szél Konferencia 2023, poszterszekció, Miskolc, Magyarország: Doktoranduszok Országos Szövetsége (2023. május 5., Miskolc, Miskolci Egyetem A4 főépület)
- (3) Szabó, K.: *Component Development by Simulation-Driven Design Method*, InnoVeTAS, (2025. május 9., online prezentáció)

Idegen nyelvű konferencia előadások

- (4) Szabó K.: *Design of Chip Conveyor*, 7th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2019), Debrecen, Hungary: Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Debrecen 07-08th November (2019)
- (5) Szabó, K.: *Investigation of the Applicability of Topological Methods*, Lecture Notes in Mechanical Engineering (2195-4356 2195-4364): Vehicle and Automotive Engineering 4 pp 582-591 Paper Chapter 49. (2022) 4th International Conference on Vehicle and Automotive Engineering, Conference place and date: Miskolc-Egyetemváros, Magyarország 2022.09.08. - 2022.09.09.
- (6) Szabó, K.: *Component development using Topological Methods*, 8th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2022), Debrecen, Hungary: Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Debrecen 10-11th November (2022)
- (7) Szabó, K.: *Application of Topological Methods in the development of Vehicle components*, 8th International Scientific Conference on Advances in Mechanical Engineering (ISCAME 2022), Debrecen, Hungary: Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Debrecen 10-11th November (2022)

Magyar nyelvű konferencia cikkek

- (8) Szabó, K.: *A genetikai algoritmusok alapjai*, A PEME XXV. PhD – Konferenciájának előadásai, Budapest, Magyarország: Professzorok az Európai Magyarországiért Egyesület, pp. 218-226. (2023)

Magyar nyelvű lektorált folyóiratcikkek

- (9) Szabó, K.: *Forgácskihordó rendszerek tervezésmódszertanának vizsgálata*, Multidisciplinary Sciences, University of Miskolc, 9: 4 pp. 517-522., 6 p. (2020)
- (10) Szabó, K., Hegedűs, Gy.: *A generatív tervezést támogató szoftverek rövid áttekintése*, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem közleménye 10: 3 pp. 328-337., 10 p. (2020)
- (11) Szabó, K., Hegedűs, Gy.: *A generatív tervezés lépései integrált CAD rendszerekben*, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem közleménye 10: 4 pp. 393-398., 6 p. (2020)
- (12) Szabó, K.: *Topológiai módszerek alkalmazása*, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem közleménye 11: 4 pp. 218-226., 9 p. (2021)
- (13) Szabó, K.: *Tervezésmódszertani esetvizsgálatok*, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem közleménye 11: 2 pp. 123-128., 6 p. (2021)
- (14) Szabó, K.: *Topológiai módszerek alkalmazása járműalkatrészek fejlesztésében*, Kutatási eredmények a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézetében – 2022, Miskolc-Egyetemváros: Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet, pp. 109-117. (2022)
- (15) Szabó, K.: *A genetikai algoritmusok rövid áttekintése*, Kutatási eredmények a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézetében – 2022, Miskolc-Egyetemváros: Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet, pp. 101-108. (2022)
- (16) Szabó, K.: *A genetikai algoritmusok működésének alapjai*, Kutatási eredmények a Miskolci Egyetem Gépészmérnöki és Informatikai Karának Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézetében – 2022, Miskolc-Egyetemváros: Miskolci Egyetem, Gépészmérnöki és Informatikai Kar, Szerszámgépészeti és Mechatronikai Intézet, pp. 101-108. (2022)
- (17) Szabó K.: *A számítógép segített tervezési módszerek hatása a műszaki tervezésben*, GÉP (0016-8572 3057-9473): 75 3-4 pp. 109-112. (2024)

Idegen nyelvű lektorált folyóiratcikkek

- (18) Szabó, K.: *Design of Chip Conveyor*, Internal Journal of Engineering and Management Sciences / Műszaki és Menedzsment Tudományi Közlemények 5: 2 pp. 81-85. (2020)
- (19) Szabó K., Hegedűs, Gy.: *Brief Overview of Generative Design Support Software*, Design of Machines and Structures Vol. 10: No. 2 pp. 123-132. (2020)
- (20) Szabó, K.: *Application of Topological Methods*, Design of Machines and Structures Vol. 11, No. 1, pp. 59-68. (2021)
- (21) Szabó, K.: *Steps of Generative Design in Integrated CAD Systems*, Design of Machines and Structures Vol. 11, No. 1, pp. 53-58. (2021)

- (22) Szabó, K.: *Investigation of the Applicability of Topological Methods*, Lectura Notes in Mechanical Engineering (2195-4356 2195-4364): Vehicle and Automotive Engineering 4 pp. 582-591 Paper Chapter 49. (2022) 4th International Conference on Vehicle and Automotive Engineering
- (23) Szabó, K.: *Component development using Topological Methods*, Internal Journal of Engineering and Management Sciences / Műszaki és Menedzsment Tudományi Közlemények, (IJEMS) Vol. 8. No. 2. pp. 54–62. (2023)
- (24) Szabó, K.: *Application of Topological Methods in the development of Vehicle components*, Internal Journal of Engineering and Management Sciences / Műszaki és Menedzsment Tudományi Közlemények, (IJEMS) Vol. 8. (2023). No. 1. pp. 67–75. (2023)
- (25) Szabó, K.: *A Brief Overview of Genetic Algorithms*, Design of Machines and Structures (1785-6892 2064-7522): Vol. 13 No. 2, pp. 113-120. (2023)
- (26) Szabó, K.: *The impact of computer tools systems on design methodology processes and approaches*, Multidiszciplináris Tudományok: A Miskolci Egyetem közleménye (2062-9737 2786-1465): 14(3) pp. 25-34. (2024)
- (27) Szabó, K.: *Component Development by Simulation-Driven Design Method*, InnoVeTAS, (2025) (megjelenés alatt)

MELLÉKLETEK

- A1 A szerszámváltó kar **X** konstrukciós tér kapcsolati mátrix.
- A2 Az M1 megoldás **G**₁ generált kapcsolati mátrix és az M1 megoldás **M**₁ megoldás mátrix.
- A3 Az M2 megoldás **G**₂ generált kapcsolati mátrix és az M2 megoldás **M**₂ megoldás mátrix.
- A4 Az M3 megoldás **G**₃ generált kapcsolati mátrix és az M3 megoldás **M**₃ megoldás mátrix.
- A5 Az M4 megoldás **G**₄ generált kapcsolati mátrix és az M4 megoldás **M**₄ megoldás mátrix.
- A6 Az M5 megoldás **G**₅ generált kapcsolati mátrix és az M5 megoldás **M**₅ megoldás mátrix.
- A7 Az M6 megoldás **G**₆ generált kapcsolati mátrix és az M6 megoldás **M**₆ megoldás mátrix.
- A8 A műszaki-gazdasági értékelemzés
- A9 A generált megoldások szimulációs eredményei

A1 Melléklet: a szerszámváltó kar **X** konstrukciós tér kapcsolati mátrix[illegible]

A2 Melléklet: az M1 megoldás $\mathbf{G}_1$ generált kapcsolati mátrix és az M1 megoldás $\mathbf{M}_1$ megoldás mátrix

	$\sigma_{1(\max)} = [MPa]$	$m_1 = [kg]$	$m_{1(p)} = [kg]$	$r_1 = [m]$	$V_1 = [mm^3]$	$V_{1(ga)} = [mm^3]$
M1	39,02	2,247	1,123	0,111	286341,3	191795,1

[illegible][illegible]

A3 Melléklet: az M2 megoldás $\mathbf{G}_2$ generált kapcsolati mátrix és az M2 megoldás $\mathbf{M}_2$ megoldás mátrix

	$\sigma_{2(\max)} = [MPa]$	$m_2 = [kg]$	$m_{2(p)} = [kg]$	$r_2 = [m]$	$V_2 = [mm^3]$	$V_{2(ga)} = [mm^3]$
M2	32,16	0,817	0,408	0,109	290834,3	196288,1

[illegible][illegible]

A4 Melléklet: az M3 megoldás $\mathbf{G}_3$ generált kapcsolati mátrix és az M3 megoldás $\mathbf{M}_3$ megoldás mátrix

	$\sigma_{3(\max)} = [MPa]$	$m_3 = [kg]$	$m_{3(p)} = [kg]$	$r_3 = [m]$	$V_3 = [mm^3]$	$V_{3(ga)} = [mm^3]$
M3	95,16	1,683	0,841	0,092	214424,6	119878,4

[illegible][illegible]

A5 Melléklet: az M4 megoldás $\mathbf{G}_4$ generált kapcsolati mátrix és az M4 megoldás $\mathbf{M}_4$ megoldás mátrix

	$\sigma_{4(\max)} = [MPa]$	$m_4 = [kg]$	$m_{4(p)} = [kg]$	$r_4 = [m]$	$V_4 = [mm^3]$	$V_{4(ga)} = [mm^3]$
M4	97,53	0,554	0,277	0,091	197478,2	102932

[illegible][illegible]

A6 Melléklet: az M5 megoldás $\mathbf{G}_5$ generált kapcsolati mátrix és az M5 megoldás $\mathbf{M}_5$ megoldás mátrix

	$\sigma_{s(\max)} = [MPa]$	$m_s = [kg]$	$m_{s(p)} = [kg]$	$r_s = [m]$	$V_s = [mm^3]$	$V_{s(ga)} = [mm^3]$
M5	62,02	1,618	0,809	0,091	206161,4	111615,2

[illegible][illegible]

A7 Melléklet: az M6 megoldás $\mathbf{G}_6$ generált kapcsolati mátrix és az M6 megoldás $\mathbf{M}_6$ megoldás mátrix

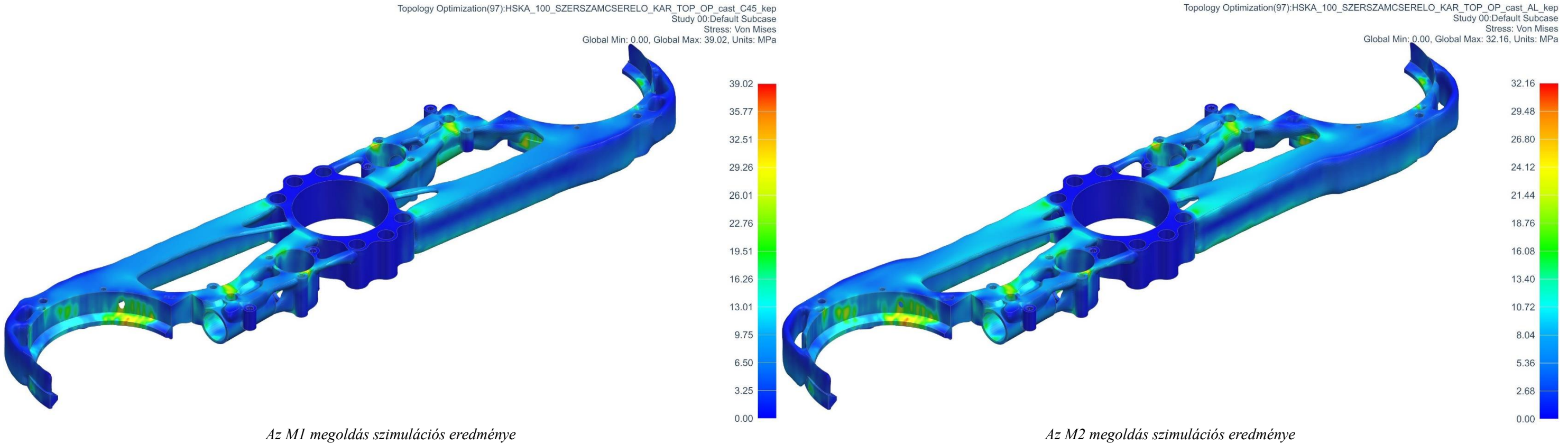
	$\sigma_{6(\max)} = [MPa]$	$m_6 = [kg]$	$m_{6(p)} = [kg]$	$r_6 = [m]$	$V_6 = [mm^3]$	$V_{6(ga)} = [mm^3]$
M6	61,01	0,578	0,289	0,091	205702,8	111156,6

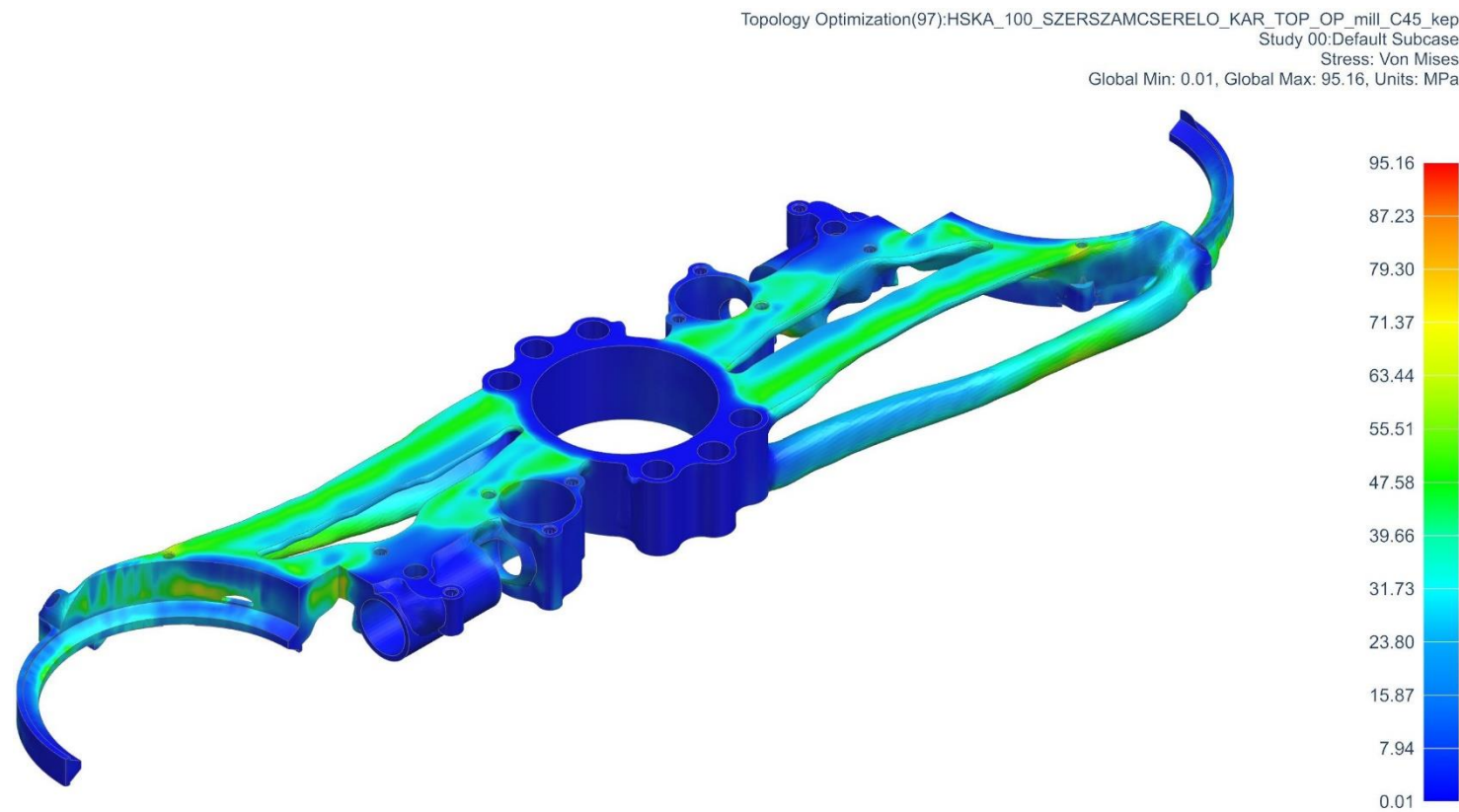
[illegible][illegible]

A8 Melléklet: a műszaki-gazdasági értékelemzés

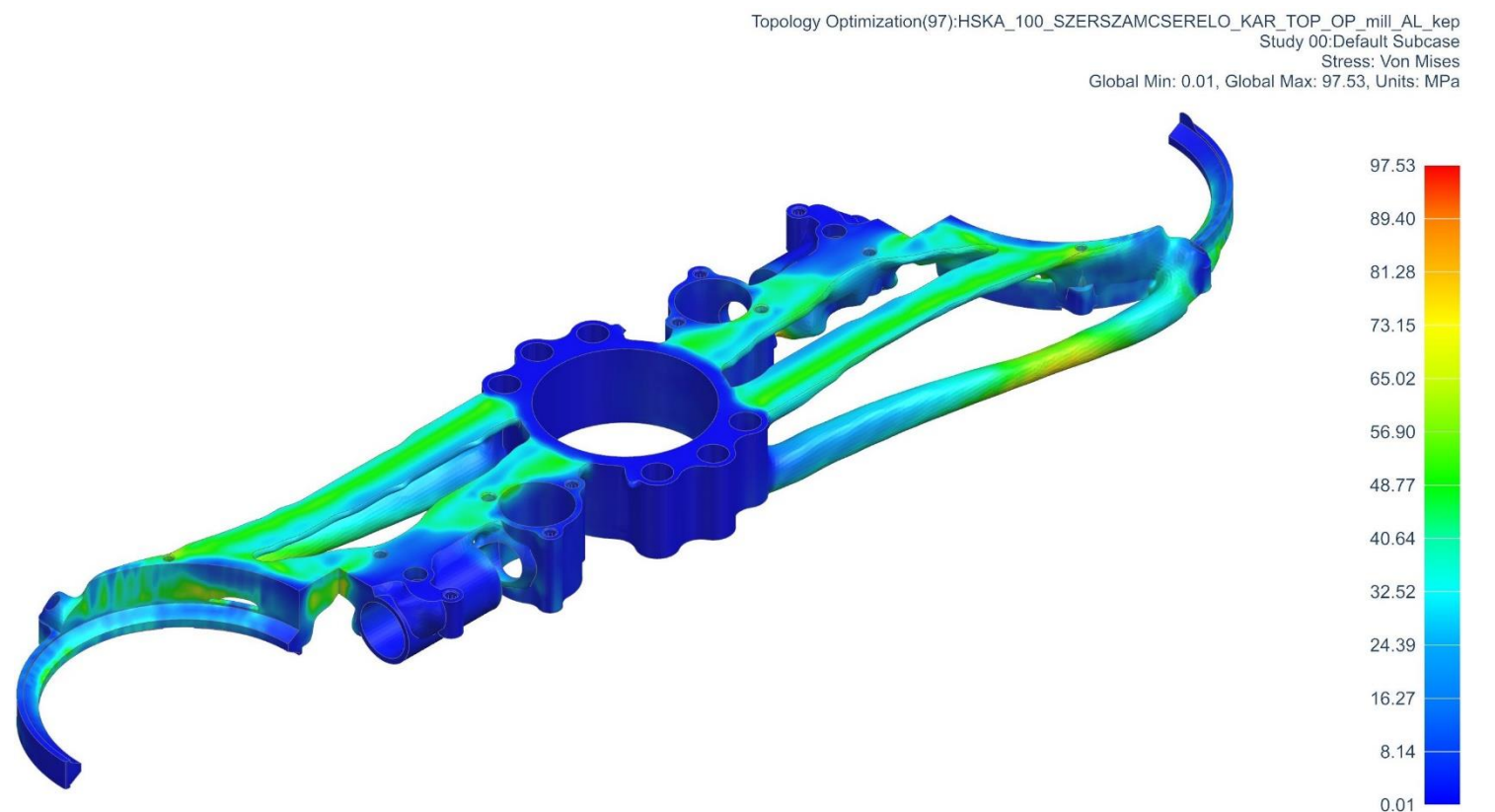
	Műszaki értékelés												Gazdasági értékelés									Eredmény		
	mű1			mű2			mű3			mű4			g1			g2			g3					
	q	λ	e	q	λ	e	q	λ	e	q	λ	e	q	λ	e	q	λ	e	q	λ	e	Σ mű	Σ g	Σ
M1	4,35	0,1	5	75,7	0,25	1	0,068	0,5	1	öntés	0,15	1	75,6	0,35	3	öntés	0,25	1	öntés	0,4	5	0,24	0,33	0,408
M2	7,82	0,1	10	91,1	0,25	7	0,023	0,5	7	öntés	0,15	1	75,2	0,35	1	öntés	0,25	1	öntés	0,4	5	0,64	0,26	0,69
M3	1,78	0,1	1	81,8	0,25	4	0,035	0,5	4	marás	0,15	10	81,7	0,35	6	marás	0,25	10	marás	0,4	10	0,46	0,86	0,975
M4	2,57	0,1	2	94	0,25	10	0,011	0,5	10	marás	0,15	10	83,2	0,35	10	marás	0,25	10	marás	0,4	10	0,92	1	1,358
M5	2,74	0,1	3	82,5	0,25	5	0,033	0,5	5	additív	0,15	5	82,4	0,35	8	additív	0,25	5	additív	0,4	1	0,48	0,445	0,654
M6	4,12	0,1	5	93,7	0,25	10	0,012	0,5	10	additív	0,15	5	82,5	0,35	9	additív	0,25	5	additív	0,4	1	0,875	0,48	0,998

A9 Melléklet: a generált megoldások szimulációs eredményei

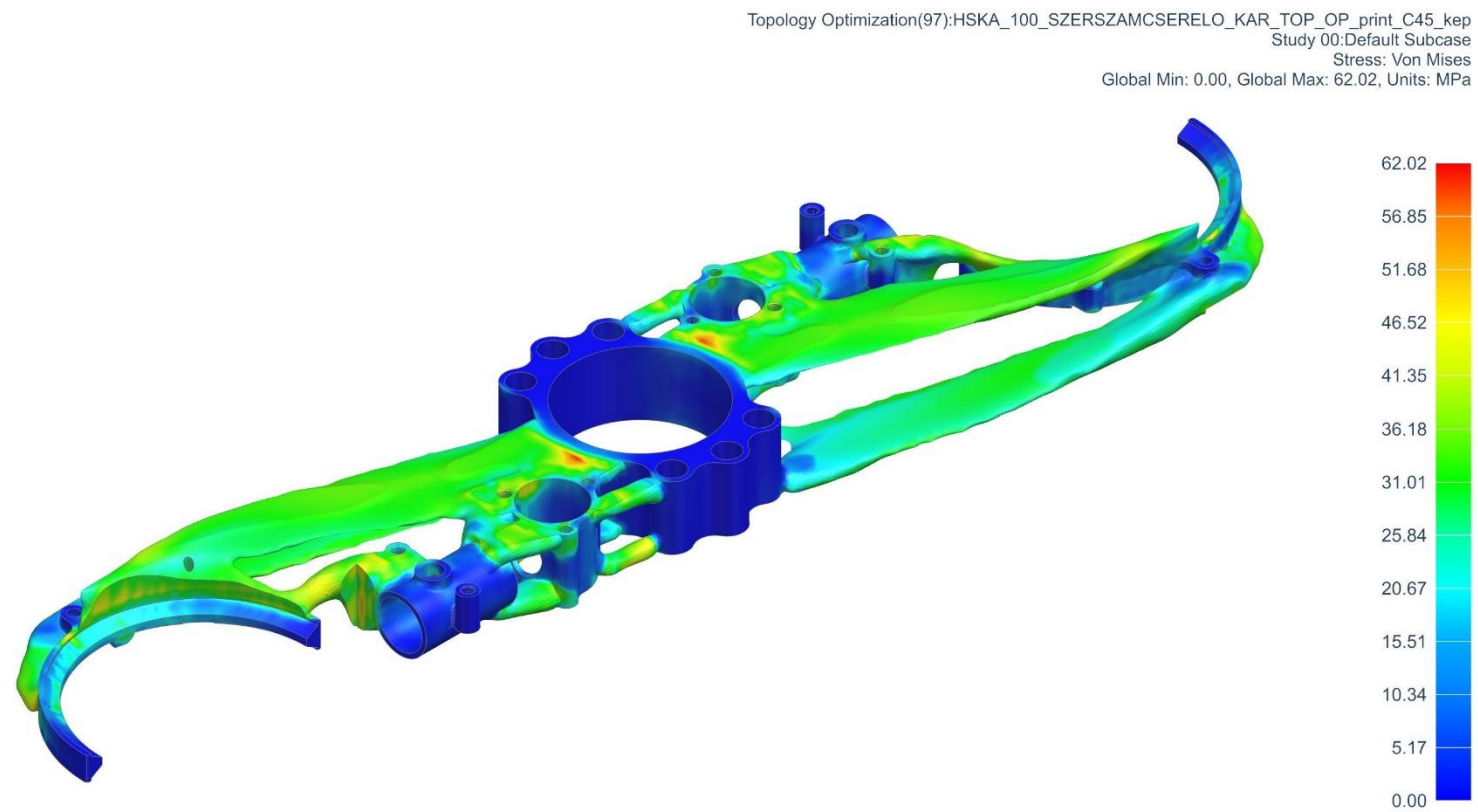




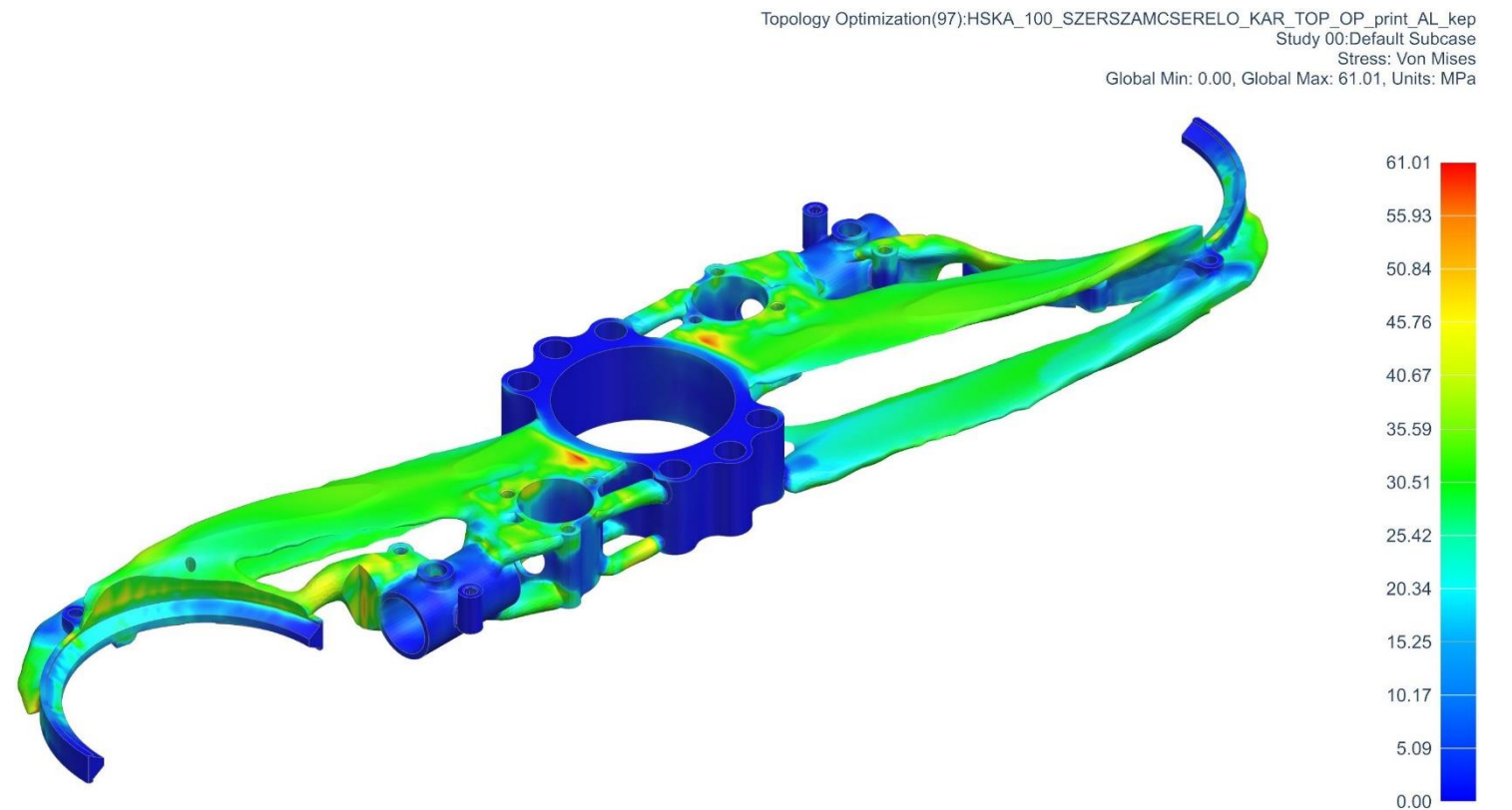
Az M3 megoldás szimulációs eredménye



Az M4 megoldás szimulációs eredménye



Az M5 megoldás szimulációs eredménye



Az M6 megoldás szimulációs eredménye