

CAD TANKÖNYV

A projekt keretében elkészült tananyagok:

Anyagtechnológiák

Materials technology

Anyagtudomány

Áramlástechnikai gépek

CAD tankönyv

CAD Book

CAD/CAM/CAE elektronikus példatár

CAM tankönyv

Méréstechnika

Mérnöki optimalizáció

Engineering Optimization

Végeselem-analízis

Finite Element Methode



Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Gépészmérnöki Kar

Óbudai Egyetem
Bánki Donát Gépész- és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar

Szent István Egyetem
Gépészmérnöki Kar

CAD TANKÖNYV

Egyetemi tananyag

Felelős szerző:

KÁTAI LÁSZLÓ

Írta:

HERVAY PÉTER, HORVÁTH RICHÁRD,
KÁTAI LÁSZLÓ, MADARÁSZ ISTVÁN,
MIKÓ BALÁZS, MOLNÁR LÁSZLÓ,
NAGY ISTVÁN, OLDAL ISTVÁN, PAPP OLIVÉR,
PIROS ATTILA, RABB LÁSZLÓ, SZABÓ ISTVÁN,
TÓTH G. NÓRA, VÁRADI KÁROLY



2012

COPYRIGHT: © 2012-2017, Molnár László, Papp Olivér, Piros Attila, Rabb László, Váradi Károly,
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Gépészmérnöki Kar,
Hervay Péter, Horváth Richárd, Mikó Balázs, Tóth G. Nóra, Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész- és
Biztonságtechnikai Mérnöki Kar,
Kátai László, Madarász István, Nagy István, Oldal István Szabó István, Szent István Egyetem
Gépészmérnöki Kar

LEKTORÁLTA: Horváthné dr. Vargha Zsuzsanna, dr. Keppler István, dr. Pomázi Lajos, dr. Uj József

Creative Commons NonCommercial-NoDerivs 3.0 (CC BY-NC-ND 3.0) ©

A szerző nevének feltüntetése mellett nem kereskedelmi céllal szabadon
másolható, terjeszthető, megjelentethető és előadható, de nem módosítható.

ISBN 978-963-279-539-3

KÉSZÜLT: a [Typotex Kiadó](#) gondozásában

FELELŐS VEZETŐ: Votisky Zsuzsa

TÁMOGATÁS:

Készült a TÁMOP-4.1.2-08/2/A/KMR-2009-0029 számú, „KMR Gépészmérnöki Karok informatikai
háttérű anyagai és tartalmi kidolgozásai” című projekt keretében.

Nemzeti Fejlesztési Ügynökség
www.ujszachenyiterv.gov.hu
06 40 638 638



A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai
Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

KULCSSZAVAK:

xxx



ÖSSZEFOGLALÁS:

xxx



TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés CAD/CAM/CAE Rendszerek alkalmazásába.....	10
1.1. Számítógéppel segített tervezés	11
1.2. A gépészeti tervezés folyamata.....	13
1.3. Termékfejlesztési folyamat modellek	15
1.4. A termékmodellek és szimuláció	22
1.5. CAD rendszerek története.....	26
1.6. Irodalom.....	38
2. CAD RENDSZEREK GEOMETRIAI ALAPJAI	39
2.1. Geometriai elemek ábrázolása	40
2.2. Geometriai transzformációk.....	48
2.3. Térbeli alakzat síkban ábrázolása	51
2.4. Megjelenítés	53
2.5. Irodalom.....	58
2.6. Ellenőrző kérdések.....	59
3. GEOMETRIAI MODELLEZÉS	60
3.1. Nem teljes értékű modellező rendszerek	61
3.2. Teljes értékű modellező rendszerek.....	63
3.2.1. Palástmodellezés	63
3.2.2. Testmodellezés	63
3.3. A testmodellezés halmazelméleti megközelítése	68
3.4. A testmodellezés eszközei	70
3.5. Modell-történet	74
3.5.1. CSG fa	75
3.5.2. Modell-történet halmazelméleti megközelítéssel	76
3.6. Parametrikus modellezés	78
3.7. A hagyományos geometriai modellezés értékelése	79
4. ALAKSAJÁTÓSSÁGRA ALAPOZOTT GEOMETRIAI MODELLEZÉS	81
4.1. Az alaksajátosság értelmezése	82
4.2. Alkatrész modellezés	86
4.2.1. Vázlatkészítés.....	86
4.2.2. Alaksajátosságok létrehozása	89
4.2.3. Modell történet	93
4.2.4. Parametrikus alkatrész modellezés.....	95
4.2.5. Attributív információk.....	96
4.2.6. Néhány példa az alkatrész modellezés keretében létrehozott alkatrészekre	97
4.3. Az alkatrész modellezés fejlesztési irányai.....	100
4.4. Irodalomjegyzék	102
5. ATTRIBUTÍV INFORMÁCIÓK ÉS MÉRNÖKI SZÁMÍTÁSOK.....	103
5.1. Tipikus információk.....	104
5.1.1. Fájl attribútumok használata	105
5.1.2. Egyedi információ beviteli ablak készítése.....	105
5.1.3. Alkatrészhez rendelt információk kinyerése	106
5.2. Intelligens sajátosság katalógus áttekintése	106
5.2.1. Általános jellemzők.....	107

5.2.2.	Tervezési könyvtár	107
5.2.3.	Könyvtárművelet létrehozása	108
5.3.	Programok szolgáltatása mérnöki számítások	109
5.3.1.	CAM-es szerszámpálya tervezés.....	110
5.3.2.	Horony.....	110
5.3.3.	Zártszelvények és tartószerkezetek szilárdsági méretezése	111
5.3.4.	Csapágy méretező kalkulátor	112
5.3.5.	Szabványos szerkezet idom hozzáadása alkatrészhez.....	112
5.3.6.	Falvastagság analízis	113
5.4.	Interneten található gyártói katalógusok	113
5.4.1.	3D ContentCentral.....	113
5.5.	Tervezői elemtár	114
6.	LEMEZALKATRÉSZEK MODELLEZÉSE	116
	Tartalomjegyzék.....	116
1.	Lemezalkatrészek tervezési sajátosságai	117
1.1.	Alapfogalmak bevezetése	117
1.2.	Lemezalkatrésszel kapcsolatos alapbeállítások	118
1.3.	Technológiai helyes lemezalkatrész tervezés	119
1.4.	Lemezalkatrésznél használatos alaksajátosságok	119
1.4.1.	Hajlítás jellegű alaksajátosságok	119
1.4.2.	Mélyhúzás jellegű alaksajátosságok	122
1.4.3.	Technológiai alaksajátosságok.....	122
1.5.	Alkatrészváltozók és kezelésük	123
2.	Lemezalkatrészek terítékképzése.....	124
2.1.	Terítékszámítás alapjai	124
2.2.	Semleges szál tényező jelentősége	126
2.2.1.	Elhanyagolásából eredő hibák	126
2.2.2.	Semleges szál tényező meghatározása.....	127
2.3.	Teríték méretezése.....	127
2.4.	Kimeneti adatformátumok.....	128
3.	Lemezalkatrészek tervezése a gyakorlatban	129
3.1.	Gyártói adatszolgáltatás és jelentősége	129
3.2.	Megrendelői adatszolgáltatás és jelentősége.....	129
3.3.	Lemezalkatrészek speciális kötőelemei	129
3.4.	Tervezési javaslatok a gazdaságos összeállításért.....	130
7.	FELÜLETMODELLEZÉS	132
7.1.	Felületek ábrázolásának matematikai alapjai.....	133
7.2.	A CAD gyakorlatában alkalmazott felületek	135
7.2.1.	Analitikus felületek ábrázolása	136
7.2.2.	Szintetikus felületek ábrázolásának alapjai.....	139
7.3.	Jellemző felület-műveletek CAD rendszerekben.....	145
7.3.1.	Felületek előállítása kihúzással	145
7.3.2.	Forgás felület (revolved surface).....	147
7.3.3.	Szorzatfelületek előállítása.....	147
7.3.4.	Felületek ellenőrzése	148
8.	KONSTRUKCIÓK, ÖSSZEÁLLÍTÁSOK MODELLEZÉSE	150
8.1.	A szerelés definíciója, fajtái.....	151
8.1.1.	Topológiai és geometriai definíciók.....	151

8.1.2.	A szerelési módszerek történeti fejlődése	153
8.1.3.	Szerelések nem geometria tulajdonságai.....	154
8.2.	Kényszerek.....	154
8.2.1.	Geometriai, passzív kényszerek	154
8.2.2.	Kinematikai, aktív kényszerek	159
8.2.3.	Technológiai kényszerek.....	161
8.2.4.	Struktúra kényszerek	161
8.3.	Szerelésleírás, műveletek.....	163
8.3.1.	Szerelési struktúra	163
8.3.2.	Szerelési környezetben végzett műveletek.....	165
8.3.3.	Additív entitások	169
8.4.	Modellalkotási módszerek hatása a szerelésre.....	172
8.4.1.	CSG szerelési modell	172
8.4.2.	Parametrikus, vagy hagyományos szerelés	172
8.4.3.	Direkt, vagy explicit szerelés	173
8.4.4.	Szinkron, vagy hibrid szerelés	173
8.5.	Alkatrészkezelés a szerelésen belül	173
8.5.1.	Szerelésen belüli modellalkotás	174
8.5.2.	Virtuális komponensek alkotása.....	174
9.	KINEMATIKA VIZSGÁLATOK CAD KÖRNYEZETBEN.....	176
	Tartalomjegyzék.....	176
1.	Mechanizmusok alapjai	177
1.1.	Alapfogalmak bevezetése	177
1.2.	Kinematikai párok fajtái, osztályozásuk.....	178
1.3.	Kinematikai vázlat.....	180
1.4.	Mechanizmus szabadságfokának értelmezése.....	181
2.	3D modellépítés kinematikai vizsgálathoz	183
2.1.	A 3D modellalkotás kritériumai	183
2.1.1.	Egyszerűsített modellek	183
2.1.2.	3D CAD modellek importálása.....	184
2.2.	A kinematikai párok definiálása	185
2.2.1.	Speciális kapcsolatok	186
2.3.	Működési jellemzők definiálása	187
2.4.	Eredmények megjelenítése	188
3.	Esettanulmány.....	189
3.1.	Forgattyús mechanizmus elemzése	189
3.2.	Kiegyenlítő tengelykapcsoló elemzése.....	193
4.	Irodalom.....	196
10.	MŰSZAKI RAJKÉSZÍTÉS ALAPJAI	197
10.1.	Rajzkészítés CAD rendszerekben	198
10.2.	A gépészeti alkatrészek ábrázolása.....	204
10.3.	Méretmegadás	206
10.4.	Méret-, alak- és helyzettűrések	212
10.5.	Felületi minőség jelölése.....	215
10.6.	Irodalom.....	216
	1. Melléklet – Alak- és helyzettűrések értelmezése és rajzjelei	217
	2. Melléklet - A különböző gyártási technológiákra jellemző felületi érdességet és elérhető méretpontosság értékek.	219

3. Melléklet – Feliratmező tartalma és formája az <i>EN ISO 7200</i> szabvány szerint ...	220
11. A CAD NUMERIKUS MÓDSZEREI. A VÉGESELEM-MÓDSZER MECHANIKAI / MATEMATIKAI ALAPJAI. A VÉGESELEMES PROGRAMOK JELLEMZŐ ELEM- KÉSZLETE. TERHELÉS MODELLEK, PEREMFELTÉTELEK. VE PROGRAMOKKAL MEGOLDHATÓ FELADATOK. A SZERKEZET VISELKEDÉSÉNEK MODELLEZÉSE.	221
11.1. Végeelem-módszer a műszaki gyakorlatban.....	222
11.2. Rugalmasságtan differenciálegyenlet-rendszere és peremérték problémája	223
11.2.1. Egyensúlyi egyenletek.....	223
11.2.2. Geometriai egyenletek.....	226
11.2.3. Anyagegyenletek.....	229
11.2.4. Peremfeltételek.....	230
11.2.5. Peremérték probléma.....	230
11.3. Közelítő mezők	231
11.3.1. Kinematikailag lehetséges elmozdulásmező.....	231
11.3.2. Statikailag lehetséges feszültségmező.....	231
11.4. Virtuális munka elve	232
11.5. Potenciális energia minimum elve	233
11.6. Lagrange-féle variációs elv.....	234
11.7. Mozgásmódszeren alapuló végeelem-módszer	235
11.7.1. Vektormezők bevezetése.....	235
11.7.2. Rugalmasságtani probléma és megoldási módszere	237
11.7.3. Végeelem, közelítő elmozdulásmező	238
12. A VÉGESELEM-MÓDSZER ALKALMAZÁS ORIENTÁLT BEMUTATÁSA	242
12.1. Tartók modellezése	243
12.1.1. Kör keresztmetszetű tartó vizsgálata.....	243
12.1.2. Vékony falú zárt szelvényű rúd modellezése	245
12.1.3. Vékony falú nyitott szelvényű rúd modellezése	247
12.1.4. Vastag falú cső modellezése	252
12.2. MELLÉKLET: Merevségi egyenlet meghatározása és megoldása síkbeli, húzott rúdelemre.....	257
12.2.1. Merevségi egyenlet 2D húzott rúdelemre	257
12.2.2. Példa.....	261
13. CAX RENDSZEREK INTEGRÁCIÓJA.....	265
13.1. CAX rendszerek.....	266
13.2. CAX rendszerek integrációja.....	268
13.3. Adatcsere CAX rendszerek között.....	271
13.3.1. DXF formátum	272
13.3.2. IGES formátum	272
13.3.3. VDA/FS.....	274
13.3.4. STEP formátum.....	274
13.3.5. STL formátum.....	274
13.4. CAD elemtárak	276
13.5. Digitális prototípus (digital mockup).....	278
13.6. Irodalom.....	282
14. TERMÉKÉLETÚT KEZELÉS, A PLM. TERMÉKADAT MENEDZSMENT, A PDM .	283
14.1. Konkurens tervezés	285
14.1.1. Párhuzamosítási lehetőségek a tervezési folyamatokban.....	285
14.1.2. Konkurens folyamatok bemutatása	286

14.2.	Termékmodellek, információmenedzsment.....	287
14.2.1.	A termékmodell.....	287
14.2.2.	Termékadatok kezelése	288
14.3.	Adatbázisok és Adatbázis-kezelő rendszerek	288
14.3.1.	Adat	289
14.3.2.	Információ	289
14.3.3.	Adatbázis.....	289
14.3.4.	Adatbázis-kezelő rendszerek.....	291
14.4.	PDM rendszerek főbb funkciói.....	291
14.4.1.	Termékadatok kezelése, vizualizáció.....	292
14.4.2.	Mérnöki változtatások kezelése	293
14.4.3.	Csoportmunka támogatása	295
14.4.4.	Folyamatmenedzsment.....	296
14.5.	Kitekintés a PLM rendszerekre.....	297
15.	PERIFÉRIÁLIS TECHNOLÓGIÁK	300
15.1.	3D szkennelés	301
	A digitalizálás műveleti sorrendje.....	301
	3D szkennelés típusai	303
15.2.	Gyors prototípus gyártás	307
	SLA (Stereolithography) - Sztereolitográfia.....	309
	SLS (Selective Laser Sintering) - Szelektív Lézer Szinterezés.....	310
	DMLS (Direct Metal Laser Sintering) – Közvetlen Fém Lézer Szinterezés	311
	LOM (Laminated Object Manufacturing) - Rétegelt darabgyártás.....	311
	FDM (Fused Deposition Modelling) - Huzalleolvastós modellépítés	312
	3DP (3 Dimensional Printing) – 3D nyomtatás	313
	SGC - (Solid Ground Curing) - Réteges fotopolimerizáció.....	314
	PolyJet - Polimer nyomtatás.....	315
15.3.	CAM rendszerek	316
15.4.	Irodalom.....	321

1. BEVEZETÉS CAD/CAM/CAE RENDSZEREK ALKALMAZÁSÁBA

**Szerző:
Mikó Balázs**

1.1. Számítógéppel segített tervezés

A *számítógéppel segített tervezés* alatt (CAD – computer aided design) többféle, számítógépen alapuló módszert értünk, amely mérnököket és más tervezéssel foglalkozó szakemberek tervezési tevékenységét segíti. A jelenleg használatos CAD rendszerek kínálata igen széles körű, a 2D (síkbeli) vektor-grafikai rajzoló programoktól a 3D-s (térbeli) parametrikus asszociatív integrált modellező rendszerekig. CAD rendszerek alkalmazása szintén igen széles körű, tananyagunk fókuszában a gépészeti tervezés áll, azonban CAD rendszerek megtalálhatók az építészeti tervezés, az elektronikai termékek, áramkörök, mikrocsipek tervezés, a ruha- és cipőipari tervezés területén is. A különböző alkalmazási területek természetesen más-más igényeket támasztanak a CAD rendszerrel szemben [1].

CAD rendszereket számos szempont szerint osztályozhatjuk.

- Ez első lehetséges osztályozás az alkalmazási terület. Bár léteznek általános rendszerek, a legtöbb rendszer vagy iparág specifikus, vagy létezik iparág specifikus szakmodulja. A gépészeti / elektronikai / építészeti / ruha- és cipőipari CAD rendszerek azonban alapvető eltéréseket mutatnak.
- A modellezési módszer egy másik vetülete a 2D-s, vagyis síkbeli és a 3D-s, vagyis térbeli modellezést alkalmazó CAD rendszerek.
- A CAD rendszereket osztályozhatjuk az alkalmazott modellezési módszerek szerint, így léteznek drótváz-, felület- és testmodellező rendszerek, valamint hibrid modellezési rendszerek is, melyek egyszerre képesek többféle modellezési módszert kezelni.
- A CAD rendszer modellkezelése lehet parametrikus és nem parametrikus. A parametrikusság azt jelenti, hogy a geometriai elemek méretét a méretszámok megadásával tudjuk módosítani, vagyis a méretszám módosításával a modell is módosul. A nem parametrikus rendszereknél a modell határozza meg a méretszámot, a módosítása a modell geometriai elemeinek manipulálásával tudjuk elérni.

A korszerű gépészeti CAD rendszerek számos azonos vonással, funkcióval rendelkeznek. Ezen fontosabb tulajdonságok, melyek részleteit a tananyag különböző fejezetei fejtik ki bővebben, a következők:

- 3D parametrikus alaksajátosságon alapuló modellezés, térfogati modellezés,
- Szabad formájú felületmodellezés,
- Kétirányú parametrikus asszociativitás: különböző aspektusokból is módosítható a modell és ezen módosítások hatása kölcsönösen jelentkezik (pl. a 3D-s modell alaksajátosságainak módosítása megjelenik a rajzon, a rajzon módosított méter megváltoztatja a 3D-s modellt),
- Teljes körű összeállítás modellezés, melyek összetevői alkatrészek vagy más összeállítások lehetnek,
- Műszaki rajz készítés a térfogati illetve felület modellből,
- Műhelyrajzok és darabjegyzékek készítése,
- Ábrázolási segítségk biztosítása (sraffozás, elfordítás, takart vonalak eltávolítása stb.),
- Tervrészletek újbóli felhasználása,
- A modell könnyű változtathatósága és változatok készíthetősége,
- Szabványos alkatrészek generálása katalógus alapján,
- Tervek hozzáigazítása tervezési szabályokhoz és specifikációkhoz,

- Tervek szimulációja legyártandó prototípusok elkészítése nélkül,
- Kinematika, ütközésvizsgálat, tűrésanalízis,
- Lehetőség arra, hogy más szoftverekkel adatot lehessen cserélni (export, import),
- Közvetlen kapcsolat a gyors prototípus és gyors gyártás rendszerek felé,
- Tömeg és tehetetlenségi nyomaték számítás,
- Lemezalkatrészek tervezése,
- Flexibilis csövek, kábelek tervezése,
- Elektromos alkatrészek kábelezése,
- stb.

A CAD rendszerek fejlődésével felvetődött az igény a termékfejlesztés illetve gyártás más területein is a számítógépek adta lehetőségek kiterjesztésére.

A számítógéppel segített gyártási módszerek (CAM – computer aided manufacturing) a CAD adatok alapján képes meghatározni forgácsoló megmunkálásokhoz szükséges NC programokat (a rendszerek valós képességeit ismerve az elnevezés talán túlzó).

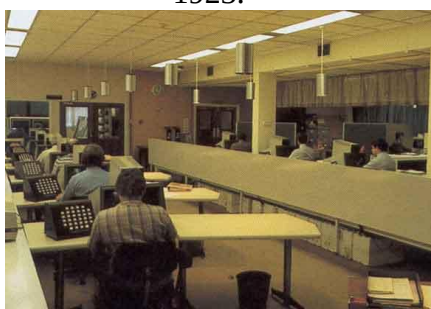
A számítógépek alkalmazása megjelent a mérnöki számítások (CAE – computer aided engineering), folyamattervezés (CAPP – computer aided process planning), a minőségbiztosítás (CAQA – computer aided quality assurance), a termelésirányítás (CAPPs – computer aided production planning and scheduling), a raktározás (CAST – computer aided storage and transport) területén is, mely funkciók integrálása jelentős kihívást jelentett az elmúlt 30 évben. Ezen technológiákat együttesen CAx technológiának nevezzük.



1923.



1961.



1986.



1991.

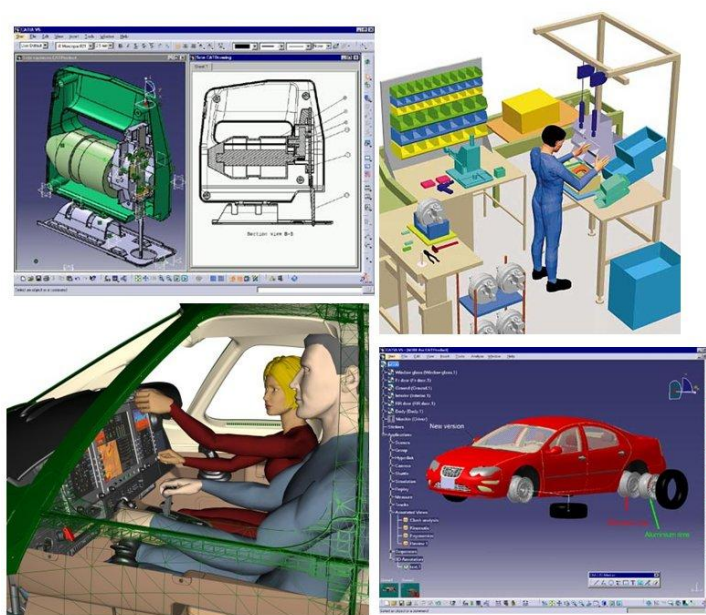
1.1. ábra. Mérnöki tervezőiroda változása a Westwood Works
(www.westwoodworks.net) vállalatnál

A tervezési technikák és technológiák változása és hatása a tervezési környezet változásán is jól lemérhető. Mint a 1.1. ábrán látható a rajztáblán történő kézi rajzolás sokáig nem nagyon változott, A CAD rendszerek megjelenése azonban amellet, hogy hatékonyabbá tette a tervezői munkát, hatással volt a tervezési folyamatra és a munkakörnyezetre is. A nagy mére-

tű rajzasztalok eltűntek, helyüket számítógépek vették át. Ezzel együtt eltűnt számos korábbi olyan feladat is, melyet nem a tervező mérnökök végeztek, például a pauszra történő kihúzását végző műszaki rajzoló feladata megszűnt.

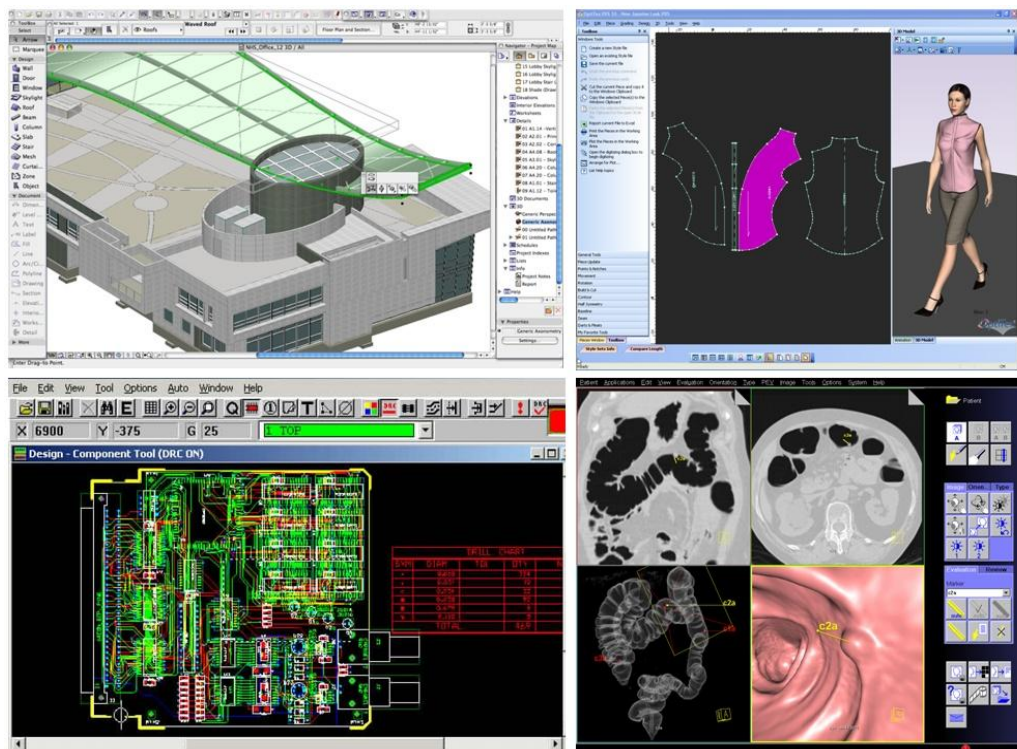
1.2. A gépészeti tervezés folyamata

A gépészeti tervezés célja egyrészt fogyasztási termékek tervezése, melyeket mindennapi életünk során használunk, legyen az akár fogkefe, akár fűrészgép vagy gépkocsi. Másrészt olyan eszközök tervezését jelenti, melyek szükségesek ezen termékek gyártásához, legyen az csigafűró, egy satu, ipari robot vagy egy egész gyártórendszer (1.2. ábra).



1.2. ábra. Példák gépészeti CAD alkalmazásokra

A CAD technika azonban nem csak a gépészet területén nyert teret, hanem más rokon mérnöki alkalmazások is léteznek, valamint a mérnöki tudományoktól távol eső alkalmazások is ismertek. A 1.3. ábra. Építészeti (ArchiCAD), ruhaipari (OptiTex), elektronikai (OrCAD) és orvosi (Lung CAD) CAD alkalmazásoknégy alkalmazásra mutat példát: építészeti tervezésre, ruhaipari tervezésre, elektronikai tervezésre és orvosi alkalmazásra láthatunk példákat.



1.3. ábra. Építészeti (ArchiCAD), ruhaipari (OptiTex), elektronikai (OrCAD) és orvosi (Lung CAD) CAD alkalmazások

A tervezés tárgya tehát sokféle lehet, azonban a tervezési folyamat főbb lépései egységesíthetők. A tervezésemélet területén számos iskola létezik, melyek sokféle módszert dolgoztak ki az egyes részfeladatok hatékonyabbá tételére. [2], [3]

A konstrukciós tervezés első lépése a *termékkonceptció kidolgozása*, amely során meghatározásra kerül a tervezendő konstrukció műszaki, gazdasági, minőségi, környezetvédelmi követelményei a piaci elvárások alapján, meghatározásra kerülnek a kielégítendő célok és a tervezési folyamat peremfeltételei.

A *konceptcionális tervezés* során meghatározzuk a konstrukció fajtáját (új, áttevezett, módosított), a termék funkciói, a működés alapját képező természettudományos összefüggéseket, a termék struktúráját, a működést meghatározó paraméterek értékét, a forma- és színintervet. A koncepcionális terv befejezése után válik lehetővé az ajánlati terv kidolgozása.

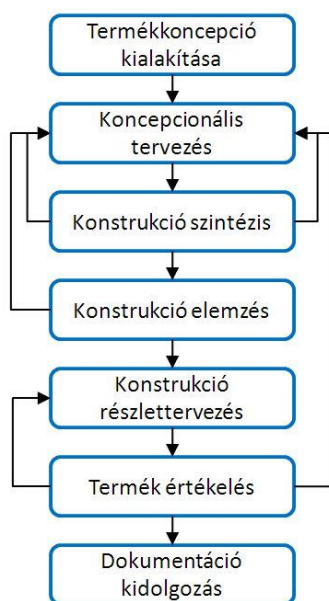
A *konstrukciósintézis* során a termék rendszerszemléletű modellezését végezzük, részegységekre és alkatrészekre bontjuk, meghatározzuk az alkatrészek közelítő méretét, alakját, anyagi jellemzőit.

A konstrukciósintézishez szervesen kapcsolódik a *konstrukció elemzés*, amely során meghatározzuk az alkatrészek és részegységek terhelését, igénybevételeit, szimuláljuk a termék működését és meghatározzuk az optimális kialakítás műszaki paramétereit.

A *részlettervezés* az egyes alkatrészek alakjának, anyagának, anyagi jellemzőinek, méretének, a működést befolyásoló méretek tűréseinek meghatározására irányul, valamint a gyártáshoz szükséges kiegészítő információk rendszerezését jelenti.

A *termékértékelés* során a termék megfelelőségét vizsgáljuk. A megfelelőséget több szempontból értékelhetjük: funkció teljesítése, szerelhetőség, gyárthatóság, költségek, vonatkozó szabványok, biztonsági előírások stb.

A *termékdokumentáció kidolgozása* során a termék összeállítási rajzait és alkatrészrajzait készítjük el, valamint az ezekhez kapcsolódó darabjegyzéket, anyagszükségleti terveket, működési-, karbantartási-, szerelési-, vizsgálati leírásokat.



1.4. ábra. A gépészeti tervezés részfolyamatainak kapcsolata

A terméktervezés ezen általános folyamatának részletei a termék jellege szerint jelentősen eltérhetnek egymástól. A folyamatokra a terméken kívül jelentős hatást gyakorolnak a tervezőiroda hagyományai, a termék majdani gyártási környezete, a tervezők tapasztalatai, illetve a tervezés során használt eszközök. A konstrukció elemzése és termék értékelése során jelentkeznek azon feladatok, melyek a legidőigényesebb részét jelentik a tervezésnek, a prototípus építést, tesztelést, az eredmények visszavezetést a tervezésre, majd újbóli prototípus készítést és tesztelést. Ezen iterációk száma, mélysége és időigényessége függ a termék funkciójától, attól, hogy új terméket fejlesztünk, vagy egy meglévőt tervezünk át, egészítünk ki új funkciókkal.

1.3. Termékfejlesztési folyamat modellek

A gépészeti tervezés folyamata és lehetőségei jelentős változáson ment keresztül köszönhetően a számítógépes tervező rendszereknek köszönhetően. Bár kezdetben csak egy új eszközt jelentettek a mérnöki gondolatok megjelenésében, hatással voltak a tervezési folyamatra, valamint a számítástechnika teljesítőképességének fejlődésével új lehetőséget jelentettek. Számos olyan alkalmazás jelent meg, mely egyszerűsíti, hatékonyabbá teszi a tervezőmérnök munkáját. A fejlődés természetesen kölcsönhatás eredményének tekinthető, hiszen a számítógépek fejlődése új eszközt biztosított a gépészeti tervezésnek, azonban a tervezés elvárásai újabb célokat jelöltek ki a számítógép tervezők számára.

Egy termék célja az emberi tevékenység valamilyen speciális módon, a tervező által meghatározott formában történő támogatása. A termék által támogatott tevékenységben három tényező van jelen: a felhasználó, a termék, mint eszköz, a környezet, amelynek egy részét át kell alakítani.

A terméket, mint a termékfejlesztés elsődleges célját legkönnyebben annak funkcióin keresztül definiálhatjuk. Ezek a funkciók arra hivatottak, hogy a vevői vagy megrendelői igényekre kínáljanak megfelelő megoldást. Ezek szerint a termék olyan funkcióhordozó, mely tulajdonságai révén képes valamely igény hiánytalan kielégítésére [4].

A termék életciklusát többféleképpen értelmezhetjük, így a termékfejlesztés folyamatának is többféle értelmezése lehet. A következőkben megvizsgáljuk a termék életútját a piaci környezetben, komplex műszaki és gazdasági folyamatként tekintve annak előállítási folyamatára, majd tovább tárgyaljuk a műszaki fejlesztési tevékenységeket és annak modern vonatkozásait.

A piac többi szereplőjétől folytonosan változó, alkalmazkodó magatartást várnak el a vásárlók. A vásárlói igényeket a forgalmazók, mint a vevői igény közvetítői az általuk forgalmazott termékek, illetve azok funkciója révén igyekeznek kielégíteni. A piac legfontosabb szereplője maga a termék, mely az igények kielégítésére hivatott, és amellyel szemben elvárásaink igen sokfélék. Elvárjuk a terméktől, hogy az igényeket gyorsan kielégítve, a megkívánt minőségben, a funkciójának lehető legmegbízhatóbb teljesítésével, az igénnyel arányos költségek árán, és minden környezettel kapcsolatos elvárásnak megfelelően, a szükséges mennyiségben legyen jelen a piacon [5].

Annak érdekében, hogy egy termék a piacra kerülhessen, először azt ki kell gondolni, majd ki kell fejleszteni, elő kell állítani, be kell vezetni a felvevőpiacra és értékesíteni kell. Ez a folyamatosan ismétlődő, megújító, alkotó tevékenységsorozat az innováció folyamata, melyet részletesen a 1.5. ábra szemlélteti, melyből az innováció egyes részfolyamatai kiolvashatók. Az folyamatára alapján a következő megállapítások tehetők:

Az innováció folyamata egy, az adott termékre vonatkozó célkitűzés megfogalmazásával veszi kezdetét, mely a kielégíteni kívánt igényből fakad. A célkitűzés egy elhatározott stratégia.

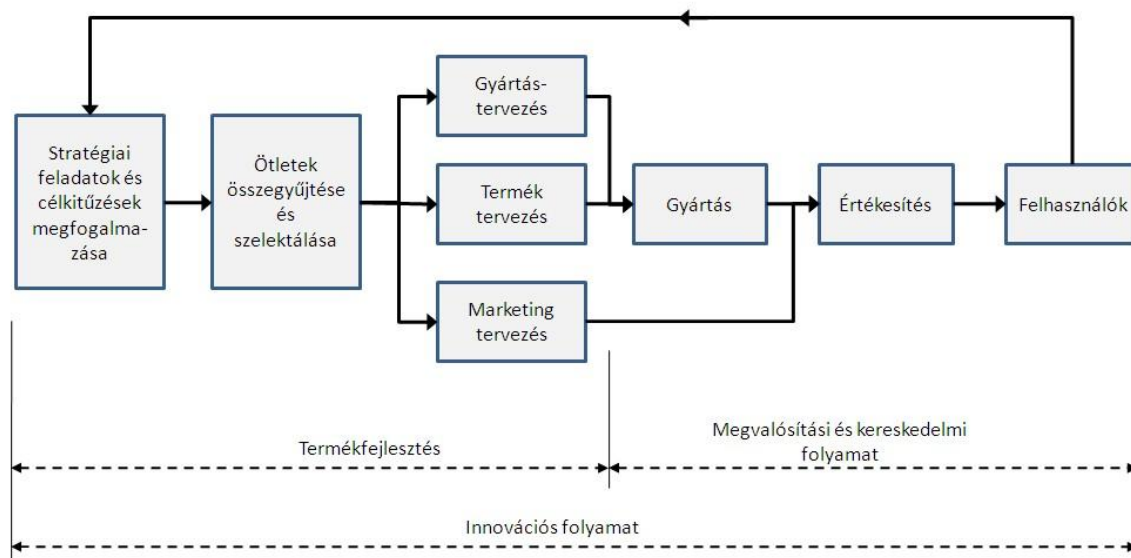
Az elhatározott célkitűzés nyomán kialakul a termékre vonatkozó elképzelés (vagy elképzelések), amely lehet egy új termékötlet vagy akár egy továbbfejlesztési javaslat egy meglévő termékre. A kialakult termék-elképzeléseknek megvalósításuk után alkalmasnak kell lenniük a már jelen lévő, felismert vagy prognosztizált, azaz a későbbiekben nagy valószínűséggel felmerülő igények kielégítésére, ráadásul versenyképes áron.

A célkitűzések megfogalmazásának és az ezzel összhangban lévő termékötletek összegyűjtésének tevékenységeit nevezzük a terméktervezés folyamatának.

A terméktervezés folyamata után következik azoknak a tevékenységeknek az összessége, melyek során a termékről alkotott elképzelést vagy elképzeléseket alapul véve előállítják a gyártáshoz szükséges összes dokumentációt. Ezeket nevezzük a termék fejlesztési folyamatának, melynek során biztosítani kell azoknak a követelményeknek a teljesülését, amelyeknek funkciójából adódóan meg kell, hogy feleljen a termék. A fejlesztési folyamatban tervezési tevékenységek nyomán készül el a termékdokumentáció, a gyártási terv és a marketingterv. Ezek a tervezési tevékenységek egymástól függetlenek, az egész tervezési folyamat alatt mégis egymásra építve, egymás eredményeit felhasználva oldják meg a feladatot és alkotják meg a terméket.

A terméktervezés folyamatát, és a fejlesztési folyamatot hívjuk összefoglaló néven a termékfejlesztés folyamatának. Ezen folyamatösszességnek még nincs kézzel fogható, fizikai végeredménye, de a folyamat végén a fizikai megvalósításához már minden rendelkezésünkre áll.

Az innovációs folyamat utolsó szakaszában a kidolgozott tervek alapján testet ölt és „életre kel” a termék. A gyártási, szerelési, csomagolási és szállítási folyamatok végén a termék készen áll arra, hogy elfoglalja a helyét a piacon.



1.5. ábra. Az innováció és részfolyamatai [5]

Az innovációs folyamat kreatív, együttműködő emberek munkájának, valamint a kor vívmányainak megfelelő technikai eszközöknek, módszereknek és eljárásoknak a folyamatba történő hatékony integrálása révén megy végbe.

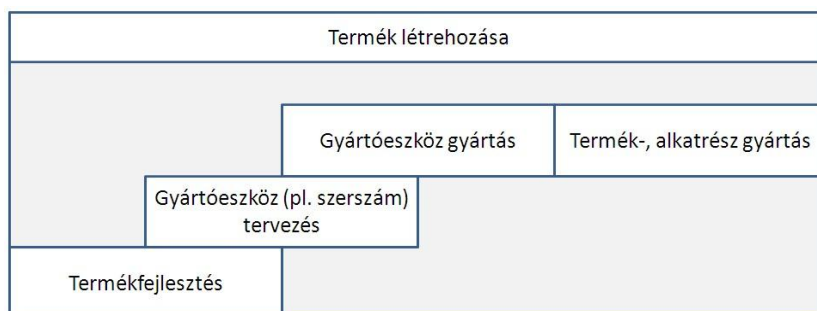
A termékfejlesztés folyamatát sok szemszögből és sokféleképpen értelmezhetjük. Az előzőekben elhelyeztük és értelmeztük a termékfejlesztést a termék, mint piaci szereplő kapcsán. A mérnöki szemlélethez azonban sokkal közelebb áll a termékfejlesztésnek, mint a termék kialakulásának folyamatában legfontosabb részfolyamatnak értelmezése.

A termék kialakulása az alapkoncepció képzése és az új termék, illetve annak első szériagyártásának megkezdése közötti időintervallumban történő tevékenységek összessége [6]. A termék konkrét jellemzőitől függően, a termék kialakulásának e definíció szerint csak egy része a termékfejlesztés. Ahogy azt a 1.6. ábra is mutatja a termék piacra (sorozatgyártásba) kerüléséig a termékfejlesztés önmagában is komplex folyamata mellett, esetenként azzal párhuzamosan szükség lehet a következő tevékenységekre:

A legyártáshoz szükséges szerszámok fejlesztése. A termék és az annak legyártásához szükséges szerszámok fejlesztési módszere teljesen azonos, tehát az adott szerszámfejlesztés is egy különleges termékfejlesztési folyamatnak tekinthető. Ezen folyamat során kerül kifejtésre a funkciója szerint „a terméket készítő (vagy azt lehetővé tevő) termék”.

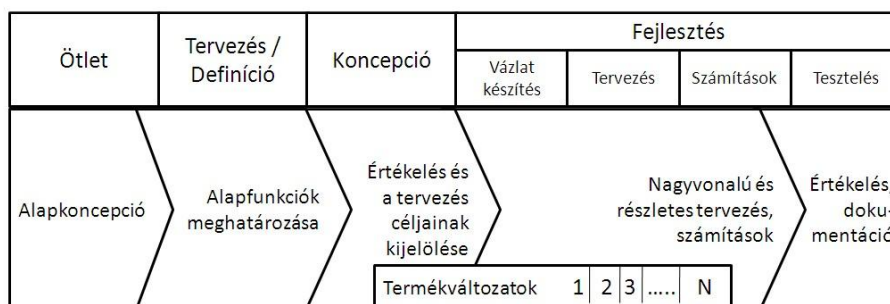
A megtervezett szerszámok legyártása. Láthatjuk, hogy a termékfejlesztés, a szerszámfejlesztés, és a szerszámkészítés egymás mellett párhuzamosan is haladhatnak előre a termék kialakulása során. A folyamatok természetesen hatással vannak egymásra, gondoljunk csak a már legyártott szerszámokkal elért rossz teszteredmények hatására. Ha a szerszám nem képes a termék-koncepció által előírt követelmény teljesítésére, módosíthatjuk a szerszámtervet ennek érdekében, vagy felülvizsgálhatjuk az alkatrésztervet, hogy valóban szükség van-e az adott követelményre.

A termék illetve alkatrészeinek legyártása.



1.6. ábra. A termék kialakulásának részfolyamatai [6]

A termékfejlesztés folyamatát, annak részletesebb tárgyalása céljából további elemi részfolyamatokra kell bontanunk. A részfolyamatok határait pontosan ki kell jelölnünk, meg kell neveznünk és a bennük foglaltatott tevékenységek által definiálnunk kell. A VDI (Német Mérnökök Egyesületének - Verein Deutscher Ingenieure) 2221 [7] irányelv szerint a folyamat négy alaplépésként definiálható, melyek a következők: ötlet (felvetés), tervezés / definíció, koncepció, fejlesztés / realizáció. A 1.7. ábra a termékfejlesztés ezen lépéseit szemlélteti.



1.7. ábra. A termékfejlesztés klasszikus lépései a VDI szerint [7]

Az alapvető *ötlet* és koncepció nyomán alakulnak ki a késztermék alapvető tulajdonságai. A termékfejlesztésnek ebben a fázisában, valamint a *tervezési* (definíciós) és *koncepció*s fázisban a funkciók, az alapvető tervek, és az elkészítés folyamatai letisztázódnak, és általuk meghatározhatóvá válnak az elérni kívánt célok. Ezeket hívjuk a tervezet (angolul: project) céljainak [6]. A funkciók és részfunkcióik kombinálása, variálása és műszaki-gazdasági értékelések nyomán alakulnak ki a termékváltozatok, melyek közül egy vagy több is részt vesz a fejlesztési folyamatban. A *fejlesztési* folyamat első lépéseként a vázlatkészítés során a termékváltozatokról nem optimalizált léptékhelyes főtervek, vázlatok készülnek. Ezeket a vázlatokat a tervezés során, műszaki és gazdasági szempontból optimalizálják [3]. Ezek után eldől, hogy melyik változat kerül megvalósításra. Persze előfordulhat, hogy nem egy, hanem több változat kerül teljes kidolgozásra, akár több prototípus is készülhet, ha a méretezések, műszaki számítások végére még mindig nem egyértelmű, hogy a termékváltozatok közül melyik az optimális.

Ismert konstrukcióból kiindulva könnyebb a feladat absztrakt meghatározása és könnyebb a feladat össz- és részfunkcióinak meghatározása. Minél inkább általánosítjuk a feladat megfogalmazását, annál könnyebb a folyamatterv kezdő fázisaiban becsatlakozni a fejlesztés folyamatába, annál nagyobb lesz a megoldási változatok száma és annál sokrétűbbek lesznek a megoldási változatok. Ez azért fontos, mert a későbbi fejlesztési fázisokba való belépés nem eredményez jelentős javulást, miközben az anyagi ráfordítás és az értéknövelés ezekben a

legjelentősebb. Lényeges javulás tehát, csak a folyamat elején való becsatlakozással érhető el, és ennek anyagi ráfordításai jelentősen kisebbek.

Műszakilag nem éri meg, hogy a fejlesztés egy késői fázisában végrehajtott javítgatásokkal a funkcionálisan rossz megoldást életben tartsuk.

Az új termékfejlesztési stratégiákkal szemben támasztott követelmények többnyire a folyamat időigényességének és anyagi ráfordításainak csökkentésére, valamint egy jobb termékminőség megvalósítására irányulnak. Hogy ezek a követelmények teljesíthetők legyenek, meg kell határozni a folyamat időigényét leginkább befolyásoló tényezőket. A termékfejlesztésre fordított időt leginkább meghatározó tényezők a következők [6]:

- A leendő termék jellemzőinek korai elhatározása
- A részfolyamatok egymással párhuzamossá tétele
- Az információáramlás intenzitása
- A tervezést és fejlesztést segítő számítógépes eszközök folyamatba való integrálása
- A fejlesztők motiváltsága

A termékjellemzők korai elhatározása

A termékfejlesztési folyamat sikeres véghezviteléhez elengedhetetlen, hogy a termék jellegzetességeit a lehető legkorábban meghatározzuk, és a továbbiakban ehhez szigorúan ragaszkodjunk. Így lehetővé válik minden a terven dolgozó mérnök, vagy munkacsoport számára, hogy egyértelműen meghatározott tervezet alapján, világos és érthető utasításokat követve, akár egymástól függetlenül haladjanak a termék fejlesztésével. Amennyiben ezen utasítások nem egyértelműek vagy hiányosak, úgy minden munkacsoport a saját maga által felvett jellemzők alapján készült tervét fogja előnyben részesíteni. Az ilyen módon elkészült inhomogén tervhalmaz elemeinek egymáshoz illesztése, későbbi harmonizációja jelentős erőfeszítést igényel, és messzemenően kerülendő.

Az egymással párhuzamosan haladó termékfejlesztési részfolyamatok

A folyamat időigényének csökkentéséhez létfontosságú, hogy az egymástól függetlenül is végezhető tervezési és fejlesztési tevékenységek megfelelő felügyelet mellett egymással párhuzamosan haladjanak. Természetesen, az egymásra épülő tevékenységekre ez nem vonatkozik, ezért a részfolyamatok relációi és azok párhuzamossá tétele minden egyes új termék esetén külön megfontolás tárgyát kell, hogy képezze.

Az információáramlás intenzitása

A hatékony termékfejlesztéshez szükség van intenzív információáramlásra. Ma már nem elegendő az, ha az információcsere megbízhatóan végbemegy a munkacsoportok között. Az is fontos, hogy az milyen formában és milyen gyakorisággal történik. Ennek a kommunikációnak a lehető leggyorsabbnak és legteljesebbnek kell lennie.

Integrált informatikai eszközök használata

Az informatikai eszközök nem kizárólag a számításigényes feladatok megoldását segítik elő, hanem az intenzív információcsere alapeszközei is. Csak magas szintű és a fejlesztés minden lehetséges területére kiterjedő számítógépes háttér működtetése képes biztosítani azt, hogy egy adott terméken dolgozó munkacsoport, vagy munkáját egyénileg végző személy egy közös adatbázist használva dolgozzon. Egy, az adott termékhez kapcsolódó közös és a fejlesztők számára könnyen elérhető adatbázis alkalmas arra, hogy a termék különféle részfolyamatait párhuzamosan fejlesztők valós időben használhassák egymás adatait, és elért eredményeiket is ide rögzítsék. Ezt az információs rendszert nevezik *PDM*-nek (angolul: Product Data Management – Termék Adat Menedzsment).

Motiváció

A csapatmunka kizárólag akkor hatékony és sikeres, ha az adott fejlesztési folyamaton dolgozók motiváltak. Motiváció hiányában a dolgozók a csapatmunkára, úgy tekintenek, mint egy olyan rendszerre, melybe könnyen beleolvadnak, az esetleges rossz eredményekért felelősséget nem vállalva, másokra hárítva azt. Ha a fent említettek mellett az emberi tényezőt is figyelembe vesszük, beláthatjuk, hogy a modern termékfejlesztési stratégiákat támogató eszközök hatástalanná válnak, ha a fejlesztési tevékenységet végzőknek nem érdeke a kívánt végeredmény.

Az előző alfejezetben, melyben a termékfejlesztést, mint műszaki tevékenységet vizsgáltuk, szó esett arról, hogy fontos az, hogy a fejlesztéssel foglalkozók a folyamat elején csatlakozzanak a munkához. Ez segíti az alapkoncepciót úgy továbbgondolni, hogy a kezdeti megoldások sokfélék legyenek, és ezekben az alapgondolatokban, ezeknek apró részletei között ott rejtőznek az optimális megoldások, esetleg több is melyek közül esetenként nem csak egy kerül megvalósításra. A termékváltozatok párhuzamos fejlesztése nem keverendő össze a későbbiekben végzett fejlesztési munkafolyamat részfolyamatainak magas szintű párhuzamossá tételével. Ha a VDI által definiált termékfejlesztési folyamatot, annak négy alapelemét tekintjük, akkor a következő megállapítások tehetők:

Az *ötlet* (alapkoncepció) és a *tervezési* (azaz az alapfunkciókat meghatározó) fázisban szükség van a lehető legtöbb fejlesztő részvételére, hiszen sokan sokféleképpen közelíthetik meg az adott problémát vagy felvetést.

A *koncepció*s fázisban el kell dönteni, hogy melyek a funkcionálisan életképes megoldások, melyek közül akár több is tovább vihető a következő fázisba.

Az utolsó fázis a *fejlesztés*, melynek során egy vagy több termékváltozat kerül kidolgozásra és esetenként akár több prototípus is készül. A fejlesztés során a fejlesztők az egymásra nem épülő munkafolyamatokkal párhuzamosan haladnak.

Természetesen minden termékfejlesztési szakasz végén (nem csak a fejlesztési fázisban!) van értékelés és visszacsatolás az optimális megoldás, vagy megoldások megtalálása érdekében. A fejlesztési folyamat előtt kiválasztott megoldás, vagy megoldások akkor tekinthetők optimálisnak, ha azok:

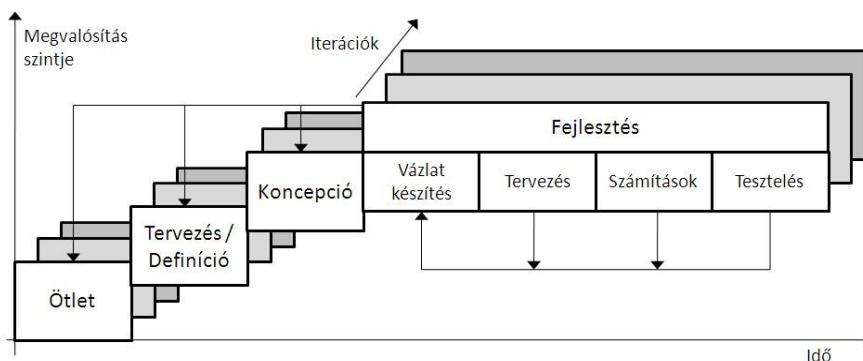
- optimálisan elkészíthetők (anyaghelyesek, gyártáshelyesek, szerelési helyesek, ellenőrzés-helyesek)
- optimálisan működők (működéshelyesek, kezelés helyesek, igénybevétel helyesek, üzembe helyezés helyesek, környezethelyesek)
- optimálisan megszüntethetők (újrahasznosítás-helyesek, megsemmisítés-helyesek).

A korszerű termékfejlesztéssel szemben támasztott számtalan követelmény közül a két legfontosabb a következő:

- A régebben egymást szigorú sorrendben követő termékfejlesztési, részfolyamatok szimultán elvégzése.
- Mindenki számára könnyen elérhető adatbázisok használata (és kommunikáció számítógépes eszközökkel).

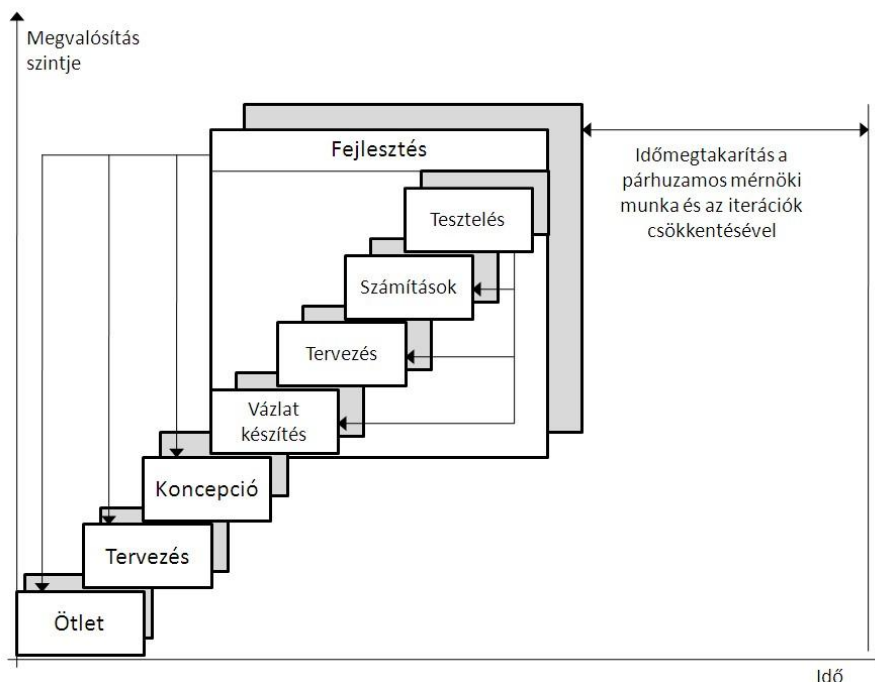
Az ezeknek megfelelő termékfejlesztési stratégia *szimultán illetve konkurens mérnöki munka* (angolul: Simultaneous Engineering – SE / Concurrent Engineering - CE) néven vált ismertté. Ennek legfőbb jellemzője az, hogy a lehetővé teszi a fejlesztési részfolyamat egymásra nem épülő műveleteinek szimultán elvégzését, sőt esetenként kiterjedhet az egész termékfejlesztési folyamatra. A következő két ábra a hagyományos és a korszerű szimultán termékfej-

lesztés összehasonlítására szolgál, a termék kidolgozottságának szintjét ábrázolja a termékfejlesztés során, az idő függvényében. A 1.8. ábra a termékfejlesztés klasszikus folyamata látható.



1.8. ábra. A klasszikus termékfejlesztés időbeli lefolyása [6]

Az ábra jól szemlélteti, hogy a klasszikus termékfejlesztés során, a VDI által meghatározott négy fő részfolyamat kötött sorrendben követi egymást. A egyik részfolyamat sem kezdődhet el addig, míg az azt megelőző be nem fejeződött. Amennyiben egynél több termékváltozattal dolgozunk, úgy ez az összesre igaz, tehát minden termékváltozatra teljesen ki kell dolgozni a termékfejlesztési részfolyamatokat egyenként. Ez azzal jár együtt, hogy ha az egyik termékváltozatról a termékfejlesztés egyik részfolyamatában kiderül, hogy mégsem alkalmas a teljes értékű terméké válásra, akkor az előtte lévő tevékenységeket főlegesen végeztük el teljes egészében. Szimultán munka esetén az egyes részfolyamatok még az előző befejeződése előtt elkezdhetők. Lehetőség van az egyes termékváltozatok fejlesztésének abbahagyására a párhuzamosan haladó részfolyamatok eredményei alapján úgy is, hogy nem fejeztük be annak részfolyamatait, időt spórolva ezzel. A szimultán mérnöki munka, az életképtelen megoldások gyors kizárásával lehetővé teszi azt is, hogy az életképes megoldásokra koncentráljunk. A korszerű szimultán termékfejlesztési folyamat időbeli lefolyását az 1.9. ábra szemlélteti [6].



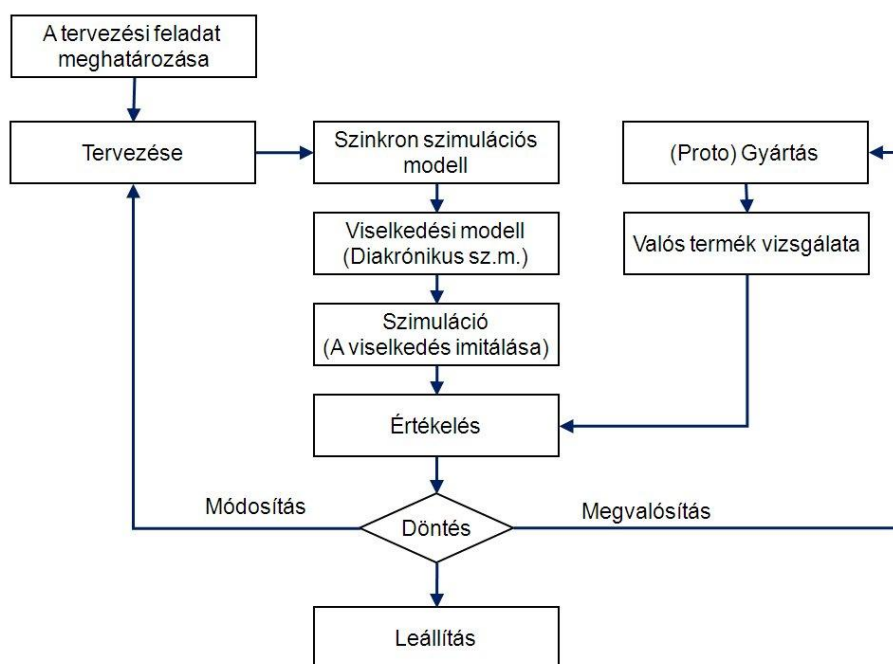
1.9. ábra. A szimultán termékfejlesztés időbeli lefolyása

Az 1.9. ábra jól látható, hogy a nem csak VDI irányelv által definiált négy részfolyamat végezhető szimultán, hanem a komplex fejlesztési fázis egyes mozzanatait is, lehetővé téve ezzel a legpróbb részfolyamat elemek visszacsatolását ellenőrzés céljából.

1.4. A termékmodellek és szimuláció

A fejlesztés során a felhasználó – termék – környezet kapcsolatokat kell vizsgálni, hogy el tudjuk dönteni, a termék kielégíti-e a támasztott követelményeket. A vizsgálatok szimulációval valósíthatók meg, a szimuláció egy rendszer viselkedésének, bizonyos jellemzőinek „leutánzása”, a szimuláció szerepe információ gyűjtés a tervezési alternatívák értékeléséhez. A szimuláció célja a termék környezetre kifejtett hatásának vizsgálata; a termék viselkedése a használat során (elhasználódás, meghibásodás) és a termék és a felhasználó közötti kölcsönhatás vizsgálata. A szimuláció során tehát a következő kérdésekre keressük a válaszokat:

- Úgy működik-e a termék, ahogy terveztük, megfelel-e a funkcionális követelményeknek?
- Megfelel-e a műszaki, ergonómiai, esztétikai stb. funkcióknak?
- Gyártható-e a termék a tervezett mennyiségben, a megfelelő minőségben és áron?



1.10. ábra. Szimuláció folyamata

A szükséges vizsgálatokat legkézenfekvőbb módon egy, a tervezett termékkel minden szempontból azonos *prototípus*on hajthatjuk végre, ez azonban nagyon időigényes és drága folyamat, tehát a vizsgálatokhoz valamilyen *modell*t használunk. Modell imitált objektum, az eredeti objektum reprezentálása, azzal nem mindenben egyenértékű. A modellek a szimuláció során módot nyújtanak arra, hogy tanulmányozhassuk a rendelkezésre még nem álló, vagy hozzá nem férhető eredetiket.

Egy modell lehet *szinkron modell*, mely esetben nincsenek időbeni relációk például konstrukciós dokumentáció, diagram, léptékhelyes makett, vagy *diakrónikus modell*, amely időbeni egymásutániségot is leíró szimulációs modell.

Felépítés szerint a modell lehet anyagi (fizikai) vagy szimbolikus modell, a működési elv szerint:

- szerkezeti modell,
- ikonos modell,
- analóg modell,
- matematikai modell,
- vegyes.

A *szerkezeti modellek* a tárgy vagy a folyamat kvalitatív (minőségi) struktúrájának a láthatóvá tételén alapszik. Ilyen például a folyamatábrák, kapcsolási rajzok, grafikonok, tömbvázlatok, vázlatok, makettek, manekenek (embermodellek).

Az *ikonos modellek* a tárgy vagy a folyamat eredeti tulajdonságait a modell azonos tulajdonságaival reprezentálja. A hasonlóság nem azonosság, mivel nem terjed ki minden jellemzőre. Hasonlóság lehet geometriai, statikai, kinematikai, dinamikai, termikus, kémiai, stb. Az ikonos modellek mindig anyagi modellek például makettek, minták, léptékhelyes modellek, prototípusok.

Az *analóg modellekben* az eredeti valamely tulajdonságát a modell egy másik tulajdonsága reprezentálja. Ez feltételezi azt, hogy a másik tulajdonság ugyanolyan módon változik, mint az eredeti megfelelő tulajdonság.

A *matematikai modellek* matematikai összefüggések segítségével előállított szimbolikus modellek, a mérnöki gyakorlatban talán a legszélesebb körben használt modell típus. A matematikai modellek lehetnek elsődleges matematikai modellek, melyek fizikai vagy kémiai törvényszerűségek, alapelvek felhasználásával írják le a rendszer vagy termék viselkedését. A másodlagos matematikai modellek ezen alapösszefüggésekből levezetett származtatott matematikai modellek.

A termékmodell fogalmába minden olyan információ beletartozik, mely a termékfejlesztés során keletkezett. Ennek megfelelően a modellekkel szemben támasztott követelmények jelentősen különböznek a termékfejlesztés egyes szakaszaiban. Ezeknek a modelltípusoknak definiálása nem lehetséges pusztán azzal, hogy hozzárendeljük őket az egyes termékfejlesztési lépésekhez. Meg kell vizsgálnunk azt is, hogyan jönnek létre az egyes típusok. A vonatkozó szakirodalmakban sokféle modelldefiníciót találhatunk. Mindközül a legáltalánosabbak és legszélesebb körben értelmezhetők a Német Ipari Tervezők Egyesülete (németül: Verband der Deutschen Industrie Designer - VDID) által megfogalmazott modelldefiníciók, melyek megkülönböztetik az alábbi modelltípusokat [6]:

- Arányos modell
- Ergonómiai modell
- Stílus modell
- Funkcionális modell
- Prototípus
- Termékpéldány.

Az *arányos modell* leírja a külső formát és annak legfontosabb arányait. Megkönnyíti a kommunikációt, elősegíti az információ gyors áramlását. Segít abban, hogy a termék különböző tulajdonságai tekintetében a termékfejlesztésben résztvevők hamar konszenzusra jussa-

nak. Ezen modelltípusnak gyorsan, egyszerűen és olcsón elkészíthetőnek kell lennie, részletes termékjellemzőket nem tartalmaz. Gyakran hívják koncepciómodellnek, vagy magyarázómodellnek.

Az *ergonómiai modell* elősegíti a megvalósíthatóságról való döntést (lehetséges-e kifejleszteni az adott terméket, és egyáltalán szükséges-e?). Fontos információkat közöl az üzemeltetésről és használatról és az esetleges részfunkciókról. Termékjellemzőket már tartalmaz.

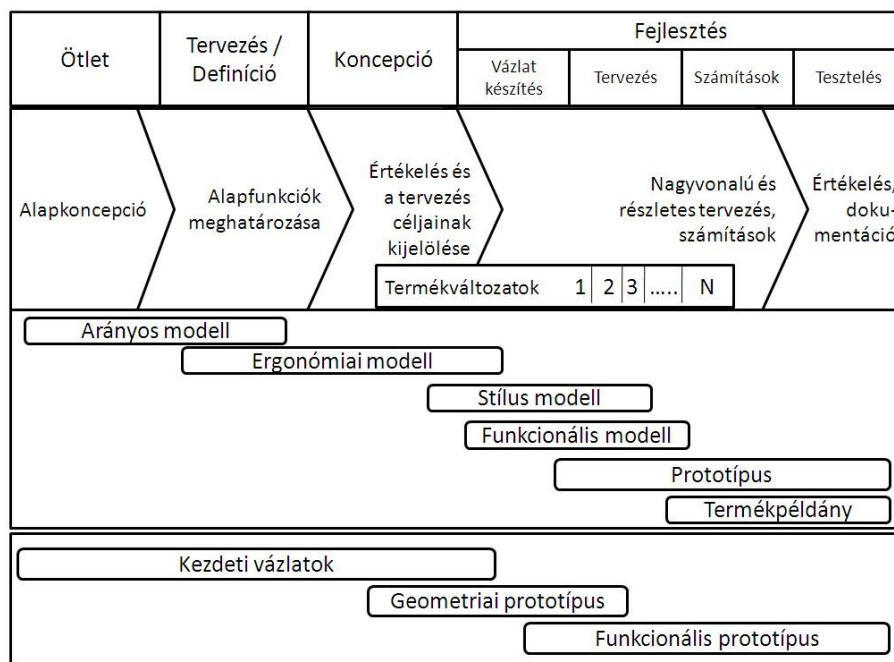
A *stílus modell* a későbbiekben vélhetően sorozatgyártásba kerülő termék külső megjelenését mutatja meg. Ennek a lehető legjobban kell hasonlítania a valós termékpéldányra. Az ábrázolt felületeknek „bemutatótermi” minőségben kell megjeleníteniük. Segítségével esetleg könnyebben eldönthető, hogy milyen gyártási eljárást válasszunk, amennyiben ez még nem dönt el. Alkalmazásával lehetőség nyílik arra is, hogy a fejlesztésben részt nem vevők (vásárlók, értékesítők, sajtó, beszállítók) is elbírálhassák a terméket a termékfejlesztés korai szakaszában. Esetenként a PR munka is megkezdhető, egy megfelelő részletességű modell alapján. Bizonyos jellemzők kidolgozása részletes, nem hordoz minden termékfunkciót.

A *funkcionális modell* lehetővé teszi a számított vagy empirikus módon meghatározott jellemzők megfelelőségéről való megbizonyosodást és bizonyos funkciók korai tesztelését (hogyan szerelhető, hogyan tartható karban, milyenek a kinematikai jellemzők). Megmutat néhány, esetleg minden jellemző funkciót, ha szükséges, a termék külalakjának, formájának megjelenítése nélkül is. Információt szolgáltat a szerszámkészítéshez, vagy öntőforma készítéshez, elősegítve a gyártás előkészítését.

A *prototípus* a leendő sorozatban gyártott termékhez nagyon hasonló, vagy azzal teljes mértékben megegyező példány. Minden termékfunkciót és valamennyi termék jellemzőt tartalmaz. A már véglegesnek tekinthető gyártási dokumentáció alapján készül, csak a gyártási folyamatában különbözik attól. Átala lehetőség van egy vagy több termékjellemző tesztelésére. Lehetővé teszi a szerszámgyártás megkezdését, és a termék piaci bemutatását.

A *termékpéldány* a már sorozatban gyártott termék. Lehet próbasorozat, mellyel vagy a gyártási technológiát vagy magát a terméket tesztelik, vagy lehet teljesen végleges verzió is. Egy ilyen példány segítségével minden egyes termékfunkció megvizsgálható. Segítségével elkezdhető a gyártást kiszolgáló személyzet és a későbbiekben a termékhez kapcsolt szolgáltatásokat nyújtó személyzet (karbantartó, szerelő) képzése, valamint a vevőkkel és beszállítókkal való részletes egyeztetés. Lehetőség van továbbá a gyártást és szerelést végző eszközök beállításainak finomhangolására, véglegesítésére, előkészítve ezzel a tömeggyártást.

A gyakorlat számára a modelltípusok ilyen részletességű felosztása nem szükséges, ezért egy egyszerűsített felosztás szerint a hat modelltípust három típusba tömörítjük. A 1.11. ábra a VDID által definiált modelltípusoknak az elhelyezkedését, felhasználását mutatja a VDI szerint felosztott termékfejlesztési folyamat során. Az ábra alsó szegmensében az egyszerűsített felosztás látható:



1.11. ábra. Modelltípusok a termékfejlesztés különböző fázisaiban

Az ábrán jól látszik, hogy a három kategória egyenként jóval nagyobb termékfejlesztési részterületet fog át. Ez a három típus a következő:

A *kezdeti vázlatok* kategória magában foglalja a VDID definíciói szerinti első három modell típust. Az arányos modellek, ergonómiai modellek és stílusmodellek csak a leendő termék arányait szemléltetik, és a termék megjelenéséről adnak információt, nincsenek konkrét méretei, vagy legalábbis nem optimális méretekkel és arányokkal rendelkeznek.

A *geometriai prototípus* a termék geometriáját már konkrét méretekkel, nem csak arányai-val definiálja, esetenként felületi jellemzőket is magában foglal. Bizonyos termékjellemzők már ez alapján tesztelhetők, szimulálhatók.

A *funkcionális prototípusok* körébe a funkcionális (digitális) modellek, a hagyományos értelemben vett és gyors prototípusok (fizikailag is létező formák), valamint a termékpéldányok tartoznak ide.

Egy mérnök sem vitatja a funkcionális modellek, a prototípusok és az első termékpéldányok fontosságát a termékfejlesztésben, viszont gyakran komolytalannak titulálják a kezdeti vázlatok és látványtervek, jelentőségét pedig ez korántsem igaz. A fejlesztésnek ebben a kezdetleges modellformák által kommunikált szakaszában zajlik le a megvalósíthatóságról való döntés, és az esetleges piaci igény felmérése is.

A fenti modelltípus felosztásban a prototípus szót, már jóval tágabb értelemben használjuk, mint tettük azt a VDID definíció szerint. Ma már a mérnöki szóhasználatban a prototípus szó jelentése jelentősen megváltozott az értelmező szótár szerinti jelentéshez képest, mely szerint a prototípus „egy típus vagy tipikus jelenség mintaképe a valóságban”. Prototípusnak hívunk ezek szerint minden olyan modell típust, mely a termék jellemzőinek egyértelmű leírásával, funkciók definiálásával, lehetővé teszi annak funkcionális tesztelését, szimulálását valós vagy virtuális térben. Ebből következik tehát, hogy a prototípusok két alaptípusba sorolhatók. Lehetnek:

- digitális, más néven virtuális prototípusok,
- fizikai prototípusok.

A *digitális prototípus* a virtuális térben épül, és elemzések során mutatja meg azt, hogy a valós (fizikai) prototípus, melynek a számítógépes reprezentációja hogyan viselkedne. Jellemző rá, hogy nagy mennyiségű előre tervezett szimulációs kísérlet végezhető. A modell építését és szimulációját lehetővé tevő szoftverek tudásháttere, adatbázisa folyamatosan bővíthető, sok év tapasztalata építhető bele. A modellezési és szimulációs, valamint az alkalmazási terület szakértőinek magas szintű együttműködése révén folyik a termék fejlesztése.

A *fizikai prototípusok* valóságos termékek, melyek a benne megvalósuló mérnöki munka, valamint az annak alapját képező elmélet és módszertan kipróbálására készülnek. Gyártásuk költséges és időigényes. Ésszerű költségek mellett, nincs lehetőség egy termék minden jellemzőjének kipróbálására, a vizsgálati lehetőségek, annak költségük miatt korlátozottak. A fizikai prototípusokat két csoportra bonthatjuk. Lehetnek hagyományos technológiákkal gyártott egyszerűsített vagy teljes részletességű prototípusok, illetve gyors prototípusok melyek térfogatelemek vagy rétegek egymáshoz illesztésével hozzák létre a fizikai formát.

1.5. CAD rendszerek története

Ha igazán az alapoktól akarjuk elkezdni a téma boncolgatását, elsőként mindenképpen meg kell említenünk Euklidészt. Ő volt az aki i.e. 300-ban munkásságával megalkotta az Euklidészi geometriát, megteremtve ezzel a geometria alapjait, mely végül a technikával együtt fejlődve az 1960-as évek elejére lehetővé tette a számítógéppel segített tervezés (CAD – computer aided design) megteremtését [4].

Az 1960-as évek elején Ivan Sutherland diplomamunkája részeként megalkotta a CAD szoftverek első generációját, a *Sketchpad*-et (1.12. ábra) és ezzel újtára indította a CAD rendszerek fejlesztésének hosszú, mai napig töretlen folyamatát [9]. Ezen eszköz lényege az volt, hogy egy speciális tollal rajzolhatott a tervező a számítógép monitorára. Ez az ötlete olyan jól használhatónak bizonyult, hogy még ma is (2009) megtalálhatók ennek a továbbfejlesztett változatai pl. nyomásérzékeny TFT monitorok stb. Igaz, ennek a rendszernek órákig tartott olyan műveletek elvégzése, ami a mai számítógépeknek a másodperc töredéke.



1.12. ábra. *Sketchpad*

Habár az első CAD szoftver az 1960-as évek elején jelent meg, az első CAM rendszer már 1957-ben megszületett. Ennek megalkotója Dr. Patrick J. Hanratty volt, rendszerét pedig *PRONTO*-nak nevezte el. Így aztán őt emlegetik a „CAD/CAM rendszerek atyjának”.

Ebben az időben nem sokan tudtak megfizetni egy számítógépet és egy ilyen rendszert. Kivéve a nagy autó és repülőgépgyártó vállalatokat. Így aztán ők váltak ezen rendszerek elsődleges felhasználóivá, sőt fejlesztőivé.

Az első rendszereket egyetemekkel kooperálva hozták létre. Ezek még 2D-ben ábrázoltak. Létrehozásuk fő célja az volt, hogy a mindennapi rajzolgatás és módosítást (ami egy ceruzarajz esetében igen körülményes) meggyorsítsa, megkönnyítse.

1965-ra elkészült egy újabb CAD rendszer, a DAC (Design Automated by Computer), melyet Dr. Hanratty a General Motors-szal karöltve tervezett. (1.13. ábra) Ez a rendszer nagyban hasonlított Ivan Sutherland Sketchpadjára.



1.13. ábra. DAC



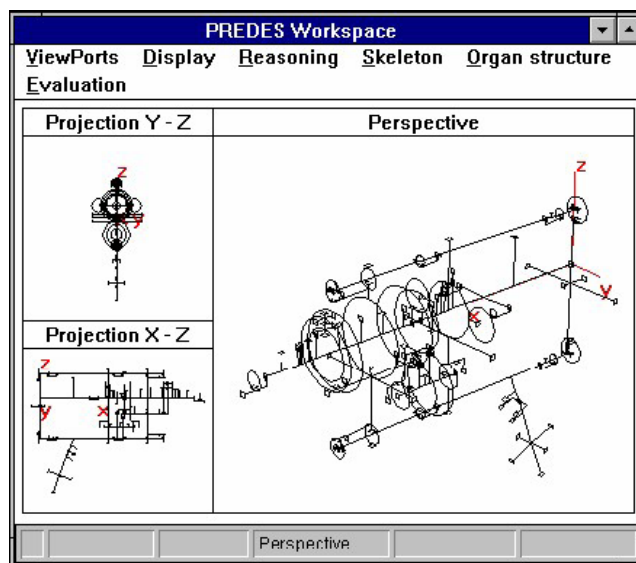
1.14. ábra. CADAM

További autó és repülőgépgyártók jelentek meg saját fejlesztésű rendszereikkel. Így például 1966-ban a McDonnal-Douglas CADD nevű szoftverével, 1967-ben pedig a Ford és a Lockheed. Előbbi PDGS, utóbbi CADAM nevű rendszerével. (1.14. ábra)

Szintén az 1960-as évek közepén jelent meg a Digigraphics szoftvere, mely végre szélesebb körben hozzáférhető volt. Ez az ITEK cég egyik kutatási rendszerének jogutódja volt, és PDP-1-es számítógépeken futott. Ez a rendszer a *Sketchpad*hoz hasonlóan egy speciális fényceruzát használt bemeneti perifériaként. Azonban az igen borsos (\$500.000) ára miatt csak néhány darabot értékesítettek belőle.

Habár látszólag csak a 70-es évek elején kezdtek el a 3D szoftverek fejlesztésével foglalkozni, valójában már a 60-as évek közepén.

Ekkor fogalmazták meg először a komplex 3D görbék és felületek számítógépes modellezésének módszerét. Nevezetesen de Casteljau a Citroen mérnöke. Az ő algoritmusait felhasználva aztán Bézier publikálta a szabadformájú görbék leírásának módszerét a 60-as évek végén. Ezen algoritmusok az alapjai a mai felület és térfogat modellező szoftvereknek.



1.15. ábra. Huzalváz modell

Összefoglalva az évtized technológiáját. Ebben az időben elsősorban 2D rajzoló programok születtek. Az ekkor megjelenő „3D” rendszerek valójában csak huzalváz modellek készítésére voltak alkalmasak, nem voltak képesek felületek leírására. (1.15. ábra)

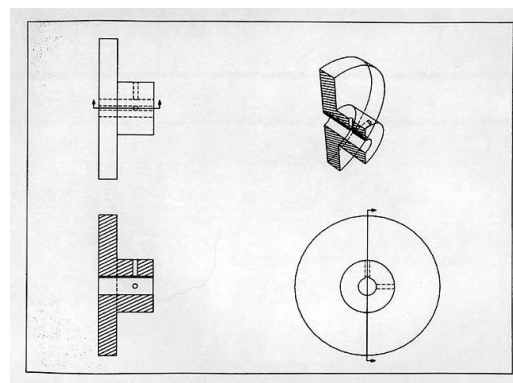
Ennek számos hátrány volt. NC pályák generálására nem minden esetben alkalmas, néhány esetben nem egyértelmű a modell. Ütközésvizsgálat korlátozottan végezhető el vele. A megjelenítő eszközök felbontása, színmélysége stb. mind borzalmas, és igen költséges. Hálózatokról még nem beszélhetünk, legjobb esetben is csak nyomtatómegosztásról. A beviteli és kiviteli eszközök billentyűzetre, digitalizáló táblákra, esetleg 2D szkennerekre, valamint tollas plotterekre korlátozódik.

Az 1970-es évek elején véget ért az első CAD/CAM szoftverek kifejlesztése, megkezdődhetett széles körű elterjedésük. A 60-as évekhez hasonlóan továbbra is a nagy autó és repülőgépgyártó vállalatok (Ford, General Motors, Mercedes-Benz, Toyota, Lockheed, McDonnell-Douglas) húzták előre a szoftverfejlesztést. A 70-es évekre ezen cégeknek külön CAD fejlesztő részlegük volt, ahol saját belső használatú rendszereiket készítették.

A legtöbb CAD szoftver továbbra is 2D-s volt, de megkönnyítette a munkát, csökkentette a hiba lehetőségét, és lehetőséget biztosított a rajzol újra felhasználására. Az egyik legjelentősebb ilyen program, amely ma, több mint 30 évvel később is létezik, a fent már említett CADAM (Computer Augmented Drafting and Manufacturing) nevet viseli. 1975-ben egy szintén repülőgépgyártó vállalat, az Avions Marcel Dassault megvásárolta a Lockheed-től a CADAM jogait és a forráskódot, majd ezt felhasználva létrehozta az első 3D modellező programot: a CATIA-t (Computer Aided Threedimensional Interactive Application) (1.16. ábra).



1.16. ábra. CATIA



1.17. ábra. PADL

A 70-es évekre nagymértékben megnőtt az igény a 3D tervezőrendszerek iránt. 1975-ben K. Vesprille PhD disszertációjában foglalkozik a B-spline görbék alkalmazásával a 3D szoftverekben. Ezek mind de Casteljau és Bezier munkáin alapultak. Az első 3D szilárdtest modellező program a *MAGI Syntha Vision* nevű programja volt (1972), ami nem alkatrészek tervezésére szolgált, hanem nukleáris robbanások szimulálására. A meglévő szilárdtest modellező szoftverek túlzottan nagy számítási igénye elég nagy problémát jelentett. Ennek orvosolására két mérnökcsoport is munkához látott. Az egyiket Herb Voelcker vezette, és a CSG (Constructive Solid Geometry) szilárdtest modellezési eljárással megalkotta a *PADL* névre keresztelt rendszert (1.17. ábra).

Ugyan ebben az időben Charles Lang mérnökcsoportja a *B-Rep* fejlesztésén dolgozott. Ennek lényege az volt, hogy a testeket különböző geometriai és topológiai információkkal írták le. Ennek eredményeként jött létre a *BUILD* szilárdtest modellező szoftver.

Az 1970-es évek közepe, vége felé, ahogy a számítógépek teljesítménye nőtt, mérete csökkent, egyre jobb grafikus megjelenítésre voltak képesek, úgy kezdtek a CAD/CAM rendszerek egyre jobban elterjedni. Azonban a szerteágazó fejlesztési út, a sok különböző rendszer egy újabb nagy problémát szült. Az egyes rendszerek nem voltak képesek kommunikálni egymással, a rendszerek mindenféle szabványosítást nélkülöztek. 1979-ban a Boeing, a General Motors és a NIST (National Institute of Standards) megegyezett az első olyan szabványt, mely lehetővé tette az egyes rendszerek közötti adatátvitelt. Ez volt az *IGES* (Initial Graphic Exchange Standard) formátum melyet 1980-ban vezettek be. Ez a formátum a mai napig leggyakrabban használt szabvány formátum. Az IGES 1.0 még csak műszaki rajz elemek átvitelére szolgált, később az IGES 4.0 / 5.0 már testmodellek átvitelére is alkalmas volt.



1.18. ábra. IBM 7094 típusú számítógép az 1970-es évek elején

A 70-es években sok új CAD szoftver fejlesztő cég alakult (M&S Computing (későbbi Intergraph), MCS), sok új CAD rendszer jelent meg. A 70-es évek végére lecsillapodott az első nagy CAD/CAM hullám. A legtöbb vállalat már használta valamely kereskedelmi forgalomban kapható szoftvert, összekötve a saját fejlesztésű rendszerével. Időközben a fejlesztgetés is szép lassan átalakult kemény piaci küzdelemmé. Ez nagymértékben köszönhető a számítógépek fejlődésének, és olyan nagy computer cégek megjelenésének, mint az IBM, aki ezekben az években a Lockheed már többszörösen híressé vált CADAM szoftverét megvásárolta, és saját számítógépeivel tovább népszerűsítette. Ide sorolható még a HP mint nagy számítástechnikai vállalat. Szintén a 70-es évek végére jelentek meg új, magasabb szintű programnyelvek (pl.: C) valamint olyan egyszerűbb operációs rendszerek mint a UNIX.

Az évtized során megjelennek az első szoborszerű felületmodellezési technológiák. Megjelenik a testmodellezés koncepciója, hozzálátnak elvi alapjainak kidolgozásához. Megjelenik a térfogati (volumetrikus) testmodellezés, és a határfelület modellezés. Ezek egyszerű testekből, kocka, henger, gömb stb. állnak. Azok kivonásával, összeadásával hozhatunk létre összetettebb geometriát. Bár jelentős technológiai fejlődés ment végbe, a perifériák területén jelentős áttörés még nem történt. A kis és bemeneti eszközök, hálózatok, csoportos munkát segítő egyéb kommunikációs lehetőségek továbbra sem álltak rendelkezésre.

Az 1980-as évek elején megjelent a számítógépek egy újabb generációja, a DEC MicroVAX-a. (1.19. ábra). Ez volt az első olyan számítógép, amely speciális áramellátás és hűtés nélkül képes volt a CAD szoftverek futtatására.

1983-ra az addigra már Intergraph-ra keresztelt M&S megjelent a piacon InterAct és InterPro nevű CAD szoftverjeivel, melyek a DEC VAX és MicroVAX gépein futottak. Ekkor jöttek rá a számítógép gyártó cégek, hogy gépeiket könnyebben eladhatják különböző CAD rendszerekkel. Ekkoriban több hardver/szoftver csomagot kínáltak a gyártók.

1981-ben Avions Marcel Dassault létrehozta a Dassault System-et, és aláírt egy egyezmény az IBM-mel, melyszerint az IBM árulhatta a Dassault System CATIA szoftverét. Ez a szoros együttműködés a mai napig tart.



1.19. ábra. MicroVAX



1.20. ábra. UNIX munkállomás (Apollo)

Az 1980-as években a DEC megkérdőjelezhetetlenül a számítástechnika csúcsán állt az akkor már zsúfolt piacon. De egy újabb fejlesztésével biztosította magának azt első helyet hosszabb időre. Ez volt a UNIX munkállomás (1.20. ábra).



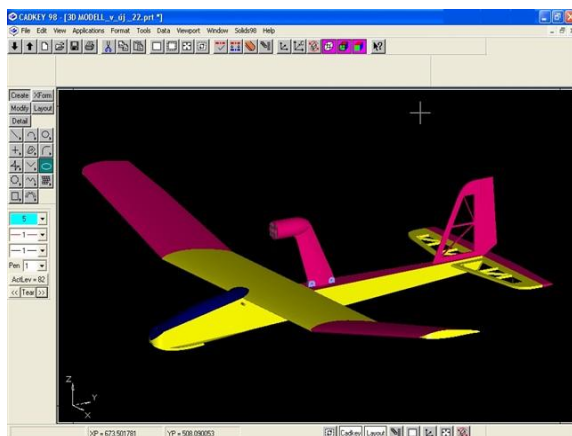
1.21. ábra. IBM PC



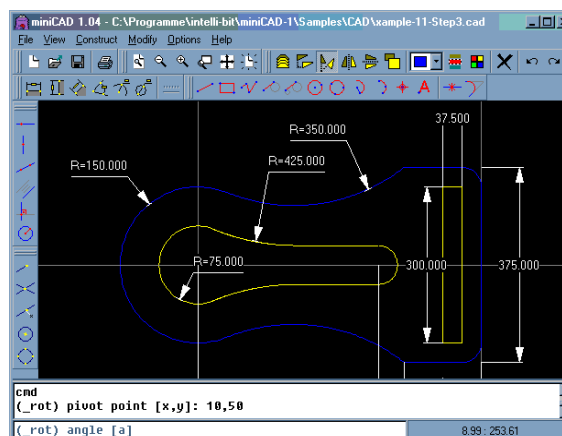
1.22. ábra. AutoCAD

Ezzel megkezdődött egy új irány mely alacsony áru, kis méretű, de magas minőségű, kis karbantartási igényű, CAD rendszerek futtatására optimalizált számítógépek gyártását tűzte ki célul. 1980-ban az IBM megjelent a piacon az első PC-vel (1.21. ábra), majd 1981-ben az Autodesk az bemutatta az AutoCAD Release 1 szoftverét, mely az IBM PC-jén futott (1.22. ábra). Ebben az időben ismét megélénkült a CAD piac. 1985-ben megjelent az első 3D drót-váz modellező PC-re, a CADKEY (1.23. ábra).

1984-ben az Apple is megjelent a CAD piacon Macintosh 128 gépével, majd az 1985-ben Diehl Graphsoft által kiadott *miniCAD* rendszerrel a legsikeresebb Mac Szoftver lett (1.24. ábra).

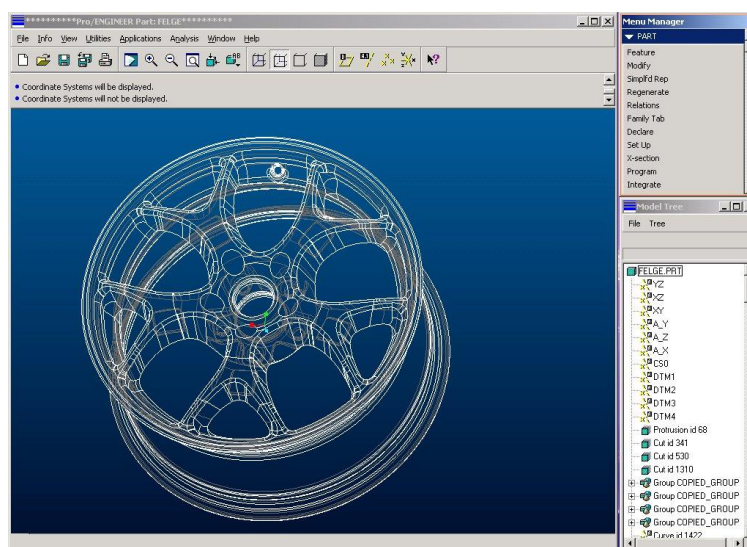


1.23. ábra. CADKEY



1.24. ábra. MiniCAD

1985-ben megjelent a CATIA 2-es verziója, melynek alapja még mindig a Lockheed cég CADAM szoftvere volt. Úgy látszott, hogy kezd megnyugodni a CAD piac, amikor megjelent egy új vállalat, a Parametric Technology. 1987-ben a piacon még újak számító Parametric Technology megjelent Pro/ENGINEER 3D szoftverével (1.25. ábra).



1.25. ábra. Pro/Engineer

A versenytárok nem tulajdonítottak neki különösebb jelentőséget, azonban mindenki legnagyobb meglepetésére megjelenésétől számított 18 hónapon belül rekord mennyiséget adtak el a Pro/ENGINEER licencéből. Ennek igen egyszerű okai voltak. A Pro/ENGINEER végre egy felhasználóbarát, ikonokat, legördülő menüket és más hasonlókat tartalmazó felhasználói felületet kínált. Itt jelent meg először az úgynevezett *History-tree* (modell fa) melyen lekövet-hetjük az egyes alaksajátosságok, kényszerek stb. egymásból következőségét, kapcsolatát. A korábbi rendszerek Fortran és assembler nyelven íródtak, melyek miatt lassúak, nehézkesek voltak szemben a Pro/ENGINEER C programozási nyelven X-Windows-ra írt programjával.

A Boeing cég még 1980-ban kezdte *TIGER 3D* szoftverének fejlesztését, ám 1988-ra vilá-gossá vált, hogy 777-es repülőgépét a CATIA rendszerrel fogja tervezni. 1989-ben a

Unigraphics leváltotta *UniSolids* nevű szoftverét, és egy sokkal versenyképesebb, sokkal integráltabb rendszert dolgozott ki, az *UG/Solids*-ot. Japán kutatók szintén munkához láttak a 80-as évek elején, hogy végül 1987-ben előálljanak *Designbase* nevű modellezőjükkel.

Az 1980-es évek végére a sok 3D modellezési eljárás egyesítésének hatására kialakult a ma használatos *parametrikus, asszociatív testmodellezés*. A paraméterezett geometriai modellezés a méretmegadás paramétereinek, az algebrai kifejezéseknek és geometriai kényszereknek az egyidejű kezelését foglalja magába.

1990-ben a Boeing elhatározta, hogy teljes mértékben áttér a digitális tervezésre, a papír alapú munkával teljes egészében felhagy. Ezen felbátorodva a nagy vállalatok úgy döntöttek, elkötelezik magukat valamelyik CAD szoftver mellett. A Mercedes-Benz, a Chrysler, a Renault és a Honda a *CATIA* mellett döntött. A Caterpillar a *Pro/Engineer*-t választotta, a General Motors pedig a *Unigraphics* rendszerei mellett kötelezte el magát.

Eljött az ideje, hogy a nagy CAD vállalatok belássák, a Pro/ENGINEER felépítése és felhasználói felülete olyan hatással volt a piacra, hogy azt az utat kell követni. Ennek következtében a rendszerek egyre jobban elkezdtek hasonlítani egymásra. Szép lassan minden rendszerben megjelent a vázlatkészítés (sketching), kényszerek kezelése (constraints-management), alakrajzosság alapú szilárdtest modellezés (feature-based solid modelling), modell fa (history tree), NURBS felületek és X-Windows alapú interface-ek.

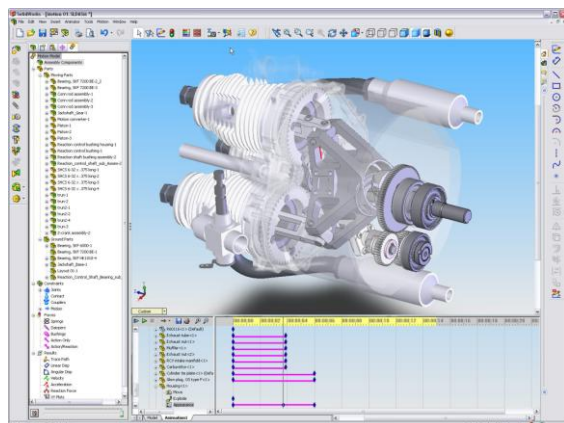
A NURBS felületek habár már korábban megjelentek, igazán csak ekkor váltak általánossá. Ezek sokkal általánosabb görbék mint a B-Spline vagy Bézier görbék. Például, míg egy Bézier kör csak egy többszögű közelítő kör, addig a NURBS görbe egy pontos kört ír le.

1990-94-ig az Autodesk AutoCAD release 13 programja soha nem látott népszerűsége tett szert. 4 év alatt 1 millió licencet adtak el. Időközben megjelent a Windows NT operációs rendszer, melyen a legtöbb CAD szoftver már futott.

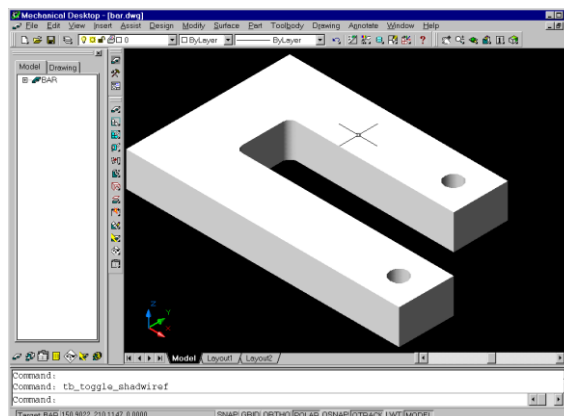
A felület és testmodellek már megfértek egymás mellett a rendszerekben. Az alakrajzosságok kezelése egyes rendszerek között még megoldásra váró probléma volt, bár már jelentek meg fordítók. A grafikus megjelenítő eszközök már bőven kiszolgálják az elvárásokat. A beemeneti eszközök nem sokat fejlődtek a kezdetek óta, billentyűzet, egér, nyomásérzékeny digitizáló tábla állt rendelkezésre. A hálózatok már megjelentek, de még mindig komoly akadály volt a sávszélesség. A szimulációs lehetőségek még csak korlátozottan érhetők el, de már megtalálhatók a mérnöki gyakorlatban.

A Boeing 777-es „papírmentes” tervezése világossá tette, hogy nem elég a CAD rendszerek modellezési eljárásait finomítani, felületet kell biztosítani a csoportos munkára, mely a nagy projektek esetén elkerülhetetlenné vált. Kezeln kellett azt a hatalmas adatbázist és rajzálománymintát mely egy-egy ilyen munka során keletkezett. Elkezdtek megjelenni az úgynevezett *PDM* (Product Data Management) eszközök, amelyek feladata, kezelni egy szervezeten belül azokat a folyamatokat és adatokat, amelyek a tervezés és gyártás során keletkeznek, valamint ezek kezelését támogatni a termék teljes életciklusa során. Ekkor még elsősorban PC-n érhető el, más rendszereken nem jellemző.

Ebben az időszakban jelent meg a piacon a SolidWorks. Ez ugyan a Pro/ENGINEER funkcióinak csak hozzávetőlegesen 80%-át kínálta, ám ára a Pro/ENGINEER árának 20%-a volt csupán. Mint minden program már ekkor, természetesen ez is parametrikus modellező program volt (1.26. ábra). A vállalatot végül 2 évvel később a Dassault Systems megvásárolta.



1.26. ábra. SolidWorks



1.27. ábra. Mechanical Desktop

A UNIX számítógépek ugyan erősebbek voltak, de a PC-k gyors fejlődése, és a Windows rendszeren futó CAD szoftverek olcsósága miatt, a UNIX piaci szerepe veszélybe került. 1995-been megjelent az Intel Pentium processzora, 1996-ban a Windows NT operációs rendszer, valamint 1997-ben az OpenGL-re épülő grafikus gyorsító kártyák, mely három esemény kiterjesztette a PC-k teljesítményét, elérhetővé tették a csúcskategóriás CAD rendszerek hardver elemeit, a UNIX mukaállomások végleg háttérbe szorultak.

1996-ban az Intergraph megjelent SolidEdge nevű szoftverével. Ezt igen nagy grafikai teljesítményű számítógépeikkel árulták, ám hasonlóan a SolidWorks-höz 1997-ben a Unigraphics felvásárolta.

Mivel az AutoCAD egy 2D rajzprogram volt, a vásárlók kezdtek elpártolni ettől a rendszertől, így az Autodesk rákényszerült egy minden funkciót kínáló 3D modellező kifejlesztésére, amely Mechanical Desktop lett (1.27. ábra).

Az ezredforduló előtti években az elvárások tovább nőttek a CAD rendszerekkel szemben. Modellezés terén már bőven elég funkciót kínáltak, ám a PDM és más, csoportos munkát elősegítő lehetőségek még mindig nem voltak tökéletesek, és főleg nem széles körben elterjedtek. 1997-ben a Dassault System előállt CATWeb navigátorral, mely lehetőséget adott az modellek és összeszerelések webes megjelenítésére, majd 1998 végén ezt kiegészítették ENOVIA névre keresztelt PDM II rendszerükkel, így létrehozva egy most már csoportos, országhatárokon átívelő projekt kezelésére alkalmas CAD szoftvert (1.28. ábra). Ezután sorra jelentek meg a hasonló webes és PDM kiegészítők. *iMAN* web és PDM szoftver, a Parametric Tech. *Windchill* PDM szoftvere, a HP *OpenSpace* nevű webes portálja.



1.28. ábra. ENOVIA

1999-ben megjelent a piac által régóta várt CATIA v5. Az első valóban Windows-os változat, végre valóban Windows-os felhasználói felülettel, felhasználó barát ikonokkal, menükkal és sok más kényelmi szolgáltatással. Ezt az utat követte a többi vezető vállalat is, beleértve az Autodesk-et is, megjelent az első, nem AutoCAD-en alapuló szoftvere, az Inventor.

A 90-es évek végére megvalósult a csoportos munka lehetősége, megjelenik a tudásmenedzsment, az internet is eléri azt a szintet, mely alkalmassá teszi a webes munkákra, megjelenik a 3D szkennelés mint új beviteli eszköz. Az alaksajátosságok végleg átvették a hatalmat, felváltották az egyszerű pontok, vonalak stb. helyét. Megjelentek a különböző végeselem és szimulációs lehetőségek, főként mechanikai, korlátozottan hőtani, mágneses és áramlástan feladatok megoldására.

Az ezredforduló után tovább folytak a munkák a LAN-on keresztüli tervezés fejlesztése irányában. A Toyota ebben is élen járt, már a 90-es évek közepén, még a „kliens-szerver” kifejezés megjelenése előtt használt ilyen rendszer, melyet TeamCAD-nek hívtak. Az Autodesk csak 2000 közepén jelent meg első web-es szolgáltatásokat nyújtó szoftverével, az AutoCAD 2000-rel. Ez lehetővé tette a rajzok web böngészőben történő megjelenítését, és minimális szintű együttműködő munkát a Microsoft Net Meeting-en keresztül.

A következő felmerülő igény, a termék-életpálya minimalizálása, a koncepció, tervezés, gyártás idejének minimalizálása.

Elsőként a Ford bizonyította be, mennyi idő takarítható meg az integrált gyártórendszerrel, amikor 2000-ben bemutatta a C3P (Ford saját integrált tervezőrendszere) rendszerben tervezett új Ford Mondeo-t. Ezzel a teljes tervezési és gyártási időtartamot a korábban szükséges idő 1/3-ára csökkentette. Az integrált gyártórendszer (ekkor már valóban erről beszélhetünk) nem csak időt takarított meg, de kiküszöbölt olyan problémákat is, mint egyes alkatrészek rossz méretezése, esetleg hiánya, amely problémák általánosak voltak. Most már azonban az alkatrészek a virtuális térben összeszerelhetők, így azonnal kiderül, ha nem illeszkedik a neki szánt helyre. Ütközésvizsgálat, és mozgás szimuláció végezhető el.

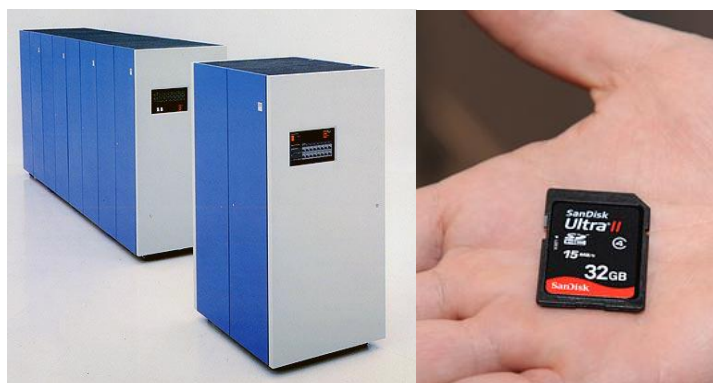
Megjelent egy új fogalom a termékfejlesztésben a PLM (Product Life-cycle Management/ Termék életciklus menedzsment). A négy nagyvállalat, a Dassault System, a Parametric Tech., az UGS, melyet 2008-ban megvásárolt a Siemens és az SDRC belátta, hogy a PLM meghatározó eleme lesz korunk mérnöki munkájának, így ezek után már nem is igazán CAD szoftverekről, inkább PLM rendszerekről beszélhetünk. A fejlesztő cégek tulajdonosi köre szinte folyamatosan változik, egyre nagyobb cégek jönnek létre, melyek mind több CAx rendszert integrálnak közös platformon, azonos felhasználó felületen, így elégítve ki a felhasználók igényeit. A cél az, hogy a tervezés során felvetődő valamennyi feladatot az adott cég termékével lehessen megoldani. Mindennapossá váltak a szimulációk és végeselem analízisek, a ki és bemeneti eszközök terén új eszközök jelentek meg (1.29. ábra).



1.29. ábra. SpaceMouse és SpacePilot a 3DConnexion-től

A mai rendszerek modellezési algoritmusai szinte minden modellezési szituációval megbirkóznak. Az átjárhatóság az egyes rendszerek között a fordítóknak, és jól működő semleges formátumoknak köszönhetően biztosított. Az internet sávszélesség korlátja szinte megszűnt, sőt elterjedően vannak igen nagy sebességű mobil internet lehetőségek. Napjaink meghatározó rendszerei: a Dassault Systemes CATIA & ENOVIA, a Siemens PLM Unigraphics & iMAN és a PTC Pro/ENGINEER & WindChill rendszerei.

A hardver elemek fejlődését jól szemlélteti az 1.30. ábra, melyen egy 1980-ban csúcskategóriának számító 20GB kapacitású IBM 3380 típusú disk egység látható, melynek tömege 2.000kg volt, az ára 800.000,- \$. A másik kép egy microSD kártyát mutat, mely 2010-re mindennapossá vált, kapacitása 32GB, tömege 1g, az ára 120,- \$.



A)

B)

1.30. ábra. A) IBM 3380 adattároló rendszer (1980.);
B) microSD memória kártya (2010.)

Az 1.1. táblázat a CAD rendszerek egyes elemeinek fejlődését mutatja [4]. A legfontosabb fejlődés jelenleg a 3D megjelenítés terén várható, valamint a CAx rendszerek integrációja, átjárhatósága és a fejlesztési ciklust lerövidítő technikák kerülnek előtérbe.

1.1. táblázat. CAD rendszerek teljesítőképességének fejlődése

	Múlt	Jelen	Jövő
Geometria	A modellezés gyakran igen speciális megközelítést igényel, a síkbeli elemek, felületek és szilárd testek ábrázolása külön sémákban történnek.	Csak a legkülönlegesebb alakzatok modellezése okozhat problémát, a testek és felületek modellezése együttesen létezik, az alaksajátosságok alkalmazása általánosan elterjedt.	A különböző geometriai elemek homogén ábrázolása, alaksajátosságok felismerése és parametrizálása.
Eszközök együttműködése	Egyedi fejlesztésű fordítók a funkciók szűkítésével, DXF, IGES.	Kereskedelmi fordítók, az alaksajátosságok nem kezelhetők, STEP.	Tudásalapú szándék felismerők, melyek képesek az ábrázolható komponensek kinyerésére és tetszőleges sémában történő megjelenítésére.

Grafikus és nem-grafikus adatok összefűzése	Rendszerenként eltérő módon, a geometriai fájlokban elrejtve.	Relációs kapcsolat a CAD fájlok és adatfájlok között, iparág specifikus XML megoldások, gyakori problémák.	Objektum orientált adatkezelés.
Megjelenítés	Költséges és alacsony teljesítmény, felbontás és színmélység.	Az általánosan elérhető sztenderd megjelenítő eszközök megfelelőek.	Nagyméretű megjelenítő eszközök, 3D-s megjelenítés.
Hálózatok	Nincs, esetleg nyomtató megosztás.	Szélessávú kommunikáció.	Sávszélesség nem korlátozó tényező, mobil hálózati eszközök elterjedése.
Beviteli eszközök – felhasználó/gép	Billentyűzet. Digitalizáló tábla.	Egér, speciális CAD orientált eszközök.	Mozdulat, szemmozgás felismerés.
Beviteli eszközök – dokumentumok és objektumok	Nehézkés 2D szkennelés.	Hatékony 2D-s szkennelés, szimbólum és szövegfelismerés. Számos kissé nehézkes 3D-s módszer létezik.	Teljes mértékben automatikus szöveg, szimbólum és alakfelismerés.
Kimeneti eszközök	Mátrix nyomtató, tollas plotter.	Nagy felbontású, nagy méretű nyomtatók. Lassú, korlátozott anyagválasztékú 3D kimeneti eszközök könnyen elérhetők.	Gyors, olcsó 3D prototípus eszközök, széles anyag és színválaszték, teljes értékű prototípus.
Interaktív eszközök	Nincs	Érintőképernyők, erővisszacsatolásos eszközök.	Érintésalapú interaktivitás.
Felhasználói felület	Billentyűzet, digitalizáló tábla, rendszerenként eltérő felhasználói felület, menüstruktúra.	Hierarchikus modellfa, egységesedő ikonok és menük, testre szabható felhasználói felület. Kiválasztási szándék felismerése.	Tanulásra képes felület, többszörös (különböző szempontokat figyelembe vevő) megjelenítés.
Elemzés	Költséges és nehézkes, CAD kapcsolat nincs, csak specialistáknak.	Integrált rendszerek, elérhető a tervezők számára.	Integrált, széleskörű elemző eszközök, kombinált elemzések.
Szimuláció	Ritka, specializált, nehézkes.	Számos területen elérhető, alkalmazása terjedőben (mechanika, áramlástan, hőtan, villamoságtan, mágnesesség, ergonómia stb.).	Széles körben elterjedt, integrált, kombinált szimulációk elvégzése napi tervezői feladat.
Koncepcionális fázis automatizálása	Nincs	Ötletgeneráló szoftverek megjelennek.	Ötletgenerálás, koncepciók újrafelhasználása, tudásalapú rendszerek széleskörű alkalmazása.
Csoportmunka	Papír alapú kooperáció, floppy.	Internet, PDM rendszerek.	Valós idejű együttműködés.
Tudásmenedzsment	Nincs	Szükségessége széles körben felismerésre kerül, egyedi megoldások léteznek.	A tervezési folyamatba teljes mértékben integrált.

1.6. Irodalom

- [1] Horváth Imre – Juhász Imre: Számítógéppel segített gépészeti tervezés 1.; Műszaki Könyvkiadó Budapest 1996.
- [2] Pahl, Gerhard – Beitz, Wolfgang: A géptervezés elmélete és gyakorlata; Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1981.
- [3] Roth, Karlheinz: Tervezés katalógussal; Műszaki könyvkiadó Budapest, 1989.
- [4] Dr. Kovács Zsolt: Tervezéselmélet II; Óbudai Egyetem Budapest, 2007.
- [5] Dr. Kamondi László: Tervezéselmélet; Miskolci Egyetem, 2002.
- [6] Gebhardt, Andreas: Rapid prototyping; Hanser Publication München 2003
- [7] VDI Regulation No. 2221
- [8] Tóth József: Merre tart a gépészeti CAD tervezés? CADvilág 2002. V. évf. 4.szám p.46-48.
- [9] CADAZZ: www.cadazz.com

2. CAD RENDSZEREK GEOMETRIAI ALAPJAI

Szerzők:

**Molnár László, Váradi Károly,
Hervay Péter, Mikó Balázs, Tóth G. Nóra**

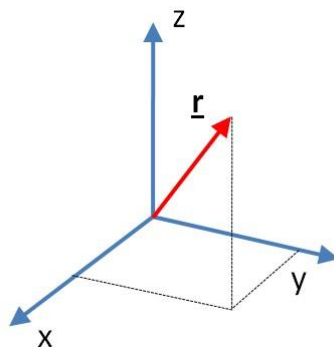
A számítógéppel segített gépészeti tervezés során egy virtuális modellt hozunk létre. Ez a modell több összetevőből áll, egyrészt a geometriai modellből, mely megadja az alkatrészek alakját, másrészt az ezt kiegészítő információkat leíró attribútumokból, mint például az alkatrész anyagminősége.

A modellezés során pontokat, görbéket, felületeket és testeket hozhatunk létre, ezek matematikai leírásával, valamint a hozzájuk kapcsolódó manipulációs eljárásokkal és megjelenítési problémákkal foglalkozik ez a fejezet. Egy CAD rendszer használatához általában nem szükséges ezen matematikai háttér ismerete, azonban segít megérteni és kijavítani bonyolultabb modellek létrehozása során tapasztalható modellezési problémákat, hibaüzeneteket.

2.1. Geometriai elemek ábrázolása

A geometriai elemeket jobbsodrású, derékszögű (un. Descartes-i) koordináta rendszerben ábrázoljuk, a koordináta tengelyek x , y , z (2.1. ábra).

A legegyszerűbb geometriai elem, amit általában segéd elemként használunk a modellezés során, az a **pont**. A pont megadása koordináta értékeinek megadásával történik.



2.1. ábra. Pont helyvektora derékszögű jobbsodrású koordináta rendszerben

$$P(x,y,z) \quad (2.1)$$

$$\underline{r} = x \cdot \underline{i} + y \cdot \underline{j} + z \cdot \underline{k} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Görbén folytonos vonalat értünk. Matematikai szempontból a görbe pontok halmaza. Ez a halmaz skalár egyenletekkel vagy vektor egyenletekkel definiálható, amelyeket a görbe pontjai elégítenek ki. Egy két dimenziós (2D-s) görbét felírhatunk *explicit* módon:

$$\begin{aligned} x &= x(t) \\ y &= y(t) \\ t &\in [0,1] \end{aligned} \quad (2.2)$$

vagy *implicit* formában is:

$$f(x,y)=0 \quad (2.3)$$

Például egy (x_0, y_0) középpontú, R sugarú kör explicit egyenlete:

$$\begin{aligned}
 x &= x_o + R \cdot \cos 2\pi t \\
 y &= y_o + R \cdot \sin 2\pi t \\
 t &\in [0,1]
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

illetve implicit egyenlete:

$$(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 - R^2 = 0 \tag{2.5}$$

Az explicit forma alkalmazása a görbén lévő pontok generálására alkalmas, míg az implicit forma segítségével egy adott pont illeszkedését tudjuk ellenőrizni, 0-t kell kapnunk, ha a pont koordinátáit behelyettesítjük az explicit egyenletbe. Mivel számítógépes grafikában az első feladatra van szükségünk, így az explicit alakot használjuk.

3D-s görbét explicit formában adhatjuk meg:

$$\begin{aligned}
 x &= x(t) \\
 y &= y(t) \\
 z &= z(t) \\
 t &\in [0,1]
 \end{aligned}
 \tag{2.6}$$

Például egy (x_1, y_1, z_1) ponttól (x_2, y_2, z_2) pontig tartó 3D-s egyenes szakasz explicit egyenlete:

$$\begin{aligned}
 x &= x_1 \cdot t + x_2 \cdot (1-t) \\
 y &= y_1 \cdot t + y_2 \cdot (1-t) \\
 z &= z_1 \cdot t + z_2 \cdot (1-t) \\
 t &\in [0,1]
 \end{aligned}
 \tag{2.7}$$

Egy modellezési feladat általában nem oldható meg klasszikus görbeszegmensek alkalmazásával (egyenes, kör, ellipszis stb.). Bármely görbe kellőpontossággal közelíthető egyenes szakaszokkal, azonban így nem mindenhol differenciálható görbét kapunk eredményül, amely bizonyos típusú analízisek esetén nem megfelelő. *Polinomok* alkalmazásával folyamatosan differenciálható görbéket kapunk, melyeket az a_i , b_i polinom együtthatók megadásával specifikálhatunk:

$$\begin{aligned}
 x(t) &= \sum_{i=0}^n a_i \cdot t^i \\
 y(t) &= \sum_{i=0}^n b_i \cdot t^i \\
 t &\in [0,1]
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

A polinom együtthatók nehezen tehetők szemléletessé, így megadásuk egy CAD rendszerben nehézkes, így a legtöbb CAD rendszerben vezérlő pontokat adhatunk meg, a pontos illesztést pedig a program végzi el. Amennyiben a megadott vezérlő pontokon átmegy a görbe, *interpolációról* beszélünk, abban az esetben, ha a megadott pontokat csak közelíti a görbe, *approximációnak* nevezzük. Mindkét módszerre találunk példát mind a matematikai leírások, mind a CAD rendszerek körében.

Lagrange-féle interpoláció esetén tegyük fel, hogy a megadott vezérlőpontok a következők: $\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_n$. Keressük azt a minimális fokszámú $L(t)$ polinomot, amely t_1 -nél $\vec{r}_1$, t_2 -nél $\vec{r}_2$ stb. értékeket vesz fel. Az eredmény $(n-1)$ -ed fokú polinom, az $[a_i, b_i]$ együtthatókat pedig a minden $j=1, 2, \dots, n$ vezérlőpontra felírt egyenletrendszer megoldása adja:

$$\vec{r}(t_j) = [x(t_j), y(t_j)] = \sum_{i=0}^{n-1} [a_i, b_i] \cdot t_j^i = \vec{r}_j \quad (2.9)$$

Az egyenletrendszer mindig megoldható, azonban van egyszerűbb megoldás is:

$$\vec{r}(t) = \sum_{i=0}^{n-1} L_i(t) \cdot \vec{r}_i, \text{ ahol } L_i(t) = \frac{\prod_{j \neq i} (t - t_j)}{\prod_{j \neq i} (t_i - t_j)} \quad (2.10)$$

Az $L_i(t)$ függvényt *súlyfüggvénynek* nevezzük. A Lagrange-interpoláció hajlamos az úgynevezett oszcillációra, ami azt jelenti, hogy a súlyfüggvény értéke negatív lesz, a vezérlő pont taszítja a görbét. A másik nehézség, hogy egy vezérlőpont a görbe minden részére hat, vagyis a pontok kis mozgásával a görbe módosított vezérlő pontjától távoli szakasza is módosul.

A **Coons-Hermite interpoláció** az illesztést helyileg, szakaszonként oldja meg, ehhez azonban ismerni kell a kontrollpontokban az érintővektorokat. Két szomszédos kontrollpontot összekötő görbeív analitikus előállítása egy harmadfokú, egyváltozós vektorfüggvény:

$$\mathbf{r}(t) = a_3 \cdot t^3 + a_2 \cdot t^2 + a_1 \cdot t + a_0 \quad (2.11)$$

Az ív két vége a két kontrollpontra ($\mathbf{p}_0$ és $\mathbf{p}_1$) kell támaszkodjon, a végpontokban az érintő egyenlő kell legyen az adott értékkel ($\mathbf{p}_0^u$ és $\mathbf{p}_1^u$):

$$\begin{aligned} \mathbf{r}(0) &= \mathbf{p}_0 & \mathbf{r}(1) &= \mathbf{p}_1 \\ \frac{d\mathbf{r}}{dt}(0) &= \mathbf{p}_0^u & \frac{d\mathbf{r}}{dt}(1) &= \mathbf{p}_1^u \end{aligned} \quad (2.12)$$

A harmadfokú súlyfüggvények, melyek kielégítik ezen feltételeket:

$$\begin{aligned} f_1(t) &= 2t^3 - 3t^2 + 1 \\ f_2(t) &= -2t^3 + 3t^2 \\ f_3(t) &= t^3 - 2t^2 + t \\ f_4(t) &= t_3 - t_2 \\ t &= [0,1] \end{aligned} \quad (2.13)$$

A görbeív egyenlete tehát:

$$\mathbf{r}(t) = f_1(t) \mathbf{p}_0 + f_2(t) \mathbf{p}_1 + f_3(t) \mathbf{p}_0^u + f_4(t) \mathbf{p}_1^u \quad (2.14)$$

A folytonosság feltétele, hogy a szomszédos íveknek a közös végpontjukban azonos legyen az érintő, a görbület viszont általában nem folytonos.

Az érintők értékének meghatározása kényelmetlen a felhasználó számára, ezért a belső kontrollpontokhoz tartozó érintőt automatikusan határozza meg a program a két szomszédos kontrollpontot összekötő vektorként:

$$\mathbf{r}(t) = f_1(t) \mathbf{p}_i + f_2(t) \mathbf{p}_{i+1} + f_3(t) \mathbf{p}_i^u + f_4(t) \mathbf{p}_{i+1}^u \quad (2.15)$$

ahol

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_0^u &= \mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_0 \\ \mathbf{p}_i^u &= \mathbf{p}_{i+1} - \mathbf{p}_{i-1} \\ \mathbf{p}_n^u &= \mathbf{p}_n - \mathbf{p}_{n-1} \\ i &= 1, 2, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (2.16)$$

Nyílt görbe esetén a végpontokban az érintő az illető pontot a szomszédos kontrollponttal összekötő vektor.

A Coons-Hermite görbék alkalmazását tovább színesíti, ha a $\mathbf{p}_i^u$ érintővektorokat megszorozzuk egy k_0 állandóval. Ha $k_0 < 1$, a görbék csúcsosabbak lesznek. A $k_0 = 0,5$ érték alkalmazása esetén *Overhauser interpolációról* beszélünk.

A **Bézier interpoláció** célja sima görbék és felületek több kontrollpont segítségével való szerkesztése volt, hogy megkönnyítse a számítógépes formatervezést. Az 1972-ben megalkotott görbe a következő tulajdonságokkal rendelkezik:

- a görbe átmegy a szélső pontokon ($\mathbf{p}_0$ és $\mathbf{p}_n$),
- az érintő a szélső pontokban $\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_0$ és $\mathbf{p}_{n-1} - \mathbf{p}_n$.
- a súlyfüggvények szimmetrikusak legyenek t és $1-t$ -re nézve, azaz a sorrend megfordítása ne befolyásolja a görbe alakját.

A súlyfüggvények meghatározása tehát a görbetervezés kulcsa. Egy fontos súlyfüggvény készlethez jutunk, ha a $(t + (1-t))^n$ binomiális tétel szerinti kifejtésével. E kifejtés egyes tagjait **Bernstein-polinom**nak nevezzük:

$$(t + (1-t))^n = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} \cdot t^i \cdot (1-t)^{n-i} \quad (2.17)$$

$$B_i^{(n)}(t) = \binom{n}{i} \cdot t^i \cdot (1-t)^{n-i} \quad (2.18)$$

A polinom átmegy az első és utolsó vezérlő ponton, de általában nem megy át a többi vezérlőponton. A Bernstein-polinomot alkalmazó approximációs görbét **Bézier-görbének** nevezzük.

Az $n=3$ eset a Bézier-görbék fontos speciális esete, amikor négy kontrollpont harmadrendű görbét eredményez. A harmadrendű görbék a legalacsonyabb rendű görbék melyekkel térgörbe modellezhető, valamint olyan görbék, amelyeknek inflexiós pontja, csúcspontja vagy önmetszéspontja lehet.

A harmadrendű Bézier-görbe Bernstein-polinom alakja a következő:

$$\begin{aligned} \underline{b}(t) &= \sum_{i=0}^3 \underline{b}_i \cdot \binom{3}{i} \cdot t^i \cdot (1-t)^{3-i} \\ \underline{b}(t) &= \underline{b}_0 \cdot (1-t)^3 + 3 \cdot \underline{b}_1 \cdot t \cdot (1-t)^2 + 3 \cdot \underline{b}_2 \cdot t^2 \cdot (1-t) + \underline{b}_3 t^3 \end{aligned}$$

$$\underline{b}(t) = \underline{b}_0 \cdot (-t^3 + 3 \cdot t^2 - 3 \cdot t + 1) + \underline{b}_1 \cdot (3 \cdot t^3 - 6 \cdot t^2 + 3t) + \underline{b}_2 \cdot (-3 \cdot t^3 - 3 \cdot t^2) + \underline{b}_3 t^3 \quad (2.19)$$

A kezdő és végpontbeli érintő a következő:

$$\underline{b}'(0) = 3 (\underline{b}_1 - \underline{b}_0) \quad \underline{b}'(1) = 3 (\underline{b}_3 - \underline{b}_2)$$

Mátrix alakban felírva:

$$\underline{b}(t) = \begin{bmatrix} t^3 & t^2 & t & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{b}_0 \\ \underline{b}_1 \\ \underline{b}_2 \\ \underline{b}_3 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Bonyolult görbéket sok vezérlő ponttal tudunk definiálni. A görbék illesztése során kétféle stratégiát alkalmazhatunk, vagy magas foks számú polinomot illesztünk a görbére, vagy több kisebb foks számút. A magas foks számú polinomok hajlamosak a hullámosodásra, ezért a több, alacsonyabb foks számú polinomból álló összetett görbéket preferáljuk.

Az illeszkedő szegmenseknek folytonosnak kell lenni, a folytonosságnak több szintje létezik. Két görbe geometriai értelemben 0-ad rendben folytonos (G^0 folytonos), ha az első görbe végpontja megegyezik a második görbe kezdőpontjával. Ugyan ezen tulajdonsággal rendelkeznek a 0-ad rendben paraméteresen folytonos görbék (C^0 folytonos), melyeknél $\vec{r}_1(t_{end}) = \vec{r}_2(t_{start})$. Beszélhetünk mind geometriai, mind parametrikus értelemben magasabb rendű folytonosságról, például G^1 folytonosságról beszélünk, ha a csatlakozó görbék érintői párhuzamosak. Parametrikus értelemben tetszőleges foks számra általánosítva a definíciót két görbe parametrikusan C^n folytonos illeszkedésű, ha a két görbe deriváltja a vég- illetve kezdőpontban n . deriváltig megegyezik.

A műszaki tervezésben általában C^2 folytonos görbékre van szükségünk, melyek összefoglaló neve **szplájn (spline)**.

A legegyszerűbb polinom, amelynél a második derivált nem állandó, harmadfokú, így a C^2 folytonosságot legegyszerűbben **harmadfokú szplájnnal** teljesíthetjük, melynek általános alakja:

$$\underline{p}(t) = \underline{a}_3 \cdot t^3 + \underline{a}_2 \cdot t^2 + \underline{a}_1 \cdot t + \underline{a}_0 \quad (2.21)$$

Folytonosságot feltételezve:

$$\begin{aligned} \underline{p}(0) &= \underline{a}_0 \\ \underline{p}(1) &= \underline{a}_3 + \underline{a}_2 + \underline{a}_1 + \underline{a}_0 \\ \underline{p}'(0) &= \underline{a}_1 \\ \underline{p}'(1) &= 3 \cdot \underline{a}_3 + 2 \cdot \underline{a}_2 + \underline{a}_1 \end{aligned} \quad (2.22)$$

Amennyiben az $\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_n$ vezérlőpontok úgy illeszkednek a görbeszegmensekhez, hogy az első szegmens $\vec{r}_1$ -től $\vec{r}_2$ -ig tart, a második $\vec{r}_2$ -től $\vec{r}_3$ -ig stb., akkor az i . szegmens paramétereit úgy kell megválasztani, hogy

$$\bar{p}_i(0) = \bar{r}_i \quad \bar{p}_i(1) = \bar{r}_{i+1} \quad (2.23)$$

Ha a görbe C^1 illetve C^2 folytonos, akkor az első és második deriváltak azonosak, vagyis:

$$\bar{p}_i'(1) = \bar{p}_{i+1}'(0) \quad \bar{p}_i''(1) = \bar{p}_{i+1}''(0) \quad (2.24)$$

A kapott lineáris egyenletrendszert megoldva megkaphatjuk a kívánt görbeszegmenset, azonban az ismeretlenek száma több, mint az egyenletek száma, így végtelen sok megoldás létezik.

Amennyiben a görbe kezdő és végpontjában is megadjuk a deriváltak értékét, a feladat megoldhatóvá válik és eljutunk a **B-szplájn**okhoz, melyek általános alakja az r_i vezérlőpontok mellett B_i súlyfüggvényeket tartalmaz:

$$\bar{r}(t) = B_0(t) \cdot \bar{r}_0 + B_1(t) \cdot \bar{r}_1 + B_2(t) \cdot \bar{r}_2 + B_3(t) \cdot \bar{r}_3 \quad (2.25)$$

A folytonossági és peremfeltételeket figyelembe véve a súlyfüggvények értéke:

$$\begin{aligned} B_0(t) &= \frac{(1-t)^3}{6} \\ B_1(t) &= \frac{1+3 \cdot (1-t) + 3 \cdot t \cdot (1-t)^2}{6} \\ B_2(t) &= \frac{1+3 \cdot t + 3 \cdot (1-t) \cdot t^2}{6} \\ B_3(t) &= \frac{t^3}{6} \end{aligned} \quad (2.26)$$

A B-szplájn approximációs görbe, vagyis nem megy át a vezérlő pontokon, lokálisan vezérelhető, vagyis egy vezérlő pont mozgatása csak az adott görbeszakaszra van hatással.

A szplájnok általánosításával rugalmasabban alkalmazható görbékhez jutunk, például a B-szplájnt kiterjeszthetjük oly módon, hogy az egymást követő szegmensek eltérő méretű paramétertartományt fednek el (eddig feltételeztük, hogy minden szegmens paramétertartománya egységsíni). A B-szplájn ezen változatát nem uniform B-szplájnnak (*non-uniform B-spline* vagy *NUBS*) nevezzük. Amennyiben a súlyfüggvény két polinom hányadosa is lehet, racionális B-szplájnt kapunk (*rational B-spline* vagy *RBS*). A két kiterjesztést egyszerre alkalmazva kapjuk a nem-egyenközű racionális B-szplájnt (*non-uniform rational B-spline* vagy *NURBS*).

A **3D felületek**, a görbékhez hasonlóan definiálhatók explicit egyenletekkel:

$$\begin{aligned} x &= x(u, v) \\ y &= y(u, v) \\ z &= z(u, v) \\ u, v &\in [0, 1] \end{aligned} \quad (2.27)$$

vagy implicit egyenlettel:

$$f(x,y,z)=0 \quad (2.28)$$

Például egy (x_o, y_o, z_o) középpontú, R sugarú gömb explicit egyenlete:

$$\begin{aligned} x &= x_o + R \cdot \cos 2\pi u \cdot \sin \pi v \\ y &= y_o + R \cdot \sin 2\pi u \cdot \sin \pi v \\ z &= z_o + R \cdot \cos \pi v \\ u, v &\in [0,1] \end{aligned} \quad (2.29)$$

illetve implicit egyenlete:

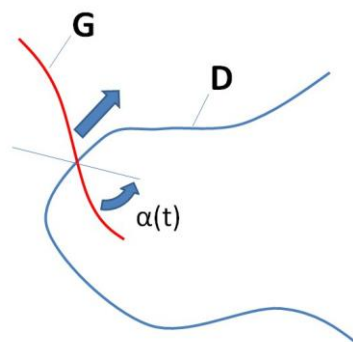
$$(x - x_o)^2 + (y - y_o)^2 + (z - z_o)^2 - R^2 = 0 \quad (2.30)$$

Kvadratikus felületek hozhatunk létre akkor, ha bármely változó legfeljebb másodfokú alakban szerepelhet. Ezen felületek homogén koordinátás alakban egyszerűen kezelhetők, ahol Q egy 4×4 -es konstans együttható mátrix. Ilyen formában kezelhető a gömb, hengerpálast, kúp, hiperboloid, paraboloid stb. felületek.

$$\begin{bmatrix} x & y & z & 1 \end{bmatrix} \cdot \underline{Q} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (2.31)$$

Ezen analitikus felületekkel azonban nem írható le a gépipari alkatrészek határoló felületei, gyakran kell alkalmaznunk úgynevezett bonyolult vagy szabad formájú felületeket. Három csoport különböztethető meg: (1) translációs felületek, (2) vonal felületek, (3) szoborfelületek.

A **transzlációs felületek** úgy hozhatók létre, hogy egy rendszerint síkbeli nyitott vagy zárt görbe (direktrix D) mentén egy másik görbe (generátor G) úgy mozdul el, hogy általános kúp- vagy hengeralkotóként működik, vagy hajlásszögét meghatározott módon változtatja. A felület meghatározásához tehát két görbe megadására és az esetleges „billegés” definiálása szükséges. Transzlációs felületként analitikus felületek is megadhatók, mint például sík, gömb, henger, kúp stb.

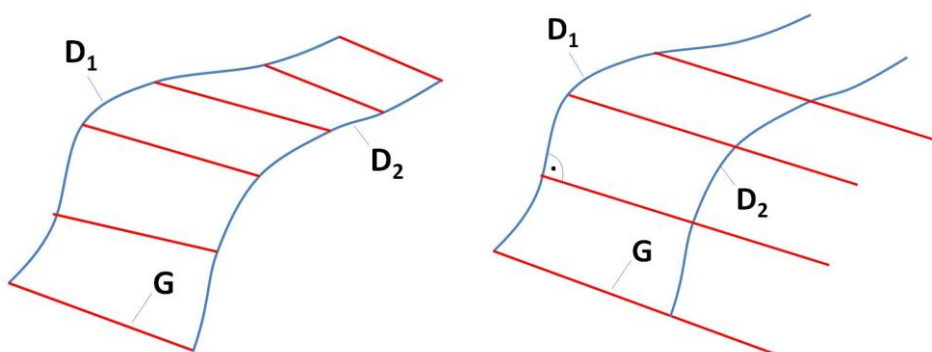


2.2. ábra. Transzlációs felület létrehozása

Vonalfelületek létrehozásához egy generátor (G) térgörbére és két direktrix térgörbére (D_1 , D_2) van szükségünk. A generálás sokféle módon valósítható meg (2.3. ábra).

Első esetben a két direktrixen úgy halad végig az egyenes generátor görbe, hogy D_1 és D_2 görbe kezdőpontjából egyszerre indul a generátor egyenes, és a görbék végpontjába egyszerre érkezik meg. A második esetben az egyik direktrixnek kitüntetett szerepe van (pl. D_1), melyre a generátor egyenes mindig merőleges.

További altípusokat hozhatunk létre, ha a generátor görbe nem egyenes, illetve ha a generátor görbe a direktrixek mentén folyamatosan változtatja az alakját.



2.3. ábra. Vonalfelület generálása

Szoborszerű felületekről akkor beszélünk, amikor a felület sem analitikusan, sem görbék mozgásával nem írható le. Ezen felületek leírására többféle technika létezik, melyek közös jellemzője, hogy térbeli ponthálóra simítják a felületet.

A **parametrikus felületek** kétváltozós polinomok:

$$\vec{r}(u, v) \quad u, v \in [0, 1] \quad (2.32)$$

A polinomokat vezérlő pontok segítségével, súlyfüggvényekkel állíthatjuk elő, hasonlóan a görbéknél látottakhoz:

$$\vec{r}(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \vec{r}_{ij} \cdot B_{ij}(u, v) \quad u, v \in [0, 1] \quad (2.33)$$

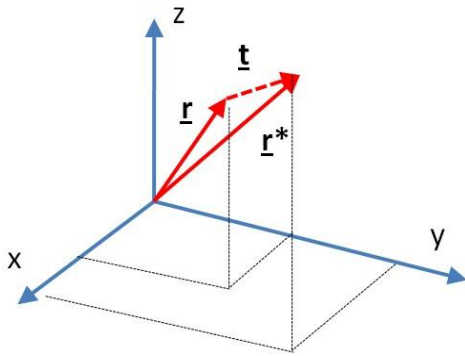
A Bézier-görbék súlyfüggvényéből képzett szorzatot használva a $B_{ij}(u,v)$ súlyfüggvényként megkapjuk a **Bézier-felületet**, melynek így a súlyfüggvénye:

$$B_{ij}(u,v) = \binom{n}{i} \cdot u^i \cdot (1-u)^{n-i} \cdot \binom{m}{j} \cdot v^j \cdot (1-v)^{m-j} \quad (2.34)$$

2.2. Geometriai transzformációk

A definiált geometriai elemek megváltoztatását hívjuk transzformációnak, mely elengedhetetlen a modellezés során. A különböző transzformációkat egy pont manipulálásán keresztül mutatjuk be, mivel bonyolultabb geometriai elemek transzformációja ezen műveletek pontonkénti ismétlésével oldható meg.

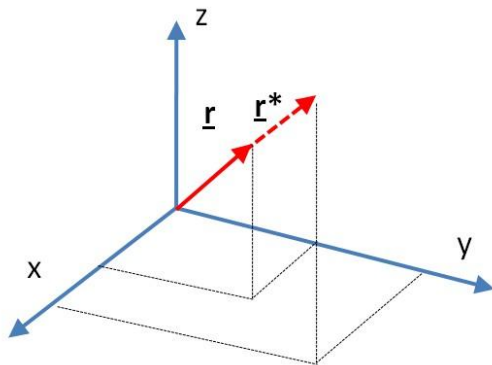
Eltolás során az $\underline{r}$ helyvektorhoz egy $\underline{t}$ eltolás vektort adunk, így kapva meg az $\underline{r}^*$ eltolított helyvektort (2.4. ábra).



$$\underline{r}^* = \underline{r} + \underline{t} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x + t_1 \\ y + t_2 \\ z + t_3 \end{bmatrix}$$

2.4. ábra. Eltolás, eltolási vektor

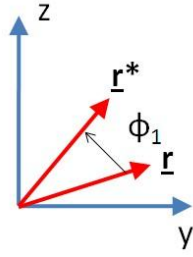
Skálázás vagy **nyújtás** során a koordináta értékeket egy konstanssal szorozzuk (2.5. ábra). A konstansok értéke 0-nál nagyobb, C_1, C_2, C_3 értéke lehet egyenlő, de különböző is. A skálázás mátrix szorzásként hajtható végre.



$$\underline{r}^* = \underline{C} \cdot \underline{r} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \cdot x \\ C_2 \cdot y \\ C_3 \cdot z \end{bmatrix}$$

2.5. ábra. Skálázás, skálázási mátrix

Az elforgatás legegyszerűbb módja az x_i koordináta tengely körüli elforgatás φ_i szöggel. Az elforgatott pont koordinátáit az $\underline{F}_i$ forgatómátrixszal való szorzás adja (2.6. ábra).



Forgatás x tengely körül: $\underline{r}^* = \underline{F}_1 \underline{r}$
 Forgatás y tengely körül: $\underline{r}^* = \underline{F}_2 \underline{r}$
 Forgatás z tengely körül: $\underline{r}^* = \underline{F}_3 \underline{r}$

$$\underline{F}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 \\ 0 & \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 \end{bmatrix}$$

$$\underline{F}_2 = \begin{bmatrix} \cos \varphi_2 & 0 & \sin \varphi_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi_2 & 0 & \cos \varphi_2 \end{bmatrix}$$

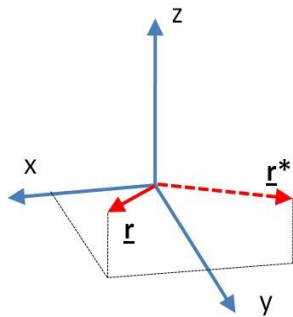
$$\underline{F}_3 = \begin{bmatrix} \cos \varphi_3 & -\sin \varphi_3 & 0 \\ \sin \varphi_3 & \cos \varphi_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.6. ábra. Forgatás koordináta tengely körül, forgatási mátrixok

Amennyiben több tengely mentén kell elforgatni az objektumot, az elforgatást tengelyenként sorban tudjuk elvégezni. Például x_2 majd x_1 tengely körüli elforgatás esetén:

$$\underline{r}^* = \underline{F}_1 \cdot \underline{F}_2 \cdot \underline{r} \quad (2.35)$$

Koordináta síkra való tükrözés esetén a kijelölt síkra merőleges koordináta értéket kell -1-gyel szorozni. A transzformáció mátrixszorzásként az $\underline{S}_i$ tükrözési mátrixszal oldható meg (2.7. ábra).



Tükrözés [y,z] síkra: $\underline{r}^* = \underline{S}_x \underline{r}$
 Tükrözés [x,z] síkra: $\underline{r}^* = \underline{S}_y \underline{r}$
 Tükrözés [x,y] síkra: $\underline{r}^* = \underline{S}_z \underline{r}$

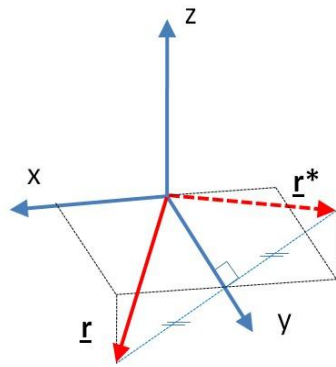
$$\underline{S}_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\underline{S}_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\underline{S}_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

2.7. ábra. Tükrözés koordináta síkra, tükrözési mátrixok

Koordináta tengelyre való tükrözés esetén a tükrözési tengelyen kívüli koordináta értéket kell -1-gyel megszorozni, amely az $\underline{S}_{i,j}$ tükrözési mátrixszal való szorzást jelent (2.8. ábra).



x tengelyre: $\underline{r}^* = \underline{S}_{y,z} \underline{r}$
 y tengelyre: $\underline{r}^* = \underline{S}_{x,z} \underline{r}$
 z tengelyre: $\underline{r}^* = \underline{S}_{x,y} \underline{r}$

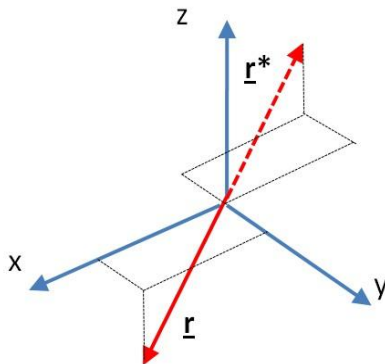
$$\underline{S}_{y,z} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\underline{S}_{x,z} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\underline{S}_{x,y} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.8. ábra. Tükrözés koordináta tengelyre, tükrözési mátrixok

A koordináta rendszer középpontjára, vagyis az **origóra tükrözés** esetén mindhárom koordináta értéke előjelet vált. Az $\underline{S}$ tükrözési mátrix adja az új pont koordinátáit (2.9. ábra).



$$\underline{r}^* = \underline{S} \underline{r}$$

$$\underline{S} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

2.9. ábra. Tükrözés az origóra, tükrözési mátrix

A transzformációk egy kivételével mátrix szorzásként végezhető. Több transzformáció végrehajtása esetén azonban az eltolás nehezíti ezt a műveletet. A probléma kiküszöbölésére vezethetjük be a **homogén transzformációs mátrixok**kal végzett műveleteket. Ezen mátrixok 4x4-es mátrixok, a helyvektorok pedig kiegészülnek egy negyedik, 1 értékű elemmel.

Ennek megfelelően az eltolás a következő képen alakul:

$$\underline{r}^* = \underline{r} + \underline{t} \rightarrow \underline{R}^* = \underline{T} \underline{R} \quad (2.36)$$

ahol $\underline{R}$ a kiterjesztett helyvektor, $\underline{T}$ pedig az eltolás homogén transzformációs mátrixa:

$$\underline{\underline{R}} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \underline{\underline{T}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & t_1 \\ 0 & 1 & 0 & t_2 \\ 0 & 0 & 1 & t_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

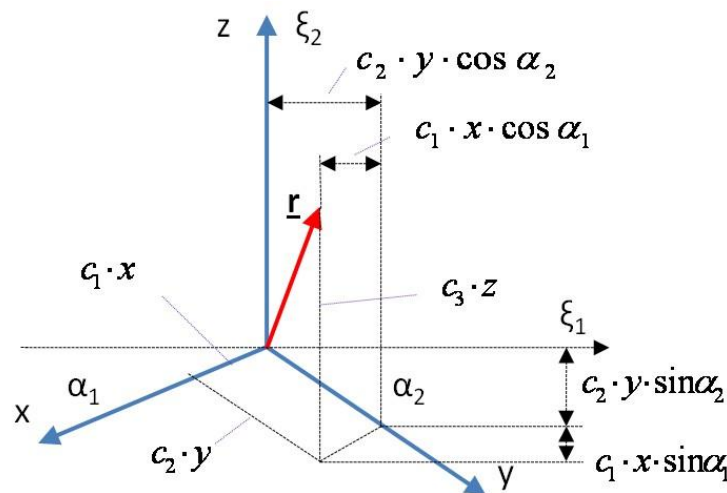
Ennek megfelelően az x_1 tengely körüli elforgatás homogén transzformációs mátrixa:

$$\underline{\underline{F}}_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi_1 & -\sin \varphi_1 & 0 \\ 0 & \sin \varphi_1 & \cos \varphi_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

2.3. Térbeli alakzat síkban ábrázolása

A virtuális térben létrehozott 3D-s modellt a számítógép képernyőjének 2D-s síkjában kell megjeleníteni, tehát egy síkba vetítést kell először alkalmazni. A síkbeli ábrázolás általános esetét mutatja a 2.10. ábra.

A c_1, c_2, c_3 tengelyléptékek a koordináta tengelyek rövidülését mutatják, az α_1, α_2 szögek pedig az x, y tengelyek vetített képe és a ξ_1 tengely által bezárt szöget.



2.10. ábra. Térbeli pont ábrázolása síkban

Az ábra alapján könnyen belátható, hogy a 2D-s koordináta-rendszerben a 3D-s pont koordinátái a következők:

$$\begin{aligned} \xi_1 &= c_2 \cdot y \cdot \cos \alpha_2 - c_1 \cdot x \cdot \cos \alpha_1 \\ \xi_2 &= c_3 \cdot z - c_2 \cdot y \cdot \sin \alpha_2 - c_1 \cdot x \cdot \sin \alpha_1 \end{aligned} \quad (2.39)$$

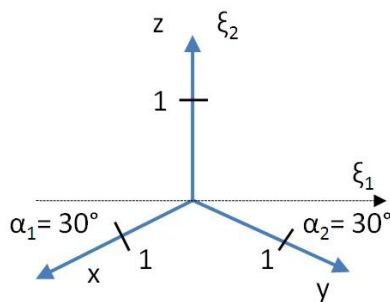
Az eddigiekhez hasonlóan ez a transzformáció is felírható mátrix műveletként, ahol a $\underline{\rho}$ 2D-s vektort az $\underline{\underline{A}}$ axonometria mátrix és az $\underline{r}$ vektor szorzata adja:

$$\underline{\rho} = \underline{A} \underline{r}$$

$$\begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -c_1 \cdot \cos \alpha_1 & c_2 \cdot \cos \alpha_2 & 0 \\ -c_1 \cdot \sin \alpha_1 & -c_2 \cdot \sin \alpha_2 & c_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

A c_1, c_2, c_3 , valamint az α_1, α_2 szögek speciális megválasztásával különféle axonometrikus ábrázolásokat tudunk létrehozni, valamint a számítógép képernyőjén a nézőpont dinamikus változtatásával ezen paraméterek változnak.

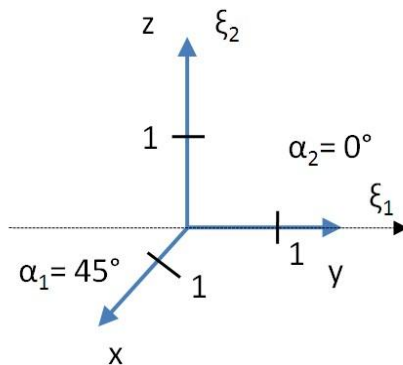
Izometrikus axonometriáról beszélünk, ha $\alpha_1 = \alpha_2 = 30^\circ$ és $c_1 = c_2 = c_3 = 1$, tehát x, y tengelyek szimmetrikusan helyezkednek el és a tengelyeken nincs rövidülés (2.11. ábra).



$$\underline{A} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

2.11. ábra. Izometrikus axonometria és transzformációs mátrixa

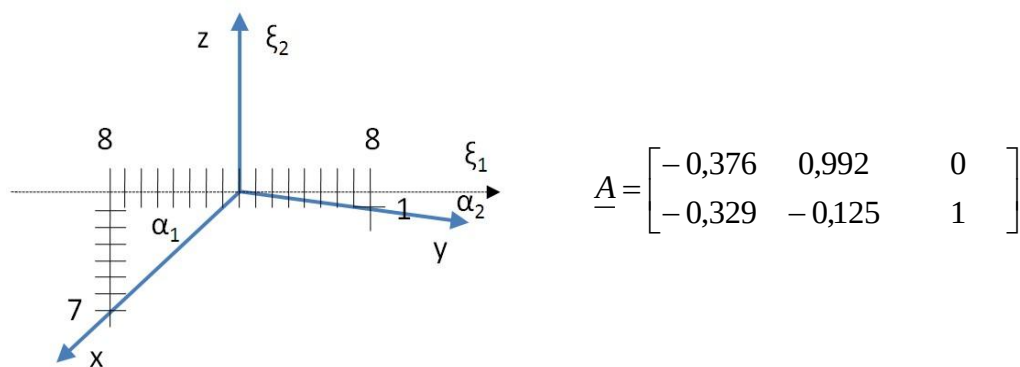
Frontális axonometria esetén az x_2 tengely egybe esik ξ_1 tengellyel, x_1 tengely 45° -os szöget zár be, az y, z tengelyeken nincs rövidülés, míg x tengelyen a rövidülés $\frac{1}{2}$ (2.12. ábra). Tehát: $\alpha_1 = 45^\circ$; $\alpha_2 = 0^\circ$; $c_1 = 1/2$; $c_2 = c_3 = 1$.



$$\underline{A} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{2}}{4} & 1 & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{4} & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.12. ábra. Frontális axonometria és transzformációs mátrixa

Dimetrikus axonometria esetén az x tengely hajlásszöge $\alpha_1 = \arctg 7/8 = 41^\circ 10'$, az y tengelyé $\alpha_2 = \arctg 1/8 = 7^\circ 10'$, a tengelyek mentén nincs rövidülés, tehát $c_1 = c_2 = c_3 = 1$ (2.13. ábra).



2.13. ábra. Dimetrikus axonometria és transzformációs mátrixa

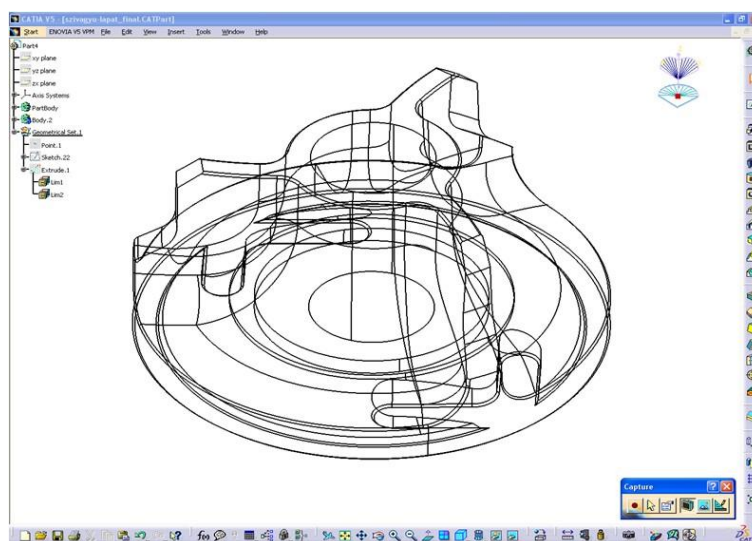
2.4. Megjelenítés

A számítógépes modellezés segítségével a tervezés során képet kaphatunk az elkészítendő objektumról. A korábbi 2D-s tervezést felváltotta a 3D-s, az új megjelenítési technikák és algoritmusok elterjedésével. Egyre inkább arra törekednek, hogy a megjelenítendő objektum képe minél valóság hűbb és szemléletesebb legyen. Ennek érdekében lehetőséget kell biztosítani, hogy különböző fényviszonyok mellett is megtekinthető legyen az objektum. Különböző árnyalási és árnyékolási technikák alkalmazhatóak valamint a fényviszonyok mellett beállítható az megjelenítendő objektum anyaga (textúra) is.

A továbbiakban a 3D-s megjelenítés néhány típusáról, technikájáról lesz szó valamint az objektum megjelenítési beállításairól.

Drótvázas megjelenítés

A 3D-s modell megjelenítése során először a szabadformájú elemek közelítését végezzük el. A drótvázás megjelenítés segítségével a test éleit megjelenítve kaphatunk képet az objektum felépítéséről (2.14. ábra). Problémát jelenthet azonban, hogy gyakran ebben a formában nem lehet egyértelműen megjeleníteni az ábrázolt testet, mivel nem kivehető, hogy melyek a látszó és a takart élek. A megjelenítés előnye viszont a gyors megjelenítés, rövid számítási idő.



2.14. ábra. Drótvázás modell megjelenítése CATIA v5 tervezőrendszer segítségével

Különösen szimmetrikus testek esetében a árnyékolt (renderelt) kép teszi világossá a test éleinek elhelyezkedését, egyértelmű képét [4].

Takarási feladatok megoldása

3D-s modell esetén el kell döntenünk, hogy melyek azok az élek, amelyek megjelennek egy adott képen és melyek azok, amelyek a nézőpontból nem láthatók.

Több olyan algoritmus is ismert, amelyek segítségével ez a probléma hatékonyan megoldható. A láthatósági algoritmusok segítségével lehetőség van egy modellezett objektum látható éleinek és felületeinek kiválasztására. Egy meghatározott nézőpont mellett megadható, hogy az elkészített objektum melyik része látható, melyek a takart és a megjelenítendő élek [6][7].

A továbbiakban néhány ismert, a takarási feladatok megoldására alkalmazott módszer rövid leírása látható.

Sugárkövető algoritmus (ray-tracing)

A sugárkövető algoritmus során a nézőpontból a fotonok útját követve határozhatjuk meg, hogy az objektumnak mely részei láthatóak. Az algoritmus segítségével a képernyő pixeleire egyenként végezhetőek el az árnyalási és takarási feladatok [6].

Az algoritmus működéséhez definiálni kell egy nézőpontot valamint egy ablakot egy tetszőleges vetítési síkon. Az ablak minden pixelébe a nézőpontból képzeletbeli vetítésugarakat indítva a nézőponthoz legközelebb elhelyezkedő objektum határozza meg a pixel színét. A legfontosabb követelmény ezekkel az algoritmusokkal szemben, hogy az említett metszéspontok kiszámítására alkalmas legyen. A sugárkövető algoritmus nagy számítási feladatai miatt időigényes, ezért a metszéspontok kiszámításának idejét próbálják csökkenteni, a módszer hatékonyságának növelésével.

Rekurzív sugárkövető algoritmus

A számítógépes grafikában az egyik legelterjedtebben alkalmazott algoritmus. Alkalmazása során lényegében abban különbözik az előbb ismertetett sugárkövető algoritmustól, hogy a nézőpontba indított sugarak nyomon követése mellett másodlagos sugarakat is használ a pixel színének meghatározása során. Ezek lehetnek fényforrással összekötő sugarak, megtörő és visszatükröződött sugarak [6][7].

Az algoritmus számítási igénye csökkenthető több módszerrel. Az egyik lehetőség, hogy megfordítva a sugarakat, amelyekkel számolunk, csak azokkal foglalkozunk, amelyek eljutnak az ablak celláin keresztül a nézőpontba.

A másik lehetőség, hogy ha úgynevezett befoglaló testeket (legtöbbször gömböket) definiálva csökkentjük a kiszámítandó metszéspontok mennyiségét azzal, hogy csak azokban az esetekben számítjuk ki azokat, ha a befoglaló gömböt is metszi a sugár [7].

Z-buffer algoritmus

A z-buffer algoritmus egyszerűen, gyorsan használható, nagy memória igényű, azonban bármilyen alakú 3D-s objektum ábrázolására alkalmazható. Minden egyes pixelnek a színét meghatározza, majd az eredményt kirajzolja.

Az algoritmus két változót használ. Az egyikben tárolja a pixelek színét (frame-buffer), a másikban a nézőponttól való távolság értékét (z-buffer). Alapbeállításként a pixelek színe a háttér színével megegyezik.

Minden megjelenítendő felület pontjaihoz meghatározza az algoritmus a z értéket és amennyiben ez nagyobb az eddig az adott pixelre kiszámított értéknél (z-buffer), akkor ezzel az értékkel felülírjuk a z-buffer értékét valamint a megfelelő színértéket beállítjuk a frame-bufferben.

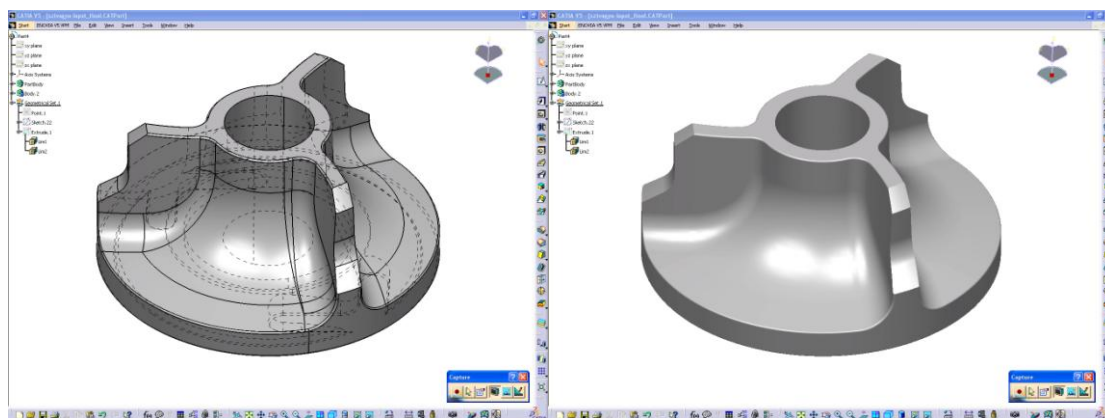
Az algoritmus nagy előnye, hogy független a megjelenítendő objektum alakjától, mindössze a nézőponttól való távolságok meghatározhatóságára van szükség valamint az objektum színével, textúrájával valamint a megvilágításával kapcsolatos információkra.

Hátránya a nagy számítás és erőforrásigénye és nehéz kombinálhatósága más eljárásokkal [6][7].

Árnyalás (Shading)

A modell megrajzolását követően a kiszínezését kell elvégezni a valósághű megjelenítés érdekében. Ehhez 3D-s modell készítése esetén tisztában kell lennünk a fényviszonyokkal és annak függvényében határozható meg az egyes képpontok színe. (2.15. ábra)

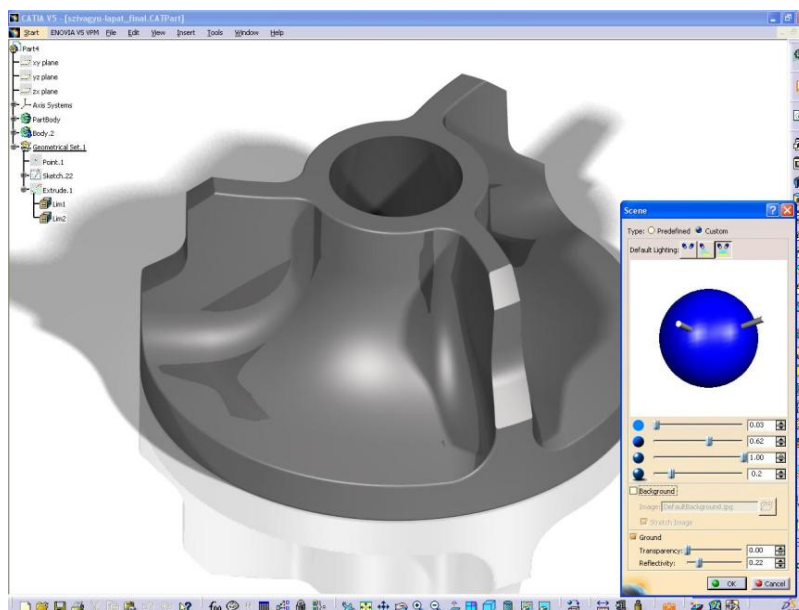
Az árnyalás során a pixelek színének meghatározása és ábrázolása nagy számításigényű, bonyolult feladatot jelenthet. Az idő és erőforrás igény csökkentése érdekében több algoritmus is használható 3D-s megjelenítés során [5][6][7].



2.15. ábra. Ford szivattyúlapát 3D modell árnyalása CATIA v5 tervezőrendszer segítségével

Fények

A modell megjelenítése során több eltérő fényforrást is elhelyezhetünk. A fényforrások elhelyezkedése valamint a kibocsátott fény intenzitása közvetlenül hatással van a megjelenítendő képre illetve a modellben ábrázolt árnyékokra (2.16. ábra) [5][6][7].



2.16. ábra. Ford szivattyúlapát 3D modell CATIA v5 tervezőrendszer segítségével
(fények beállítása)

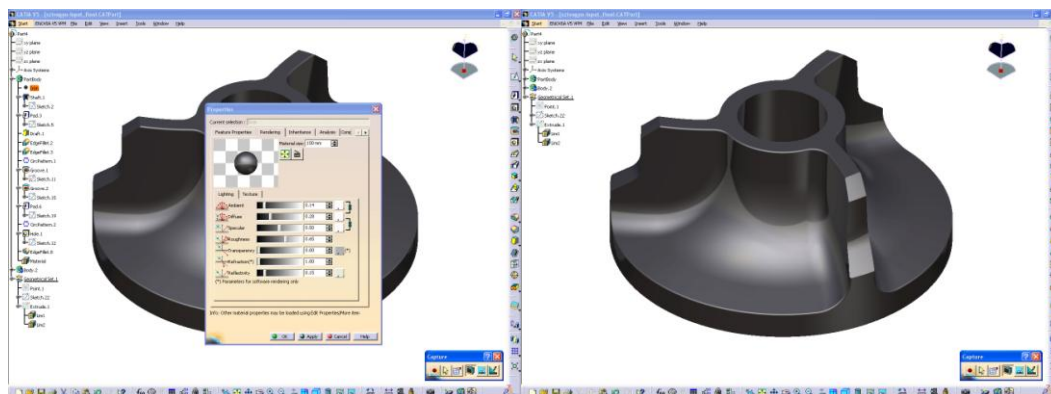
Színek

A színek megjelenítéséhez többféle színrendszer terjedt el. Alapvetően a színek 3 skalár mennyiséggel jellemezhetők. Az egyes képpontok színkódjának meghatározása egy bázis koordináta-rendszer meghatározása szükséges, amelynek megváltoztatásával a színek is más-más módon adhatók meg. Alapvetően három különböző színrendszer ismert a számítógépes grafika területén. Az RGB színrendszer használata során a vörös (Red), a zöld (Green) és a kék (Blue) színek mennyiségét határozzuk meg, ezzel definiálva a megjelenítendő színt. A CMY színrendszer a nyomtatáshoz kapcsolható, ebben az esetben a cián (Cyan), a magenta (Magenta) és a sárga (Yellow) színek mértékét kell meghatározni.

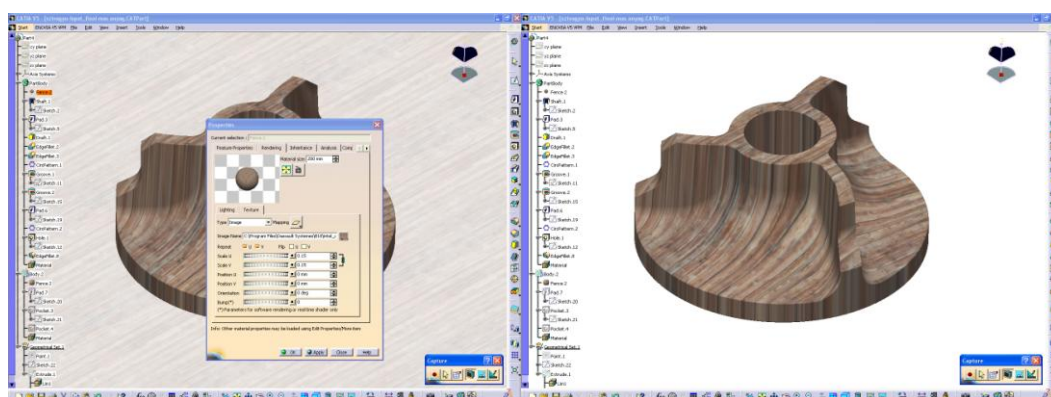
A HLS színrendszer használata során nem alapszínek mennyiségét, hanem természetesebb mennyiségeket használ. Megadható egy szín ebben a rendszerben a színárnyalat, fényesség és telítettség beállításával [7].

Anyagok, textúrák

Egy modell megjelenítése során fontos szempont az anyagának meghatározása. A felület az anyagválasztás alapján bizonyos tulajdonságokat vesznek fel, amelyek három különböző szinten jelennek meg. Figyelembe kell venni az anyag tükröződéssel kapcsolatos tulajdonságait, a textúrát, mintát valamint ügyelni kell az eltérő geometriák megjelenítésére. Alapvetően az anyagok definiálásának alapja leírható egy tükröződési függvény segítségével [5].



2.17. ábra. Ford szivattyúlapát 3D modell textúrájának (acél) beállítása CATIA v5 tervező rendszer segítségével



2.18. ábra. Ford szivattyúlapát 3D modell textúrájának (fa) beállítása CATIA v5 tervezőrendszer segítségével

A fenti ábrákon a Ford szivattyúlapát textúrájának beállítási lehetőségei és megjelenítése látható. A 2.17. ábra a termék acélból készült változatát jeleni meg, a 2.18. ábra pedig a fa anyagból modellezve.

Renderelés

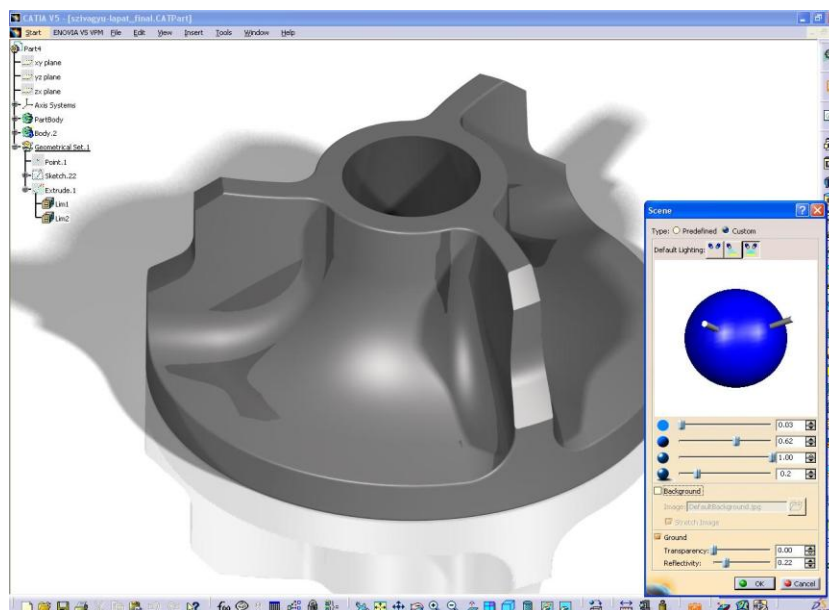
A számítógépes megjelenítés során több tevékenységet kell elvégeznünk, hasonlóan egy fénykép elkészítéséhez. Először is létre kell hozni a geometriai modellt. Ennek elkészítésekor figyelembe kell venni, hogy bizonyos kényszerektől mentesíteni kell a modellt, illetve az átmenetek megtervezésére különösen érdemes odafigyelni. A tervezéshez használt szoftverek szinte mindegyike manapság alkalmas általános fájlformátumok használatára, amelyek segítségével egyszerűvé válik a hordozhatóság (IGES, STL).

A második lépés az objektum felszínének kialakítása, színének, anyagának beállítása. A megjelenítés során az egyes anyagok esetén eltérő a fény visszaverődése. A legtöbb manapság használt szoftver rendelkezik előre definiált anyagokkal és szükség esetén bizonyos paraméterek megadásával lehetőség van további anyagtipusok megjelenítésére is.

A harmadik lépés a modell környezeti viszonyainak beállítása, amelynek során definiálhatóak a fényviszonyok, beállíthatóak az árnyékok valamint a környezet elemei, ahol a modellt meg kívánjuk jeleníteni. Ezzel a kép hangulata is jelentős mértékben befolyásolható.

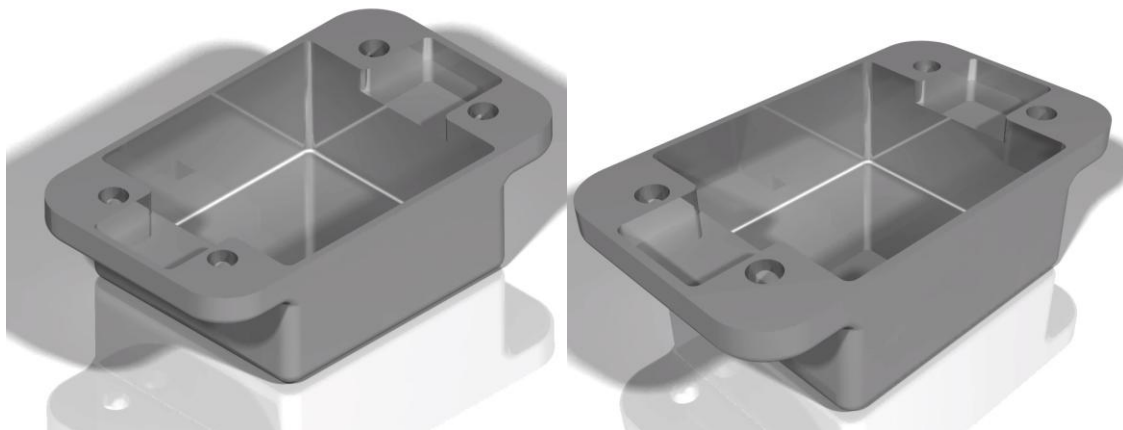
Az utolsó lépés a kép elkészítése (2.19. ábra), amelyhez egy virtuális kamerát hívunk segítségül. A kép elkészítésekor hasonló beállításokat lehet alkalmazni, mint egy fényképezőgép

használatakor. Bár a beállítások időigényesek lehetnek, azonban meghatározóak a modelltől készített kép minősége szempontjából [5].



2.19. ábra. Renderelt kép, beállítási lehetőségek a CATIA v5-ben

A korábban felsorolt lépések egymással összefüggésben vannak, az egyes lépések során történő módosítások meghatározhatják a további beállítási lehetőséget és a megjelenítendő kép minőségét egyaránt [5].



2.20. ábra. Renderelt kép párhuzamos és perspektivikus ábrázolása

További lehetőség van a renderelt kép más-más megjelenítési ábrázolására (2.20. ábra), amelynek segítségével ugyanaz a modell látható párhuzamos és perspektivikus nézetben.

2.5. Irodalom

- [1] Horváth Imre – Juhász Imre: Számítógéppel segített gépészeti tervezés 1.; Műszaki Könyvkiadó Budapest 1996.
- [2] Szirmay-Kalos László: Számítógépes grafika; ComputeBooks Budapest 2000.

- [3] Füzi János: Interaktív grafika; Computer Books Budapest 1997.
- [4] Bognár Géza, Kaczur Sándor: Térbeli gondolkodás segítése elektronikus eszközökkel; Informatika a felsőoktatásban 2008. Debrecen, 2008. augusztus 27-29. (www.agr.unideb.hu/if2008/kiadvany/papers/C42.pdf)
- [5] Dr. Váradi Károly: CAD Technológiák Magas szintű tervezés támogatás; BME Budapest, 2006.
- [6] Dr. Szirmay – Kalos László: Számítógépes grafika; ComputerBooks, Budapest, 2002.
- [7] Schwarcz Tibor: Bevezetés a számítógépi grafikába; (<http://mobidiak.inf.unideb.hu/>) mobiDIÁK könyvtár, 2005.

2.6. Ellenőrző kérdések

1. Ismertesse egy pont ábrázolásának módját!
2. Mi a különbség egy görbe explicit és implicit megadása között, írjon példát!
3. Ismertesse a Lagrange interpolációt!
4. Ismertesse a Coons-Hermite interpolációt!
5. Ismertesse a Bézier interpolációt!
6. Ismertesse görbék folytonosságának típusait!
7. Mutass be a B-szplájnt és változatait!
8. Hogyan ábrázolhatók felületek?
9. Sorolja fel és röviden ismertesse az egy ponton végrehajtható geometriai transzformációkat!
10. Mutassa be egy térbeli pont síkban ábrázolásának módszereit!

3. GEOMETRIAI MODELLEZÉS

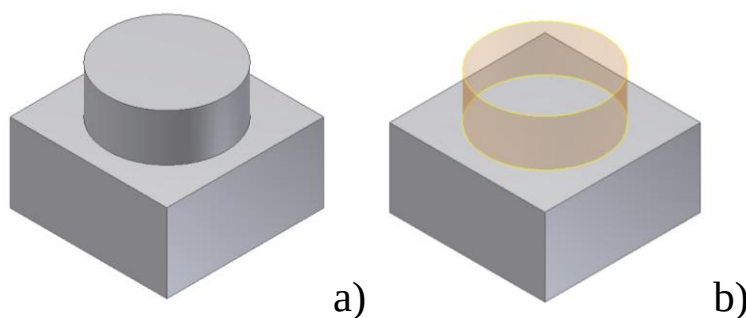
**Szerző:
Molnár László**

Általános értelemben a modell nem más, mint a valós vagy elképzelt objektum mása, annak szűkített információkkal való leképzése. A számítógépes geometriai modell az objektum alakját, méreteit képezi le. Kezdetben a számítógépes modellezés során többnyire megelégedtek az objektumok síkbeli, kétdimenziós (2D-s) vetületi ábrázolásával, de napjainkban a számítógépes geometriai modell alatt egyre inkább a háromdimenziós (3Ds) huzalváz-, felület- vagy testmodellt kell érteni.

Az ideális geometriai modellezőrendszer kidolgozására irányuló törekvések eredményeképpen ma már a módszerek széles választéka áll rendelkezésre. De mindennek ellenére sem sikerült olyan univerzális megoldást kifejleszteni, amelyik a termékek geometriai modelljével szemben támasztott minden igényt önmagában ki tudna elégíteni. Az ismert módszerek a mérettől, valamint a feladattól függően eltérő alkalmazási lehetőségeket kínálnak.

A tapasztalatok azt mutatják, hogy a geometriai modellezőrendszerek elvi alapjainak megfelelő mélységű megismerése egyrészt elősegíti a hatékony modellezési munkát, másrészt meggyorsítja a korábban nem használt CAD rendszerek elsajátítását. A geometriai modellezéshez kapcsolódó ismeretek segítik továbbá a felhasználói kézikönyvek, segédletek megértését, csökkentik a modellezés során elkövetett hibákat.

Topológiai szempontból közelítve a geometriai modellező rendszerek két alapvető csoportra bonthatók. Az egyik csoportba tartoznak azok a modellező rendszerek, amelyek olyan alakzatok modellezésére alkalmasak, amelyek kétdimenziós pontsokaságra leképezhetők. Ezek az ún. **manifold** modellező rendszerek. A **nemmanifold** topológiájú objektumok általában nem valószerűek, kétdimenziós pontsokaságra nem képezhetők le. Ez rendszerint abból adódik, hogy a modellben eltérő dimenziójú (1D, 2D vagy 3D) alapegységekből felépülő részek találhatók, vagy kapcsolódnak egymáshoz (3.1. ábra).



3.1. ábra. a) manifold modell (a hasáb is és a henger is test); b) nem manifold modell (a hasáb test, a henger felület).

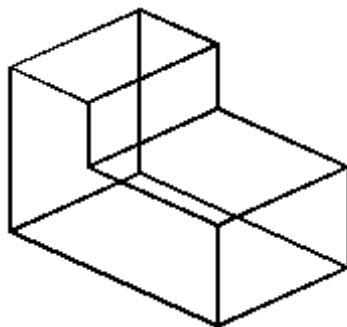
A **manifold** objektumokra alkalmazható modellező rendszereket az alakjellemző információk teljessége alapján további két csoportra lehet felosztani. A **nem teljes értékű modellező rendszerek** csoportjába tartozik a **huzalváz-** és a **felületmodellezés**, a **teljes értékű modellező rendszerek** csoportjába a **palástmodellezést** és a **testmodellezést** lehet besorolni.

3.1. Nem teljes értékű modellező rendszerek

Huzalváz-modellezés

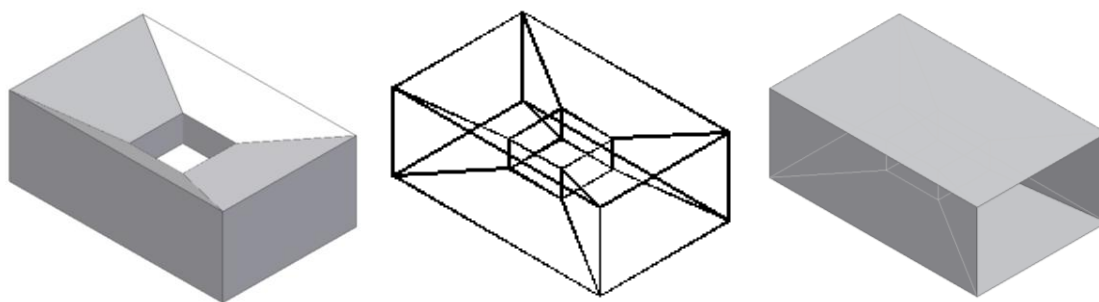
A huzalváz-modell a modellezett objektum felületeit határoló éleket jeleníti meg, a felületeket viszont nem. Ezeket az éleket egyenesek, ívek és görbék alkotják (3.2. ábra). A huzalváz-modellezést a felhasználó a gyakorlatban az objektum megfelelő geometriai pontjainak meg-

adásával, a pontokat összekötő görbék (egyenesek, körívek, kúpszelet görbék, stb.) jellemzőinek meghatározásával, és geometriai transzformációk alkalmazásával végzi.



3.2. ábra. Huzalváz-modell

A huzalváz-modellezés egyik alapvető fogyatékosága, hogy a megjelenített modell nem egyértelműen szemlélteti a modellezett objektumot. A 3.3. ábra mutat erre egy példát, amikor is a két bemutatott, más felépítésű objektumhoz ugyanaz a huzalváz tartozik.



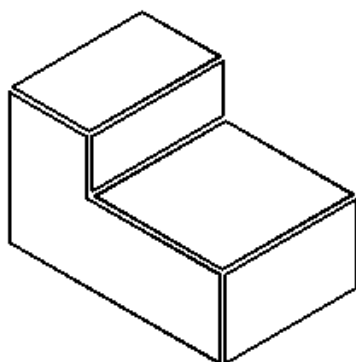
3.3. ábra. Huzalváz-modellek értelmezési bizonytalansága

Ennek a modellezési módnak további hátránya, hogy a megjelenített képen minden él látszik, láthatóságot nem lehet megjeleníteni. Térfogat és tömeg jellemzők nem határozhatók meg, ütközés vizsgálat nem végezhető, mechanikai, gyártástechnológiai számítások elvégzésére nem használható. A hosszadalmas és nehézkes adatmegadás miatt alaktervezésre, bonyolultabb formák megadására nem alkalmas. Jelentősége abban van, hogy a modellek szerkesztés közbeni állapotának megjelenítésére ma is ezt a módot használják. Gyakran a felület-, illetve a palástmodellezés alapjául szolgálhatnak.

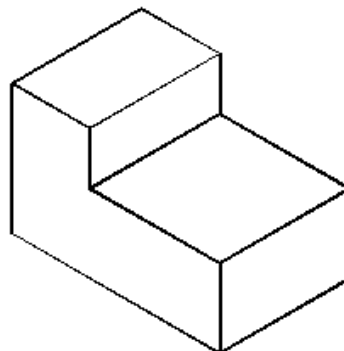
Felületmodellezés

A felületmodellezés véges, zárt, szabadformájú felületfoltok tervezésére irányul, amelyekből az objektum határoló felületeit a felületfoltok geometriai pozicionálásával és különböző folytonossági megszorítások előírásával hozzák létre. Ez a modellezési mód a topológiai információkat nem kezeli. A 3.4. ábrán bemutatott felület modellen a nem érintkező felületek azt hivatottak szemléltetni, hogy a felületek csak „látvány” szintjén összefüggőek.

A felület modell alkalmas bonyolultabb alakok, formák, megadására, takartvonalas megjelenítésre, vagy árnyékolt képek előállítására, de továbbra sem alkalmas térfogat vagy tömeg jellemzők számítására, ütközés vizsgálatra, és nem alkalmas mérnöki számításokhoz numerikus modell készítésére.



3.4. ábra. Felületmodell



3.5. ábra. Palástmodell

3.2. Teljes értékű modellező rendszerek

3.2.1. Palástmodellezés

A palástmodellezés az objektum véges, zárt burkát (a palástot) poliéderes közelítéssel vagy valószerű geometriával írja le. A palást-modellezés módszertanilag kihasználja azt az alapfeltevést, hogy minden fizikai objektumnak egyértelműen meghatározható határoló felülete van. Ez a határoló felület geometriai szempontból a palást, amely a felületfoltok folytonos záródó halmaza. Ez a modellezési mód a modellt az egyéb információk mellett topológiai szempontból is teljeskörűen jellemzi (3.5. ábra).

A palástmodellező módszer – angol nevén *Boundary-representation* (röviden *B-rep*) – ötvözi a huzalváz-modellezés együttes geometriai és topológiai struktúra kezelését a felületmodellezés felületfolt leírásával. Mivel minden valós fizikai objektum palástja zárt és folytonos, a palástmodellezés az objektum palástját végesnek, folytonosnak és zártnak tekinti, ahol is a palástot képező lapokat élek határolják, az éleket pedig a csomópontok határozzák meg.

A palástmodellező eljárás két alfaja terjedt el. Az egyik az ún. **poliéderes palástmodell**, amelyik a modellezett objektumot sík lapokkal írja le vagy közelíti. A görbült felületek leírására analitikus összefüggések is használhatók, de mivel ezek explicit formájúak lehetnek csak, alkalmazhatóságuk korlátozott. A **valósághű palástmodellezés** szabadformájú felületek használatát is megengedi, így az objektumot a számítógép számábrázolási pontosságának megfelelő pontossággal lehet leírni.

A palástmodell – a felület-modell felsorolt előnyei mellett – alkalmas térfogat és tömegszámításra, ütközés vizsgálatok elvégzésére, végelemek hálókészítésre, illetve gyártástechnológiai tervezések elvégzésére. Kifejezetten előnyösen használható a számjegyzéklésű megmunkálás (NC) programozásában, vagy a peremelemes szilárdsági vizsgálatok modell alkotásában.

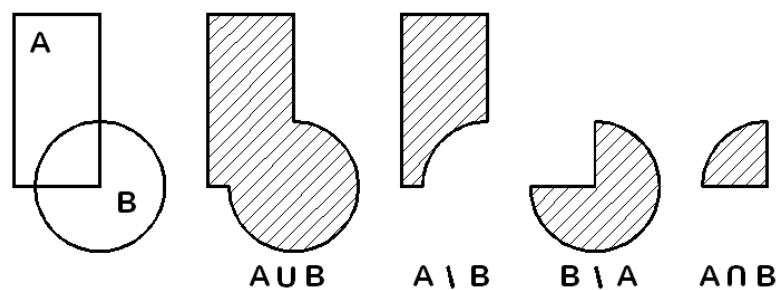
3.2.2. Testmodellezés

A test- vagy más néven térfogat-modellezés az objektumokat véges, zárt, reguláris pontthalmazként írja le. A testmodell teljes, jellemző és tömör leírása az objektumnak. Az adatszerkezetben a testet felépítő alapegységek és ezek kapcsolatainak leírása is megtalálható. A testmodellezés lényegesen egyszerűbb, mint akár a huzalváz, akár a felület, vagy akár a palástmodellezés.

A testmodellezéshez halmazalgebrai műveletek elvégzésére van szükség. A halmazalgebrai műveletek – vagy más néven kompozíciós műveletek – az alábbiak:

- ⊗ a **kompozíciós műveletek** általános jelölése;
- ∪ **UNION** vagy **összeadás**: két diszkrét test ponthalmazainak összekapcsolása;
- \ **DIFFERENCE** vagy **kivonás**: két diszkrét test ponthalmaz különbségének képzése;
- ∩ **SUBTRACT** vagy **közösrész képzés**: mindkét testben megtalálható pontok rész- $\oplus$ halmazát képezi;
- ⊕ **GLUE** vagy **összeragasztás**: ha két test felület vagy él mentén érintkezik, akkor a Boole-műveletek végrehajtása bizonytalan, ekkor az összeadás helyett az összeragasztást célszerű használni.

A 3.6. ábra grafikusán szemlélteti a testmodellezés kompozíciós műveleteit, amikor is az egyik ponthalmazt **A**-val, a másikat pedig **B**-vel jelöljük.



3.6. ábra. A kompozíciós műveletek grafikus értelmezése

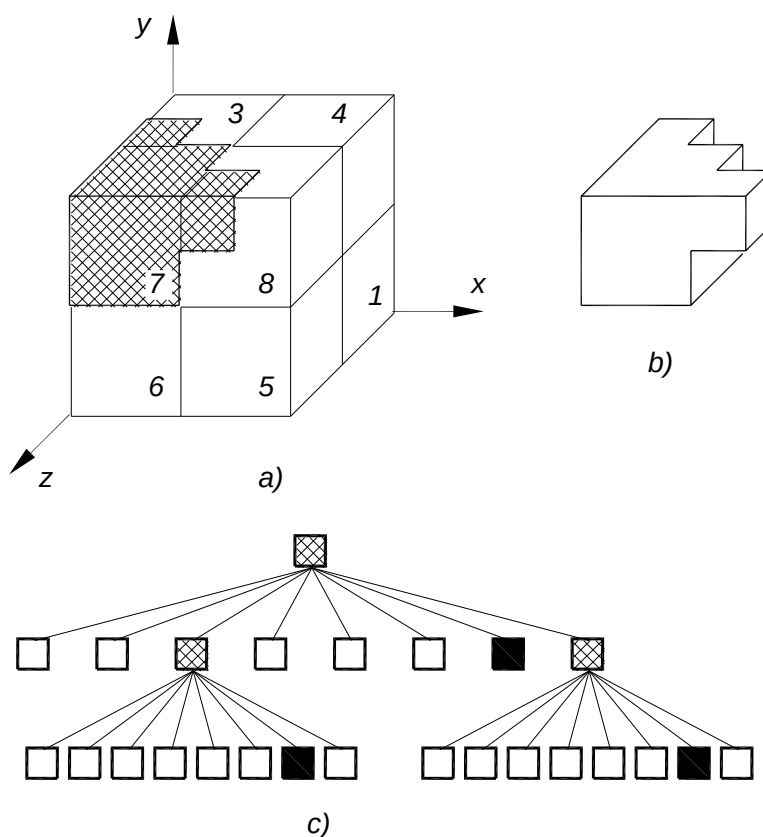
A testmodellezés feltevéseit az alábbiakban foglaljuk össze:

- ◆ az objektum merev test, vagyis konkrét és invariáns alakja van, amit nem befolyásol a térbeli hely vagy helyzet;
- ◆ az objektum az általa elfoglalt teret homogénen kitölti, vagyis a modell belseje a burkon keresztül mindig a modell komplementerével kapcsolódik;
- ◆ az objektum kiterjedése véges, vagyis a modell leképezhető a számítógépes megjelenítés érdekében;
- ◆ az objektum véges számú elemi test kompozíciójaként létrehozható, vagyis az objektum modelltje a számítógépben tárolható;
- ◆ az objektum a merevtest-szerű mozgások szempontjából zárt halmazként modellezhető.

Napjainkra a testorientált modellezőrendszerek sokféle változata alakult ki, amelyeket a modell volumetrikus megalkotása alapján **térfogat-lebontási**, illetve **térfogat-feltöltési** csoportokba sorolhatjuk. A térfogat-lebontásos modellezés két alkalmazott eljárása a **hasáblebontó modellezés** és a **félteres modellezés**. A térfogat feltöltéses modellezés területéről ugyancsak két eljárást ismertetünk az **elemi sejtekkel való modellezést** és az **elemi testekkel való modellezést**.

3.2.2.1. Testmodellezés – Hasáblebontó módszer

A hasáblebontáson alapuló modellezés a véges tértartományt nyolc részre bontja (nyolcadolást hajt végre), majd egyenként megvizsgálja, hogy egy-egy tértartomány teljesen, vagy részlegesen feltöltött-e, vagy üres. Azokat a résztartományokat, amelyek teljesen feltöltöttek, vagy egyáltalán nem feltöltöttek, a további vizsgálatokból ki lehet zárni. A részben feltöltött tartományok újabb lebontása eredményeképpen kapott nyolcadok képezik a hierarchikus fa harmadik szintjét, ahol is a korábban leírt eljárást meg kell ismételni. Az eljárás lényegét a 3.7. ábra szemlélteti.



3.7. ábra. Hasáblebontó modellezés

Ez az ún. hierarchikus dekompozíciót alkalmazó módszer merőleges sík felületekkel határolt objektumok esetén pontos, ferde és görbült felületek esetén csak közelítő leírásra alkalmas. A közelítés pontosságát a lebontás mélységével lehet befolyásolni.

Az eljárás előnye, hogy rendkívül egyszerűen algoritmizálható, és alkalmazása nem igényel speciális felhasználói ismereteket.

3.2.2.2. Testmodellezés – Félter módszer

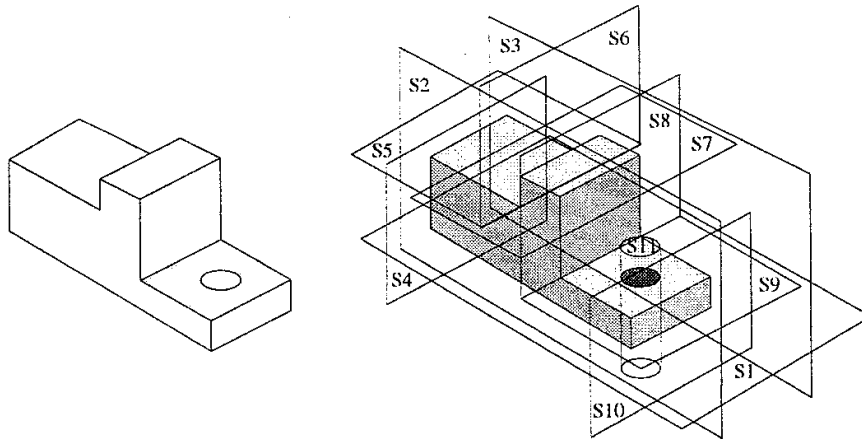
A lebontásos félteres modellezés jellegzetessége, hogy az objektum által elfoglalt térfogat behatárolását végtelen kiterjedésű felületekkel hajtja végre, amelyek a teret két végtelen kiterjedésű tartományra bontják. A végtelen kiterjedésű felületeket a modellezendő objektum felületeire fektetjük, és a felület egyik oldalán lévő félteret üresnek, a másikat anyaggal feltöltöttnek tételezzük fel. A félter definíciója:

$$H = \{P : P \in E^3 \text{ és } f(P) < 0\}, \quad (3.1)$$

ahol P az E^3 egy pontja, $f(P)$ pedig a felület egyenlete. A modellezett S test térfogatát a H_i félterek közös része (metszete) adja:

$$S = \cap \left(\sum_{i=1}^n H_i \right). \quad (3.2)$$

Egy téglatest például 6 féltér metszeteként írható le. A 3.8. ábra a féltéres modellezésre mutat egy példát.



3.8. ábra. Féltér-lebontó modellezés

A teret elválasztó felület nem csak sík, hanem tetszőleges felület lehet. A nem sík felület alkalmazására egy példa a 3.8. ábrán látható, ahol az S11 jelű felület például egy henger, amivel a furat hozható létre. Néhány példa az implicit alakban megfogalmazott felületegyenletekre:

Síkfelület:	$\{(x, y, z): z = 0\};$	
Hengerfelület:	$\{(x, y, z): x^2 + y^2 = R^2\};$	
Kúpfelület:	$\{(x, y, z): x^2 + y^2 = [(R/H)z]^2\};$	
Gömbfelület:	$\{(x, y, z): x^2 + y^2 + z^2 = R^2\};$	
Tórusz:	$\{(x, y, z): x^2 + y^2 + z^2 - R_2^2 - R_1^2 = 4R_2^2(R_1^2 - z^2)\};$	(3.3)

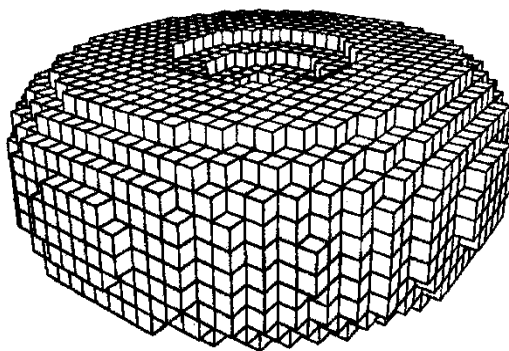
A féltéres modellezés hátránya, hogy a felhasználónak jól kell ismernie a modellezéshez kapcsolódó törvényeket, mert egyébként könnyen nem zárt objektum jöhet létre. Az eljárás alkalmazása összetett objektumok esetében körülményes, nehéz modellezni a belső üreggel, vagy egymást metsző furatokkal rendelkező testet. A módszer tipikus alkalmazási terület a technológiai tervezés, mert kellemsen használható az NC forgácsolási műveletek megmunkálási felületeinek leírására.

3.2.2.3. Testmodellezés – Elemi sejtekkel való modellezés

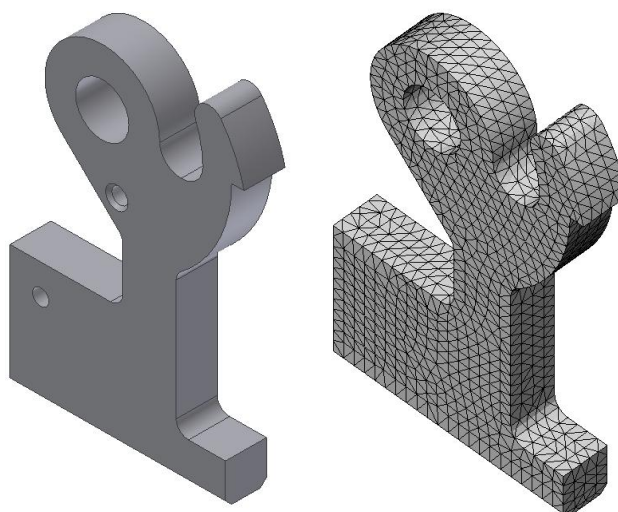
Az elemi sejtekkel való modellezés esetén az alkatrészek a méretüknél több nagyságrenddel kisebb, ún. **izomorf cellákból** épülnek fel (3.9. ábra). Lényegét tekintve ez egy követő modellező módszer, mert a sejtekkel való feltöltés feltételezi a geometriai alak előzetes létezését, bár elvileg új geometriai alak létrehozására is alkalmas. Az új geometria létrehozása azonban rendkívül aprólékos és időigényes munkát követel.

Az elemi sejtek alakja, mérete egy modellen belül is változhat, de az egyszerűbb adattárolási séma kialakítása érdekében a modellezést általában morfológiailag homogén sejtekkel végzik. Az eljárás lényegéből következik, hogy a nagyszámú sejt adatainak feldolgozása nagy tárolókapacitást és számítási teljesítményt igényel.

Az elemi sejtekkel való modellezés a numerikus eljárások (végelem, peremelem módszer) modellezési eszköze. A 3.10. ábra példaképpen egy alkatrész 3D-s geometriai modelljét, és a kis tetraéder elemekből felépült végeselemes modelljét mutatja.



3.9. ábra. Elemi sejtekkel való modellezés



3.10. ábra. Egy alkatrész 3D-s geometriai és végeselemes modellje

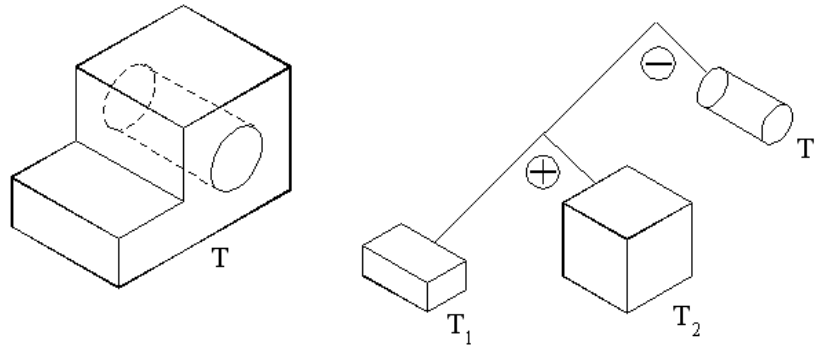
3.2.2.4. Testmodellezés – Elemi testekkel való modellezés

Az elemi geometriai testekkel való modellezés esetén az alkatrészek a méretük nagyságrendjébe eső, meghatározott geometriájú, ún. testprimitívekből épülnek fel a kompozíciós műveletek felhasználásával. Az elemi testeket összeépítő modellezési eljárás angol elnevezése **Constructive Solid Geometry**, vagy röviden **CSG** modellezés. Valamennyi volumetrikus modellezési eljárás közül az elemi testekkel való modellezés a legelterjedtebb. A köznapiban a **testmodellezés** kifejezést erre a modellezési formára szokták használni.

A **testmodell** teljes, jellemző és tömör leírása az objektumnak, és lehetővé teszi az integrált és automatizált tervezést.

A testmodellezés eszközkészletének két alapvető csoportját a **T_i elemi geometriai testek** és a **$\otimes$ kompozíciós műveletek** jelentik ($\otimes$ jellel összefoglalóan a kompozíciós (halmaz) műveleteket jelöljük).

A 3.11. ábra egy egyszerű példát mutat az elemi testekkel való modellezésre, ahol T_1 , T_2 és T_3 a testprimitívek, T pedig az összetett test. Az ábra szerinti T összetett test a T_1 és T_2 primitívek megfelelő pozicionálás utáni összeadásával, és a T_3 primitív ugyancsak megfelelő pozicionálás utáni kivonásával jön létre. Megjegyezzük, hogy a T_1 és T_2 primitívek esetében az összeadás ($\cup$) helyett az összeragasztás ($\oplus$) kompozíciós művelet is használható.



3.11. ábra. Elemi testekkel való modellezés

3.3. A testmodellezés halmazelméleti megközelítése

A volumetrikus modellezés az objektum alakját az elemi geometriai testek által elfoglalt **tértartományok kompozíciójával** hozza létre. Legyen

$$T_1, T_2, T_3 \dots T_i \dots T_n \quad (3.4)$$

az E^3 térben véges kiterjedésű, zárt és reguláris elemi testek ponthalmaza. A T jelű összetett test az elemi testek kompozíciójaként származtatható:

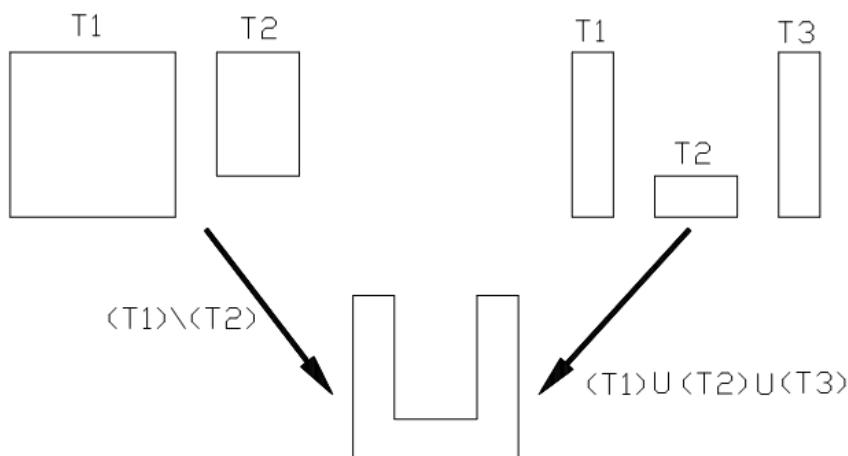
$$T = \otimes(T_i), \quad \text{ahol} \quad 1 \leq i \leq n, \quad (3.5)$$

ahol $\otimes$ a lehetséges kompozíciós műveleteket jelöli (ezek, mint már írtuk, $\cup$ az egyesítés, $\setminus$ a kivonás, $\cap$ a közös rész képzés és $\oplus$ az összeragasztás).

A (3.5) egyenletet kifejtve:

$$T = (((((T_1) \otimes T_2) \otimes T_3) \dots \otimes T_i) \dots \otimes T_n). \quad (3.6)$$

A fenti egyenlet – ha a T_i tartományok regulárisak – matematikailag teljes és egyedi eredményobjektumot hoz létre, de a kompozíció (a létrehozás módja) nem egyértelmű. Ez azt jelenti, hogy ugyanaz az eredményobjektum más T_i testprimitívekből és más kompozíciós műveletekkel is létre-hozható. Erre mutat példát a 3.12. ábra.



3.12. ábra. Ha a T_i tartományok **regulárisak**, az eredmény-objektum **teljes és egyedi**

Geometriai szempontból a T_i elemi geometriai testek mérete a T modellhez hasonló nagyságrendű és számosságuk véges.

A reguláris tartomány magyarázatához vezessünk be néhány fogalmat. A T testmodellt pontthalmazként definiálva, az objektum határa a modellteret külső és belső pontthalmazra bontja. Jelölje

- bT a modell belsejét;
- hT a modell határát vagy palástfelületét;
- kT a modell komplementer pontthalmazát (azaz a külső pontokat).

Ezzel a teljes modellter a három pontthalmaz összegeként írható le, azaz

$$M = bT \cup kT \cup hT. \quad (3.7)$$

Maga a modell, ami a modell belsejét és a modell határfelületét jelenti:

$$T = bT \cup hT = bhT, \quad (3.8)$$

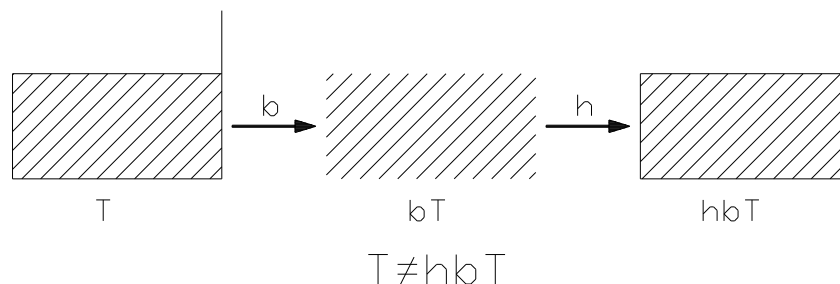
a modell határfelülete, ami lényegében megfelel a palástmodellnek:

$$hT, \quad (3.9)$$

Reguláris egy T tartomány akkor, ha teljesül a következő feltétel:

$$T = hbT, \quad (3.10)$$

vagyis, ha a T tartomány belsejének burkolóját képezve az megegyezik az eredeti T tartománnyal. A 3.13. ábra egy nem reguláris tartományra mutat példát. A T pontthalmazon egy ún. lengő él található, ami a hbT tartományon már nincs rajta, így a (3.10) egyenlőség nem teljesül. Nem reguláris tartományok leggyakrabban különböző dimenzió számú geometriai építőelemek kapcsolódásakor fordulnak elő, amikor 2D-s elemekhez élek, vagy 3D-s elemekhez lapok kapcsolódnak.

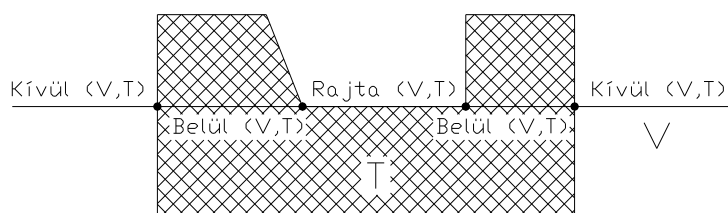


3.13. ábra. Példa a nem reguláris tartományra

A testmodellezés sajátos és nem minden problémától mentes területe annak vizsgálata, hogy bizonyos pontok bent foglaltatnak-e egy adott tartományban. A bentfoglaltsági információk fontosak

- a felületszerű megjelenítés;
- a mérnöki mennyiségek számítása;
- az ütközés-vizsgálat szempontjából.

A 3.14. ábra szerinti példa egy T reguláris halmazt metsző V halmaz pontjainak háromféle viszonyát mutatja be.



3.14. ábra. Bentfoglaltsági vizsgálat a T és a V pontthalmaz esetén

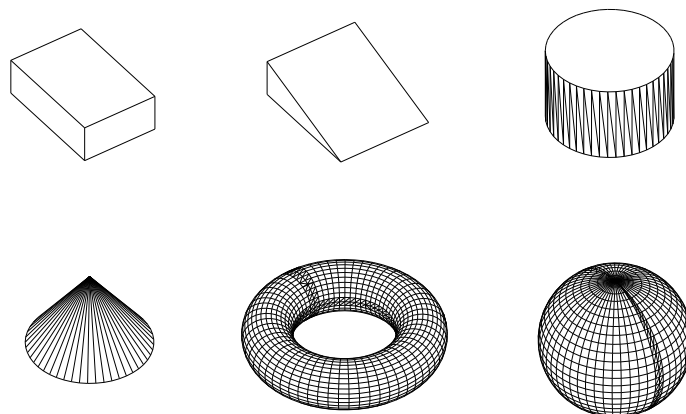
- a P pont a T halmaz belsejében van, ha $P \in bT$;
- a P pont a T halmaz határán van, ha $P \in hT$;
- a P pont a T halmazon kívül van, ha $P \in kT$.

3.4. A testmodellezés eszközei

Ebben a fejezetben az alaksajátosságokra alapozott programok használata előtti időszak testmodellező programjainak felépítését, eszköztárát mutatjuk be (pl. az AutoCAD), mert a ma használatos programokat ezeken az alapokon fejlesztették ki.

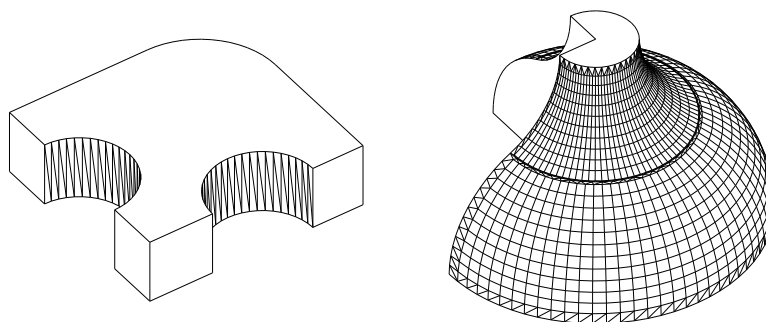
A testmodellezés eszközkészletének két alapvető csoportját a T_i elemi geometriai testek és a $\otimes$ **kompozíciós műveletek** jelentik ($\otimes$ jellel összefoglalóan a kompozíciós (halmaz) műveleteket jelöljük).

Az **elemi testek** vagy más néven **testprimitívek** lehetnek előredefiniáltak vagy a felhasználó által létrehozottak. Az **előredefiniált testprimitívek** a 3.15. ábrán, a **felhasználó által létrehozhatók** pedig a 3.16. ábrán láthatók.



3.15. ábra. Előredefiniált testprimitívek (hasáb, ék, henger, kúp, tórusz és gömb).

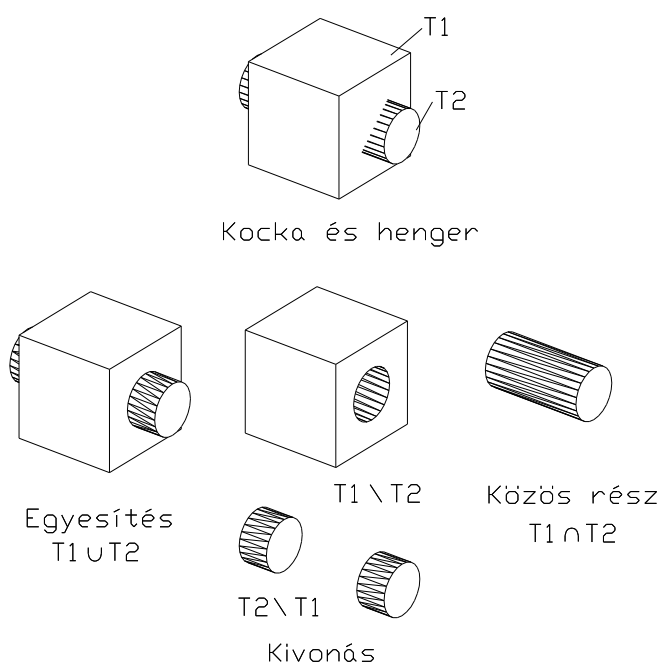
A négy leggyakrabban használt elemi test a téglatest, a körhenger, a kúp és a gömb. A testmodellezés keretében elvégzett vizsgálatok azt mutatták, hogy a gyakorlatban előforduló alkatrészek 80 – 85 %-a négy leggyakrabban használt testprimitívből felépíthető. Egyes programok a 3.15. ábrán bemutatottakon túl is tartalmazhatnak testprimitíveket, mint például: gúla, domború ív, homorú ív stb.



3.16. ábra. Felhasználó által létrehozható testprimitívek (kihúzás és megforgatás)

A felhasználó által létrehozott testprimitívek klasszikus példája a kihúzás és a megforgatás. Az újabb programokban megtalálható már a söprés és a pásztázás is. A felhasználó által létrehozott testprimitívek közös jellemzője, hogy felületek mozgásával hozhatók létre.

A rendszerint két operandusú **kompozíciós műveletek** közé tartozik – mint azt már korábban írtuk – az **egyesítés (union)** ($\cup$), amelyik két diszkrét test ponthalmazait kapcsolja össze; a **kivonás (difference)** ($\setminus$), amelyik két ponthalmaz különbségét képezi; és a **közösrészképzés (intersection)** ($\cap$), amelyik mindkét testben megtalálható közös ponthalmazt határozza meg. A testmodellezés halmazműveleteit a 3.17. ábra szemlélteti, ahol egy T_1 és T_2 testprimitíven végrehajtott kompozíciós műveleteket mutatjuk be.



3.17. ábra. A testmodellezés halmazműveletei

Ugyancsak szó volt már róla, hogy ha a testek felületekkel vagy élükkel érintkeznek egymással az egyes operátorok numerikus megbízhatósága kérdéses lehet, ezért egyes programok az **összeragasztás (glue)** ($\oplus$) paranccsal is rendelkeznek.

A testmodellezés eszközkészletéhez tartozik továbbá a **testek, testprimitívek manipulálása**. A manipulálási parancsok rendszerint egy operanduszúak. A manipulálási parancsok egyik csoportja a testprimitívek pozicionálását szolgálja:

- **eltolás**: az elemi testet a felhívási pozíciójából a modelltér adott pontjába mozgatja;
- **elforgatás**: az elemi testet a modelltér derékszögű koordináta rendszerében elforgatja az x , y és z tengelye körül a referencia ponthoz viszonyítva;
- **tükrözés**: tükrözi az elemi testet a modelltér kijelölt síkjára;
- **léptékezés**: a modellépítéshez szükséges méretű elemi testet állít elő;
- **torzítás**: az elemi test topológiai struktúráját nem érintő méret módosításokat hajt végre.

A manipulálási parancsok másik csoportja a testprimitívek többszörözését szolgálja:

- **másolás**: az adott méretű elemi test további példányát, vagy példányait hozza létre;
- **kiosztás**: az adott méretű elemi test további nagyszámú példányát hozza létre sakktábla vagy poláris elrendezésben.

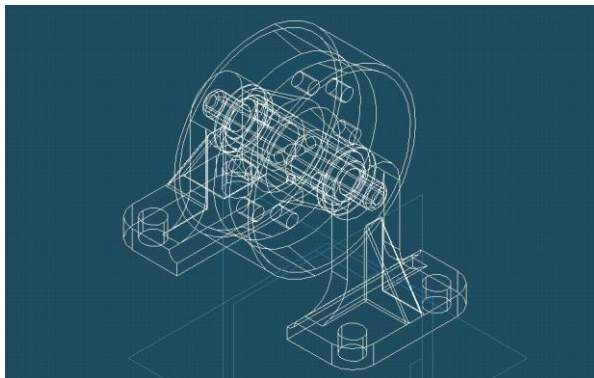
A törlés parancs:

- **törlés**: valamely korábban definiált, létező, a modellbe kompozíciós művelettel még be nem épített testprimitívek megszüntetését végzi.

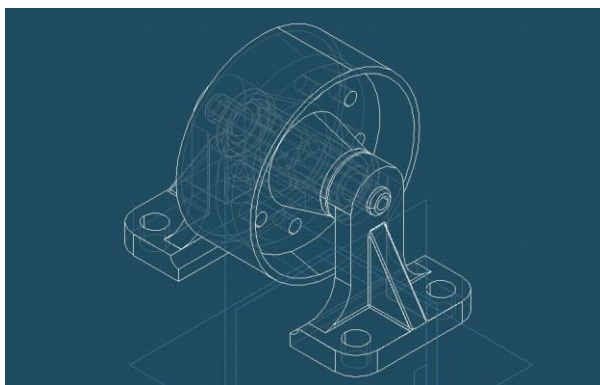
A testmodellezés eszközei közé tartoznak még a **szemléltető eljárások**. A kereskedelmi testmodellező rendszerek többsége a modellezett objektumot a **wireframe** paranccsal huzal-

váz modellként, a **hidden** paranccsal takartvonalas palástmodellként, és a **shade** paranccsal pedig felületárnyalt testmodellként jeleníti meg.

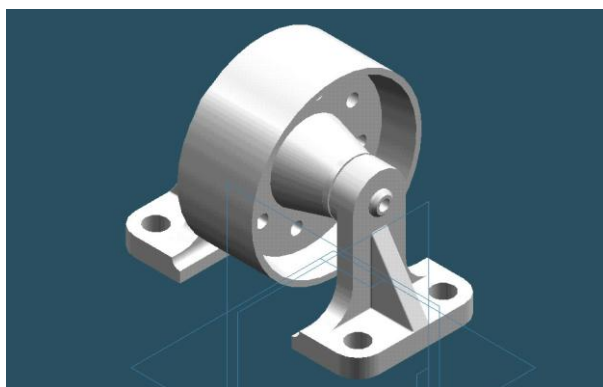
A huzalváz-megjelenítésre a 3.18. ábra mutat példát. A 3.19. ábra a takartvonalas ábrázolást, a 3.20 ábra pedig a felületárnyalt megjelenítést szemlélteti.



3.18. ábra. Példa a huzalváz megjelenítésre

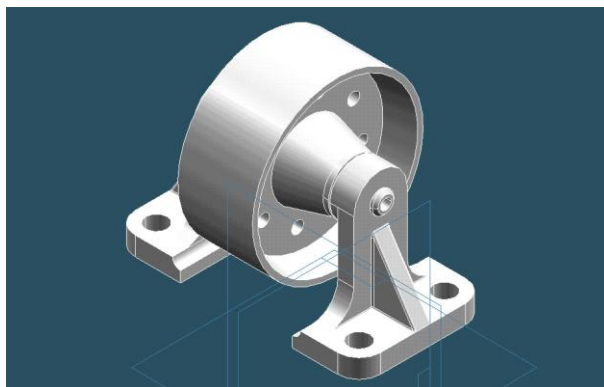


3.19. ábra. Példa a takartvonalas megjelenítésre.

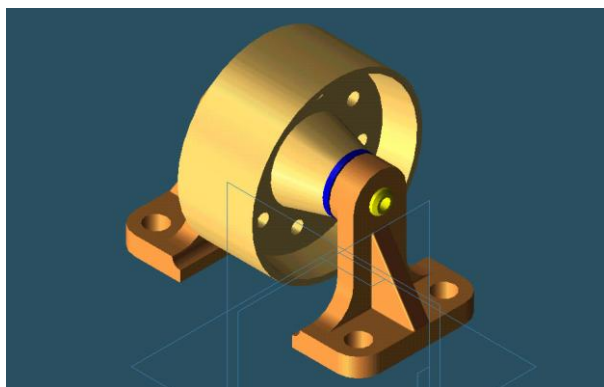


3.20. ábra. Példa a felületárnyalt megjelenítésre

Egyértelműbbé tehető a megjelenítés a felületárnyalt és a takartvonalas opció együttes alkalmazásával (3.21. ábra). A ma használatos legtöbb program rendelkezik azzal a lehetőséggel, hogy az egyes alkatrészeket más-más színnel jelenítse meg (3.22. ábra).



3.21. ábra. Példa a felületárnyalt és a takartvonalas megjelenítés együttes alkalmazására



3.22. ábra. Példa a felületárnyalt megjelenítésre, amikor az egyes alkatrészek más-más színűek

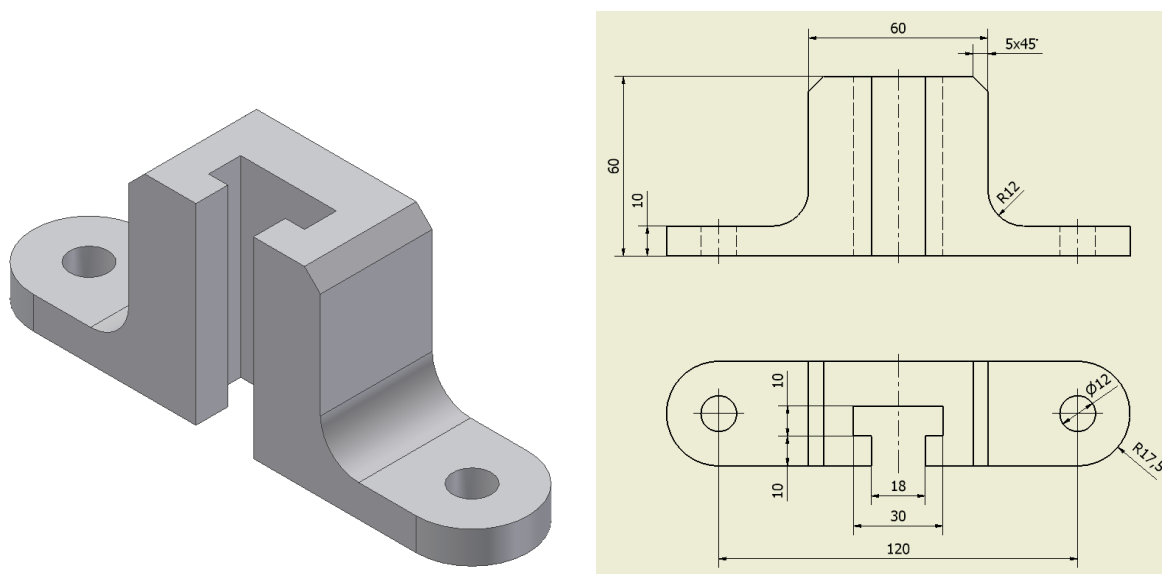
Összefoglalva: A testmodellezési folyamat a gyakorlatban a testprimitívek definiálásából, a méretek beállításából, a megfelelő helyzetbe való transzformálásból, majd az általánosított halmazműveletek alkalmazásából áll. Az elemi testek kombinálásának az előnye, hogy eredendően biztosítja az elkészített modell valószerűségét.

3.5. Modell-történet

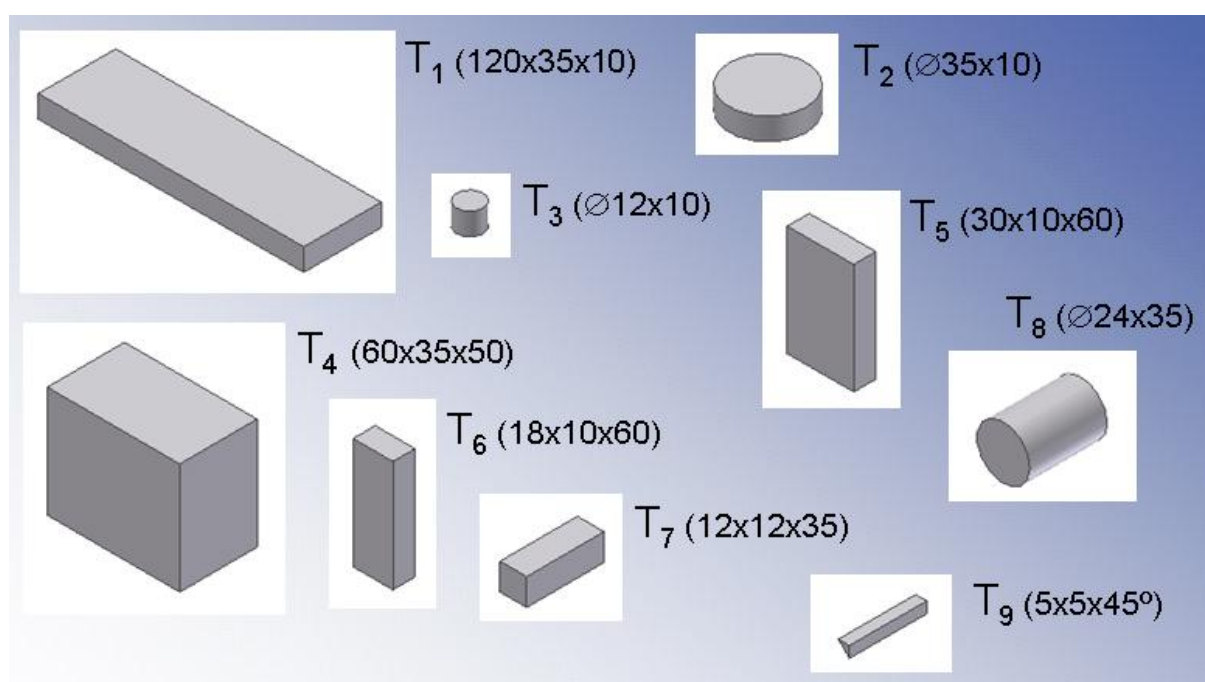
A testprimitívekből a kompozíciós műveletekkel létrehozott eredmény-objektum – mint azt a 3.3. fejezetben már bemutattuk – teljes és egyedi. A létrehozás módja viszont nem egyértelmű, a létrehozás módja az eredményobjektumból nem fejthető vissza.

A szerkesztési folyamat lépéseinek megőrzésére, ábrázolására legismertebb módszer a CSG fa alkalmazása. E mellett bemutatunk egy másik ábrázolási módot is, amikor is formális halmazműveletekkel írjuk le az összetett modell létrejöttét.

Az összetett test szerkesztési folyamatának leírást egy konkrét példán keresztül szemléltetjük, és a példa-alkatrészt a 3.23. ábra szemlélteti. A 3.24. ábrán a példa-alkatrészt felépítő testprimitíveket mutatjuk be.



3.23. ábra. Példa-alkatrész a szerkesztési folyamat bemutatására

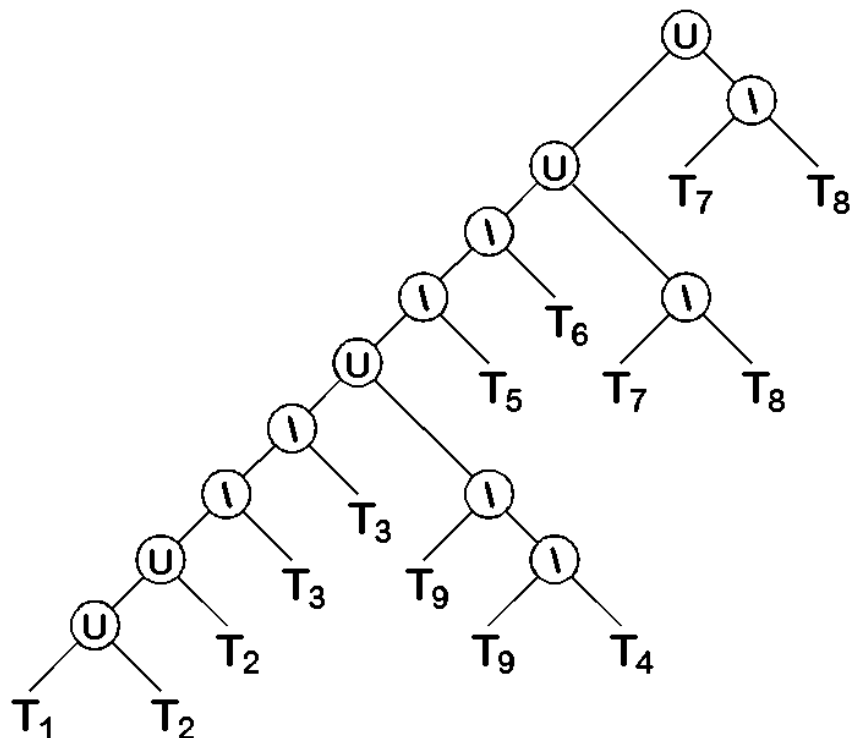


3.24. ábra. A példa-alkatrészt felépítő testprimitívek

3.5.1. CSG fa

A CSG fa matematikai értelemben egy aciklikus, bináris irányított gráf. Bináris jellegét az adja, hogy minden csomópontba egy gráfél fut be, és minden csomópontból két gráfél indul ki. Az ágcsoomópontokban a kompozíciós operátorok találhatók. A fa gyökere az a csomópont, amelyikbe nem fut be gráfél. A csomópont alatti két gráfél vagy részfa, vagy elemi testprimitívra mutat. A CSG fa legalsó szintjén mindig elemi test található.

A 3.23. ábra szerinti alkatrész CSG fáját a 3.25. ábrán mutatjuk be. A fában a testprimitíveket a 3.24. ábra szerinti azonosítókkal jelöltük. Külön magyarázatra szorul az $R12$ -es lekerekítés elkészítése. A testprimitívek alapértelmezett készletében a lekerekítés ugyanis nem szerepel. A lekerekítés a T_7 jelű hasáb és a T_8 jelű henger különbségeként állítható elő.

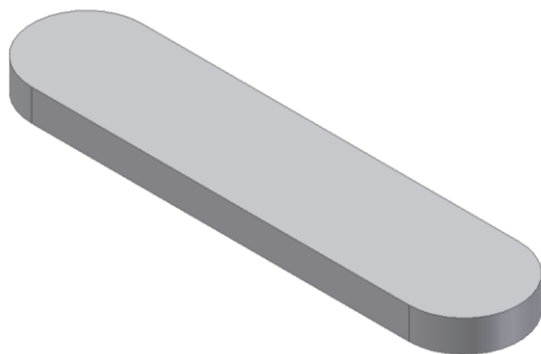


3.25. ábra. A példa-alkatrészt CSG fája

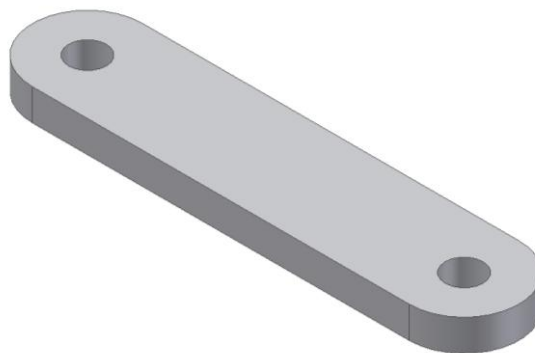
3.5.2. Modelltörténet halmazelméleti megközelítéssel

A 3.23. ábra szerinti alkatrész modelltörténete a 3.3. fejezetben bemutatott kompozíciós műveleti jelekkel is leírható. Az alkatrész felépítési folyamatát a 3.26. ábrán mutatjuk be. A halmazműveletekben a testprimitíveket a 3.24. ábra szerint alsó indexszel (T_i), az összetett objektumokat pedig felső indexszel (T^i) jelöltük.

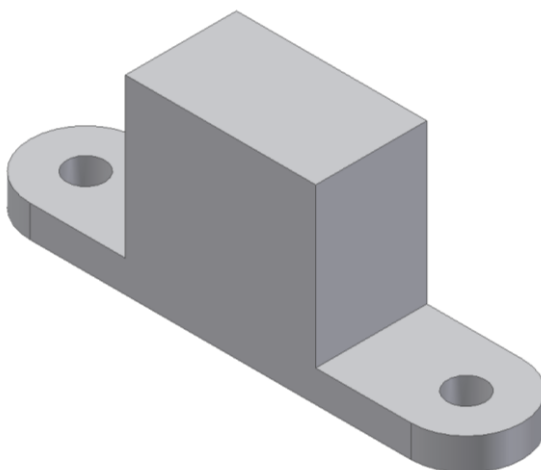
$$T^1 = (((T_1) \cup T_2) \cup T_2)$$



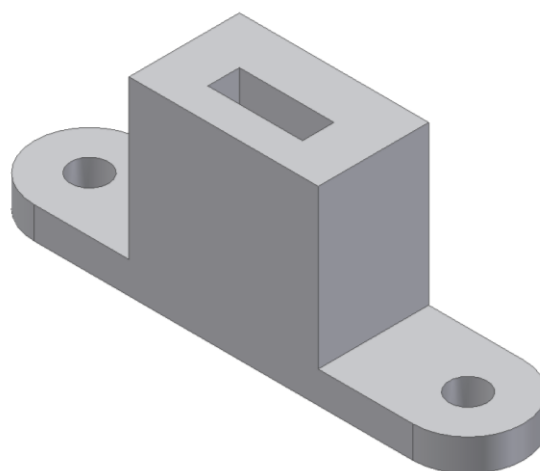
$$T^2 = (((T^1) \setminus T_3) \setminus T_3)$$



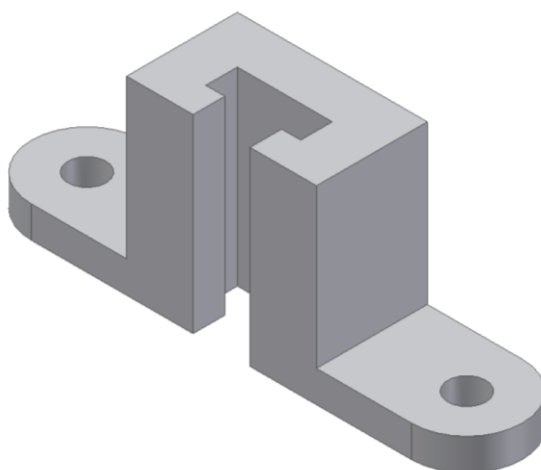
$$T^3 = ((T^2) \cup T_4)$$



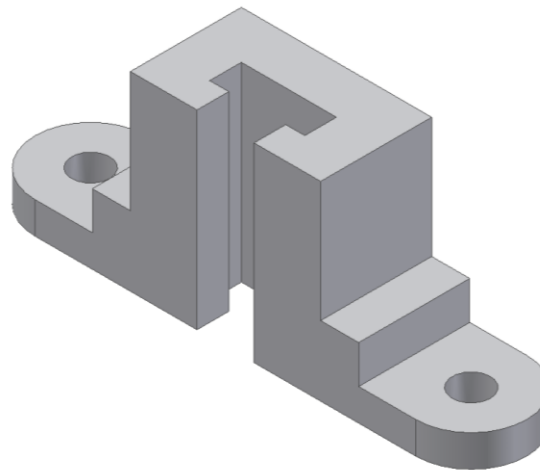
$$T^4 = ((T^3) \setminus T_5)$$



$$T^5 = ((T^4) \setminus T_6)$$

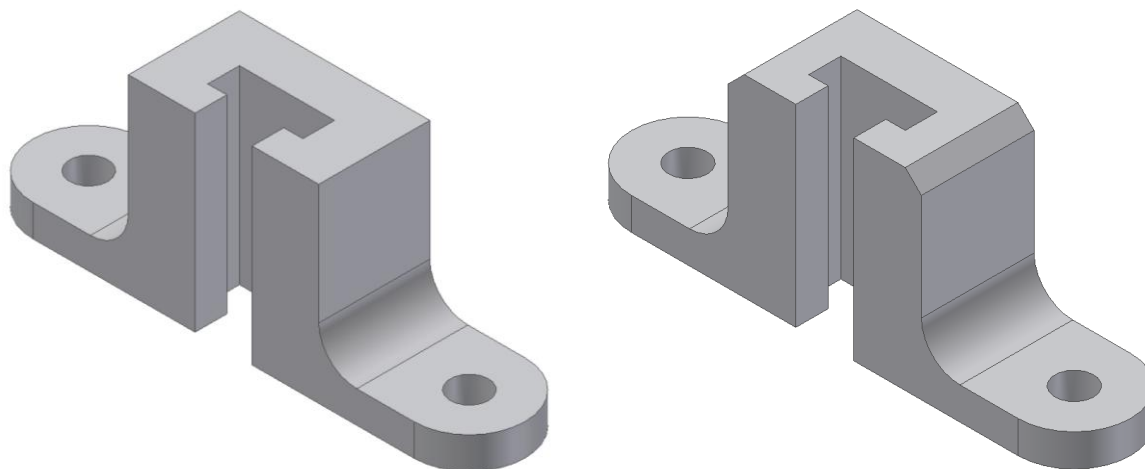


$$T^6 = (((T^5) \cup T_7) \cup T_7)$$



$$T^7 = (((T^6) \setminus T_8) \setminus T_8)$$

$$T = T^8 = (((T^7) \setminus T_9) \setminus T_9)$$



3.26. ábra. A modellalkotás folyamata halmazműveleti leírással

3.6. Parametrikus modellezés

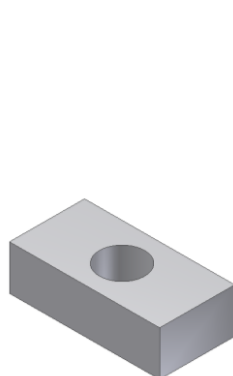
A tervezés során, hogy funkcionális, minőségi, gyárthatósági vagy szerelhetőségi szempontból a leginkább megfelelő alakot megkapjuk, a kiinduló geometriát többször módosítani kell. Elvárás a korszerű geometriai rendszerekkel szemben, hogy támogassák a konstrukcióvariánsok előállítását. Ez a statikus szemléletű modellezéssel szemben **dinamikus geometriai modellezést** igényel. A dinamikus modellezés egyik alapvető formája a geometriai struktúrák és méretek módosíthatóságának lehetővé tétele, amit **parametrikus modellezésnek** nevezünk.

A parametrikus geometria modellezés az eddig bemutatott modellező rendszerektől annyiban különbözik, hogy a geometriai méreteket nemcsak adatokkal, hanem **paraméterekkel, változókkal** is jellemzik. Ez lehetővé teszi, hogy a paraméterek egymásból kiszámíthatók legyenek, a paraméterek közötti kapcsolatokat matematikai összefüggések írják le. A paraméterek között nemcsak matematikai, de logikai kapcsolatrendszer is felírható. Annak érdekében, hogy a méretek megváltozása esetén az alakzat jellege ne módosuljon, geometriai megszorításokat is kell/lehet alkalmazni, de ez már átvezet az **alaksajátosságokra alapozott geometriai modellezés** területére.

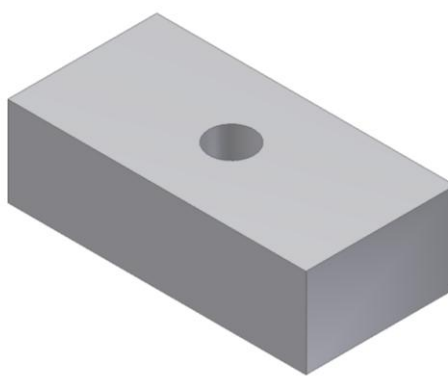
A parametrikus modellezésre mutat egy egyszerű példát a 3.27. ábra. A téglatest alaplmerete a hossza. Függő méretként van beállítva a téglatest szélessége és magassága. A szélesség a hossz 0,5-szöröse, a magasság pedig a hossz 0,3-szorosa. A furat átmérő nem függő méret, abszolút értéként van megadva. A 3.27a ábra a paraméter táblázatot mutatja.

Parameters							
Parameter Name	Unit	Equation	Nominal Value	Tol.	Model Value		Comment
Model Parameters							
Hossz	mm	10,000 mm	10,000000	●	10,000000	☐	
Szélesség	mm	0,5 ul * Hossz	5,000000	●	5,000000	☐	
Magasság	mm	0,3 ul * Hossz	3,000000	●	3,000000	☐	
Dőlésszög	deg	0 deg	0,000000	●	0,000000	☐	
Furat_átmérő	mm	3 mm	3,000000	●	3,000000	☐	
User Parameters							

a)



b)



c)

3.27. ábra. Példa a parametrikus modellezésre. a) paraméter tábla;
b) a téglatest hossza 10 mm; c) a téglatest hossza módosítva 20 mm-re.

A 3.27b ábra a paraméter táblázat szerinti méretekkel mutatja a téglatestet. A téglatest hossz méretét (de csak a hossz méretét) módosítva 20 mm-re, eredményül a 3.27c ábra szerinti objektum adódik eredményül.

3.7. A hagyományos geometriai modellezés értékelése

A múlt század végén testmodellezés alkalmazásával komoly eredményeket értek el a 3D-s geometriai modellezés területén, de már a 80-as évek végén láthatóvá váltak azok a korlátok, amelyeket a mai napig nem sikerült áttörni. Ezek közül néhány:

- A kereskedelmi forgalmazású modellezőrendszerek csak alacsonyabb szintű modellezési alapegységeket biztosítanak, mint amire a mérnöki gyakorlatnak szüksége van;
- A geometriai modellezőrendszerek nem támogatják a mérnöki gondolkozást, azaz hogy az elvi vázlatból folytonos módosítással készül el a végső modell. Ezért a hagyományos geometriai modellezés inkább rekonstrukció, mintsem tényleges tervezés;
- A geometriai modellező rendszerek nem adnak teljeskörű leírást a modellezett objektumról. Így pl. nem adnak információt a mikrogeometriáról, az anyagról, a fizikai jellemzőkről, amelyek a működés, a gyártás, az ellenőrzés stb. szempontjából fontosak.

Az említett hiányosságok kiküszöbölése a mérnöki gondolkozáshoz és tevékenységhez tartalmukban és kezelésükben közelálló rendszerek kifejlesztését igényelte.

Ezeknek a rendszereknek a modellezés során nem csak az **objektumot**, hanem az **objektumhoz kapcsolódó folyamatokat** is le kell tudni írniuk, tehát kezelniük kell mindazokat az ismereteket, amelyek a **termék teljes élettartamát** jellemzik.

A mérnöki tevékenység integrálása érdekében a geometria modellek helyett **termékmodellekben** kell gondolkozni.

Ennek lehetőségét a **sajátosságokra alapozott tervezés** teremti meg.

4. ALAKSAJÁTOSSÁGRA ALAPOZOTT GEOMETRIAI MODELLEZÉS

**Szerző:
Molnár László**

A sajátosság alapú modellezés elvi alapjait **M. Bunge** fektette le még az 1990-es évek közepén, aki szerint:

„A fizikai világ dolgokból áll, amelyeket tartalmuktól függetlenül **objektumoknak** tekintünk. Az objektumok sajátosságaikkal jellemezhetők. A **sajátosságok minőségi és mennyiségi jellemzők, illetve azok közötti összefüggések.**”

A tervezés vonatkozásában objektumként értelmezhetők a termékek és azok legkülönbözőbb részei, amíg sajátosságok az ezekhez kapcsolódó jellemzők. A jellemzők viszonyát összefüggések és megszorítások írják le, szabályozzák.

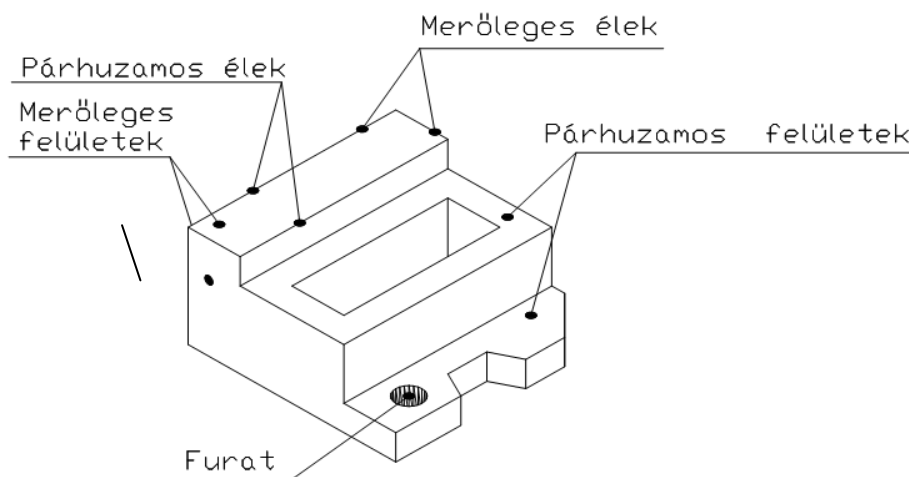
A gépészeti termékek vonatkozásában a geometriai alak az anyagi megvalósítás szempontjából elsődleges fontosságú, ezért természetesnek tűnik, hogy itt a sajátosságot a geometriából származtassuk. A geometriai alak által indukált sajátosságokat **alak sajátosságoknak** nevezzük.

A sajátosságok geometria alapján való származtatása korán sem az egyetlen lehetőség. A sajátosságok ugyanis levezethetők a termék működésének alapját adó természettudományos (fizikai, kémiai, biológiai stb.) jelenségekből is, ezeket **jelenség sajátosságoknak** nevezhetjük.

Az objektumokhoz hasonlóan a folyamatoknak is vannak minőségi és mennyiségi jellemzőik, ezek a **folyamatsajátosságok**. A gépészeti szerkezetek működésére vonatkozó jellemzőket **működéssajátosságokként** foglalhatjuk össze. A továbbiakban az alak sajátosság alapú modellezéssel foglalkozunk.

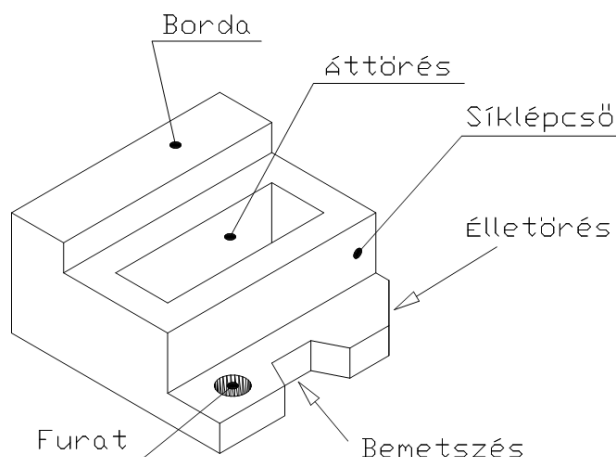
4.1. Az alak sajátosság értelmezése

A hagyományos geometriai értelmezés szerint **az alak sajátosságok olyan információhalmaznak tekinthetők, amelyek az alkatrész pontjainak, élének, felületeinek logikai összerendelését tartalmazzák.** Erre mutat példát a 4.1. ábra.



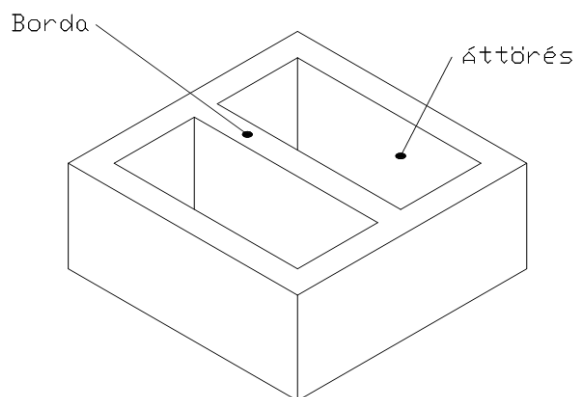
4.1. ábra. Az alak sajátosság hagyományos geometriai értelmezése

Az alak sajátosságok geometriai értelmezésének egy másik módja, amelyik az alkalmazási vonatkozásokat jobban figyelembe veszi. E szerint **az alak sajátosság olyan geometriai alapegység, amelyik a modellezett objektum alakjának azon adott tartományát képezi, amelyik a termék megvalósítása szempontjából jelentőséggel bír** (4.2. ábra).



4.2. ábra. Az alaksajátosság geometriai értelmezése az alkalmazási vonatkozások figyelembe vételével.

Meg kell jegyezni, hogy az alaksajátosságok geometriából kiinduló megközelítése nem egyértelmű. A modell alaksajátosságra bontása ugyanis függ a modell felhasználásának céljától. A 4.3. ábrán példaképpen bemutatott alkatrésznél a konstruktőr számára az objektum egyik sajátossága a tervezési funkciót megvalósító borda. A gyártástechnológus számára viszont az eltávolítandó áttörés a fontos alaksajátosság. Mindkettőt beépítve a modellbe, az túlhatározottá válik. Természetesen két féle szemléletű alaksajátosság megfeleltethető egymásnak.

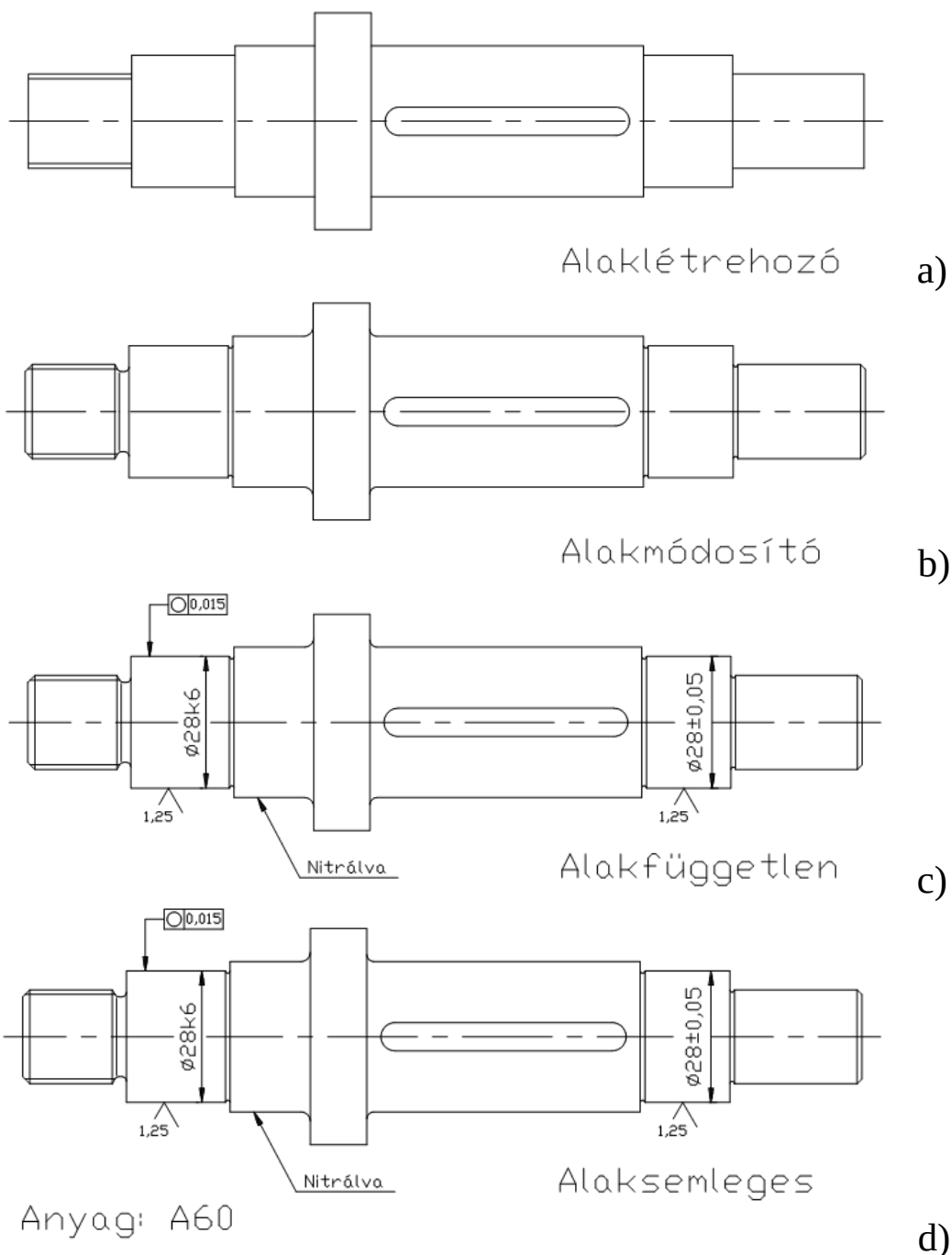


4.3. ábra. Példa az alaksajátosság geometriai értelmezésének problémájára

A geometriai szemléletű alaksajátosság kezelése esetében olyan adatsémákra van szükség, amelyek az alaksajátosságokat önálló alapegységként értelmezik, és lehetővé teszik a geometriai alapegységek összerendelését. Tekintettel arra, hogy a gépészeti alkatrészek geometriája – kevés kivételtől eltekintve (pl. rugó) – állandó, a statikus szemléltetést biztosító geometriai szemléletű alaksajátosság modellezés általánosságban elfogadható.

A geometriai alaksajátosságok modellezésének fejlettebb formái már lehetőséget adnak az alak mellett az attributív információk kezelésére is, ami az első lépés a szemantika-orientáltság felé. Az alaksajátosságok **szemantikai értelmezése** szerint megkülönböztetünk alaklétrehozó, alakmódosító, alakfüggetlen és alaksemleges típusú alaksajátosságokat. A 4.4. ábrán egy tengely példáján keresztül mutatjuk be az alaksajátosságok szemantikai értelmezését.

Az **alaklétrehozó alaksajátosság** valamely működés teljesítéséhez szükséges zárt alakzatot jelent. Ezt hordozó alakzatnak is nevezik. A 4.4a ábrán valamennyi tengelyszakasz valamilyen funkciót teljesít. Így például balról jobbra haladva: menetes tengelyvég a csapágyanya elhelyezésére; a mellette lévő tengelyszakasz a csapágy támasztására szolgál; majd a tömítés alatti tengelyszakasz következik. A tengelyváll a jobbról szerelt fogaskereket támasztja, a reteszpálya a nyomaték átvitelére szolgál, stb.



4.4. ábra. Az alaksajátosságok szemantikai értelmezése

Az **alakmódosító alaksajátosságok** gyárthatóság, szerelhetőség, szilárdsági szempontok stb. alapján módosítják a hordozó sajátosságokat (4.4b ábra). Így a bal oldali menet elején a

letörés a csapágyanya szerelését könnyíti meg, a végén a beszúrás a menet gyártását teszi lehetővé. A tengelycsapok végén a beszúrások a köszörűkő kifutását biztosítják, a tengelyvállnál kialakított lekerekítések a tengely szilárdsági viselkedést teszik kedvezőbbé.

Az **alakfüggetlen alaksajátosságok** hozzákapcsolódnak a névleges alakhoz, de annak csak másodlagos módosulását okozzák. Alakfüggetlen alaksajátosságok például a méret- és alaktűrések, felület érdességek és felület kezelések, stb. (4.4c ábra). Ezek az alaksajátosságok felületekhez, felület-csoportokhoz vagy alaksajátosságokhoz rendelve.

Az **alaksemleges alaksajátosságoknak** nincs közvetlen kapcsolata a geometriával. Ebbe a csoportba sorolható például a modell anyaga (és valamennyi az anyaghoz rendelhető anyagtulajdonság), vagy a hőkezelési előírások, stb. (4.4d ábra). Az alaksemleges alaksajátosságok alkatrészekhez vagy alkatrész-csoportokhoz rendelve.

Az alkatrészek szemantikaorientált értelmezése az **alkalmazások szemléletéből indul ki**, és elsődlegesnek az alkalmazásban fontos szemantikai tartalmat kifejező információkat tekint.

A szerkezettervezési, vagy más szóval **konstrukciós alaksajátosságok** a szerkezet működését meghatározó geometriai alakzatok. A tervezési tevékenység a működési lehetőségek, feltételek és jellemzők explicit kifejezésére, valamint a szükséges és lehetséges geometriai alakzatok viszonyára összpontosít.

A **gyártástechnológiai alaksajátosságok** a mozgó forgácsoló szerszám által kialakítandó és leválasztandó geometriai alakzatokat írják le. A gyártástechnológiai alaksajátosságokra példát lényegében a 4.2. ábra mutat. A gyártástechnológiai alaksajátosságok a megmunkáláshoz szükséges szerszámokra és berendezésekre is utalnak.

Az alkatrészek, részegységek összeállításbeli viszonyát, kapcsolódásuk minőségét **szerelési alaksajátosságokkal** lehet jellemezni. A szerelési alaksajátosságok lehetnek:

- közvetlen kapcsolatban álló alaksajátosságok;
(ezek az alkatrészek felületükkel, élükkel, jellemző pontjukkal érintkeznek egymással, vagy egymáshoz képest meghatározott geometriai viszonyban vannak).
- közvetve befolyást gyakorló alaksajátosságok;
(ezek bentfoglaltságot vagy elrendezési struktúrából adódó térbeli viszonyokat írnak le).
- kezelhetőséget leíró alaksajátosságok;
(megfogó, szerelő, támasztó eszközök kapcsolódásának lehetséges formáit fejezi ki).

Az **elemzési alaksajátosságok** a numerikus vizsgálathoz alapként használt geometriai modell idealizálhatóságával, a modell megtámasztási és terhelési feltételeivel állnak kapcsolatban. Ennek megfelelően vannak:

- alakhelyettesítő alaksajátosságok;
- hatásközvetítő alaksajátosságok.

Az alaksajátosságok **ontológikus szemléletű** értelmezése jelenleg kutatási fázisban van. Az ontológikus szemlélet értelmezésében a sajátosságok egy termékleíró nyelv magas szintű alapegységeként jelennek meg.

4.2. Alkatrész modellezés

Tervezéskor a végső alak eléréséhez a kezdetben elképzelt alakot többször kell módosítani. Erre azért van szükség, mert az alakkal szemben vannak funkcionális, szilárdsági, minőségi, gyárthatósági, szerelhetőségi stb. követelmények, amelyek megvalósítása, ellenőrzése csak külön – legjobb esetben is csak párhuzamosan – végezhető el. Ma már követelmény, hogy a CAD rendszerek támogassák a konstrukcióváltozások interaktív előállítását. Ezt az elvárást – mai ismereteink szerint – az alaksajátosság alapú programok elégítik ki, amikor is a modelt geometriai- és méret kényszerek határozzák meg.

A ma forgalomban lévő 3D-s modellező rendszerek kivétel nélkül alaksajátosságokra alapozott, parametrikus modellezők. Az alaksajátosságokra alapozott parametrikus tervező programok legismertebb, legelterjedtebb szoftverei: Mechanical Desktop, Inventor, Solid Works, Solid Edge, Pro Engineer, Catia, NX, Ideas. Mindegyik rendszernek egyik alapvető modulja az alkatrésztervezés.

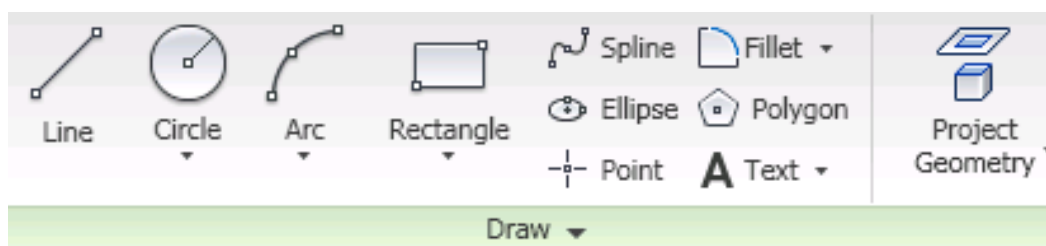
Az alkatrész modellezés főbb

- vázlatkészítés, a vázlat geometriai és méretkényszerekkel való ellátása;
- bázis, és további alaksajátosságok létrehozása anyag hozzáadásával vagy elvételével;
- az alkatrész módosítása;
- anyag, és esetlegesen más attributív információk hozzárendelése.

4.2.1. Vázlatkészítés

Az alkatrésztervezés első munkafázisa a vázlat létrehozása, geometria és méretkényszerekkel való ellátása. A vázlatolás kétdimenziós munka, és a vázlat rajzelemeit geometria kényszerek kapcsolják egymáshoz.

A vázlatkészítés 2D-s munka, és az ún. **vázlatsíkon** zajlik. A vázlatkészítéshez rendelkezésre álló alapvető parancsokat, eljárásokat a 4.5. – 4.8. ábrák mutatják. A 4.5. ábra a rajzoló parancsokat foglalja össze.

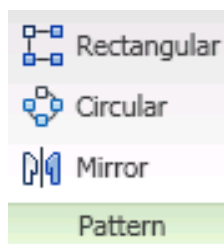


4.5. ábra. A vázlatkészítés rajzoló parancsai

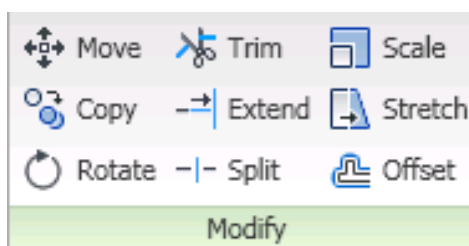
A vázlatkészítés egyszerű geometriai elemei: a **Line** (vonal), **Circle** (kör), **Arc** (ív), **Rectangle** (téglalap), **Spline** (splajn), **Ellipse** (ellipszis), **Point** (pont), **Fillet** (lekerekítés / letörés), **Polygon** (sokszög) és a **Text** (szöveg, amelyik lehet egysorú, vagy rajzelemre illesztett). Fontos eleme a vázlatkészítésnek a **Project Geometry** parancs, amelyik segítségével a már meglévő alaksajátosságok éleit, kontúr vonalait lehet a vázlatsíkra vetíteni.

A rajzelemeket sokszorozó parancsok a 4.6. ábrán láthatók. Ezek rendre: **Rectangular** (négyzetgletes kiosztás), **Circular** (poláris kiosztás), **Mirror** (tükrözés). A 4.7. ábra a vázlat üzemmódban alkalmazható szerkesztő parancsokat mutatja. Ezek: **Move** (mozgat), **Copy**

(másol), **Rotate** (foragat), **Trim** (metsz), **Extend** (meghosszabbít), **Split** (zárt görbe metszése), **Scale** (léptékezt), **Stretch** (nyújt), **Offset** (párhuzamos).



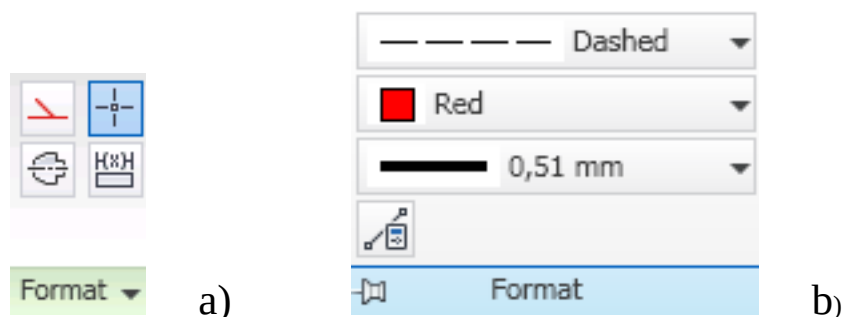
4.6. ábra. Rajzelemeket sokszorozó parancsok



4.7. ábra. A vázlat üzemmód szerkesztő parancsai

A 4.5. – 4.7. ábrákon bemutatott parancsok a 2D-s szerkesztő programokból (pl. AutoCAD) többnyire már ismertek.

A vázlatkészítési munkát a **Format** parancscsoport parancsi segítik (4.8. ábra). A 4.8a ábra szerinti opciók bekapcsolásával **szerkesztő vonalat**, **szimmetria tengelyt** és **középpontot** lehet rajzolni. Ezek a rajzelemek nem lesznek részei a vázlatnak, csupán a szerkesztő munkát segítik. A 4.8b ábra szerint a vázlat síkon használ vonalak típusát, színét, vonalvastagságát lehet beállítani.

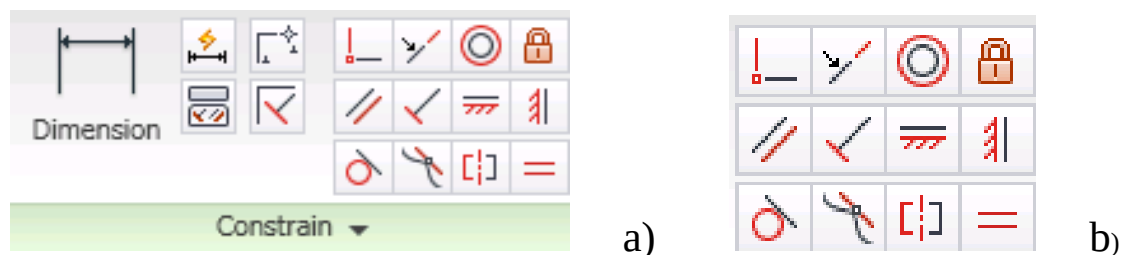


4.8. ábra. A vázlatolást segítő tulajdonság beállító parancsok

A vázlatot, amelyiknek sem alakilag, sem méretileg nem kell pontosnak lennie, geometriai és méret kényszerekkel lehet határozottá tenni, más kifejezéssel profillá alakítani. A geometriai és méret kényszerek teremtik meg a vázlat rajzelemei között a logikai kapcsolatrendszer.

A szokásosan használt kényszereket a 4.9. ábrán mutatjuk be, az ábra jobb oldalán kiemelve a geometriai kényszereket. A geometriai kényszerek (soronként haladva) rendre (4.9b ábra): **Coincident** (ráeső, egybeeső), **Collinear** (egy egyenesbe eső), **Concentric** (koncentrikus), **Fix** (pont vagy rajzelem rögzítése a vázlat síkon), **Parallel** (párhuzamos), **Perpendicular** (merőleges), **Horizontal** (vízszintes), **Vertical** (függőleges), **Tangent** (érintő), **Smooth**

(simítás, splájn és egy másik rajzelem érintőfolytonos összesímítése), **Symmetric** (szimmetrikus), **Equal** (egyenlő, méretek egyenlővé tételére).



4.9. ábra. a) A kényszerek összefoglaló táblázata; b) kiemelve a geometriai kényszerek

A **Dimension** (méretezés) parancs (4.9a ábra) szolgál a méretkényszerek megadására.



Az **Automatic dimensions** (automatikus méretezés) parancs a vázlat, illetve a vázlat kijelölt részeinek automatikus méretkényszerekkel való ellátására szolgál.

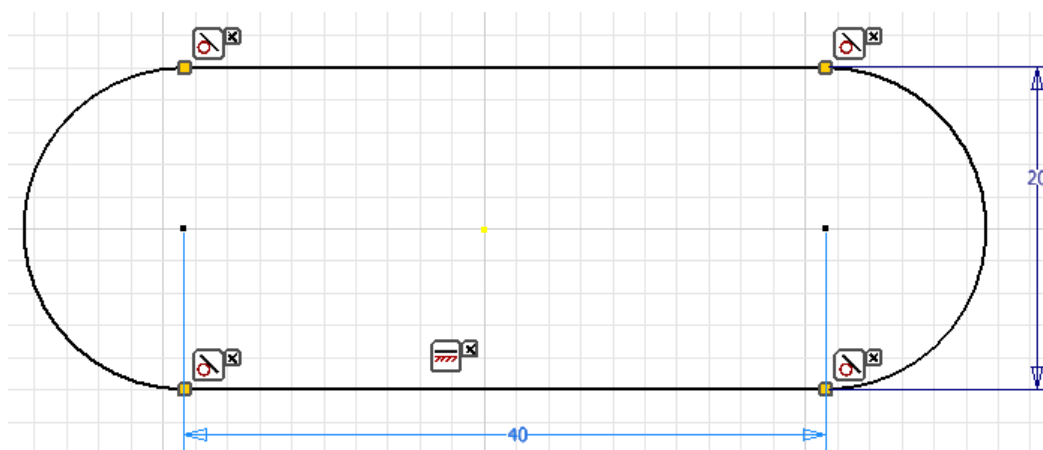


Az **Automatic dimensions** (automatikus méretezés) parancs a vázlat, illetve a vázlat kijelölt részeinek automatikus méretkényszerekkel való ellátására szolgál.



A **Constraint Inference** (automatikus kényszerezés) opció bekapcsolásával a vázlatkészítés során a kényszereket a program automatikusan helyezi el a vázlaton.

A 4.10. ábrán – példaképpen – egy geometriai és méretkényszerekkel ellátott határozott profilvázlatot mutatunk be. A vázlat 4 ráső kényszerrel (sárga pontok az egyenesek és az ívek találkozásánál), 4 érintő kényszerrel rendelkezik, és e mellett az alsó él vízszintesre van beállítva. A vázlatot 2 méretkényszer teszi határozottá.

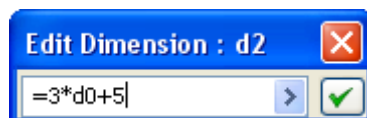


4.10. ábra. Határozott profilvázlat. Példa a geometriai- és méretkényszerek alkalmazására

Néhány megjegyzés a vázlatkészítéssel kapcsolatban:

- Csak geometriai kényszerek alkalmazásával a profilvázlat nem tehető határozottá, a teljes határozottsághoz legalább egy méret megadásra is szükség van.
- A geometriai kényszerek megtekinthetők, törölhetők, módosíthatók.

- A geometriai- és méretkényszerek egymást kiválthatják, illetve egymást helyettesíthetik.
- A geometriai kényszerek megtekinthetők, törölhetők, módosíthatók.
- A programok a vázlat túlhatározottá tételét általában nem engedik meg.
- A méretkényszerek megadhatók numerikus konstansként vagy egyenlet formájában, tervezési összefüggésként. Az egyenlet alkalmazása akkor kívánatos vagy szükséges, amikor a geometriai méretek között egyenletekkel teremthetünk kapcsolatot, azaz egy adott geometriai elem mérete egy másik geometriai elem méretétől függ. (4.11. ábra).



4.11. ábra. Példa a méretkényszer egyenlettel való megadására

- Egyes programok a vázlatolást automatikus kényszerezéssel is segítik megfelelő kapcsoló bekapcsolásával.

Egy profil lehet nyitott vagy zárt profil. Nyílt profillal készült vázlatokat jellemzően felületek kialakítására, zárt profilokat pedig testek képzésére használjuk..

Nem határozott profilvázlatból is lehet alaksajátosságot létrehozni, de semmiképpen sem javasolható, mert az alaksajátosság módosításakor a modell széteshet.

4.2.2. Alaksajátosságok létrehozása

Az első profilvázlat elkészülte után létrehozható az első alaksajátosság, amit **bázis alaksajátosságnak** is szokás nevezni. A bázis alaksajátossághoz halmaz kompozíciós műveletekkel kapcsoljuk hozzá a további alaksajátosságokat. A **kompozíciós műveletek** közé tartozik – mint azt a 3.4. fejezetben már részletesen tárgyaltuk – az **egyesítés (union)**, amelyik két alaksajátosság pontthalmazait kapcsolja össze; a **kivonás (difference)**, amelyik két pontthalmaz különbségét képezi; és a **közösrész-képzés (intersection)**, amelyik mindkét alaksajátosságban megtalálható közös pontthalmazt határozza meg.

Az alaksajátosságok alapvetően három jellegzetes csoportba sorolhatók be:

- vázlatra épülő alaksajátosságok;
- elhelyezett alaksajátosságok;
- sokszorozással létrehozott alaksajátosságok;
- munka alaksajátosságok.

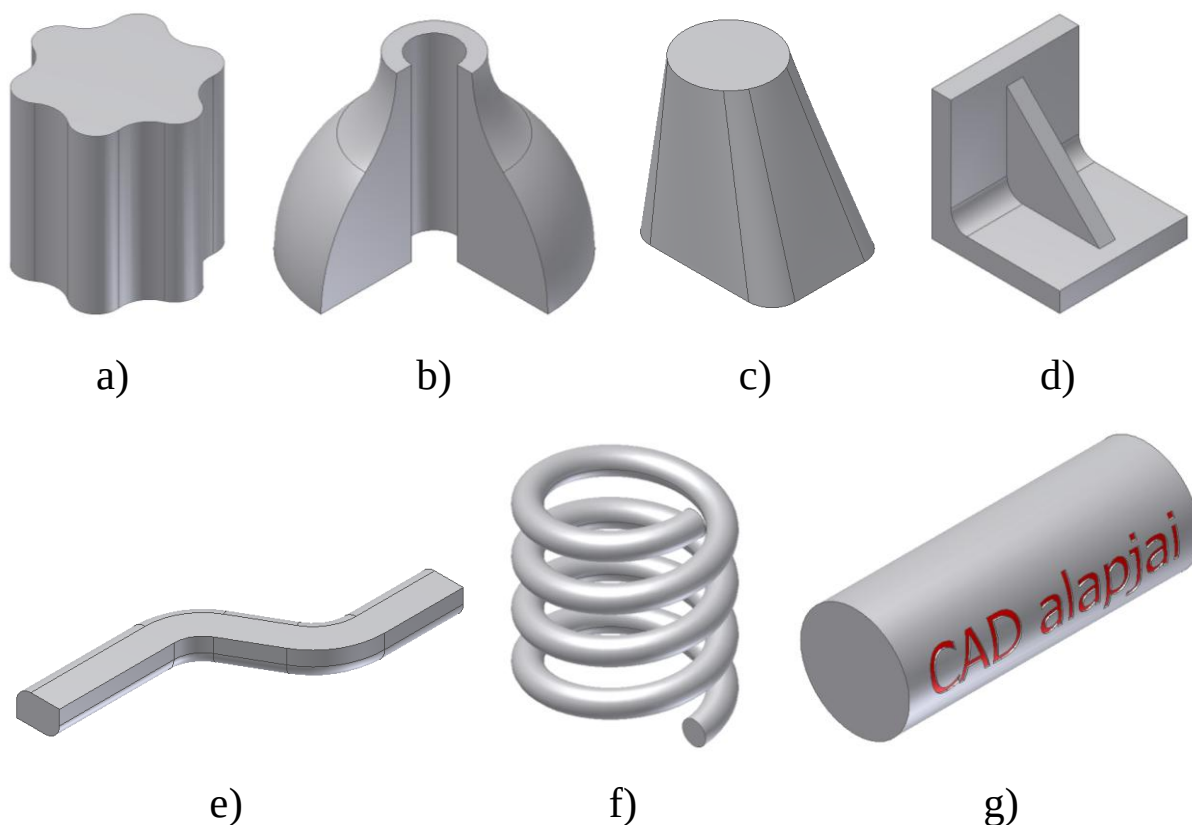
4.2.2.1. Vázlatra épülő alaksajátosságok

A **vázlatra épülő alaksajátosságok** az előzetesen létrehozott vázlatokból állíthatók elő. Az elsőnek létrehozott alaksajátosság – ún. bázis alaksajátosság – csak vázlatra épülő lehet.

A vázlatra épülő alaksajátosságok parancsait a 4.12. ábra foglalja össze. Ezek a parancsok rendre: **Extrude** (kihúzás), **Revolve** (megforgatás), **Loft** (pásztázás), **Sweep** (söprés), **Rib** (borda), **Coil** (spirál), **Emboss** (domborítás). A vázlatra épülő alaksajátosságokra egy-egy példát a 4.13. ábrán mutatunk be.



4.12. ábra. Vázlatra épülő alaksajátosságok



4.13. ábra. Egy-egy példa a vázlatra épülő alaksajátosságokra. a) kihúzás; b) megforgatás; c) pásztázás; d) borda; e) söprés; f) spirál; g) vetítés.

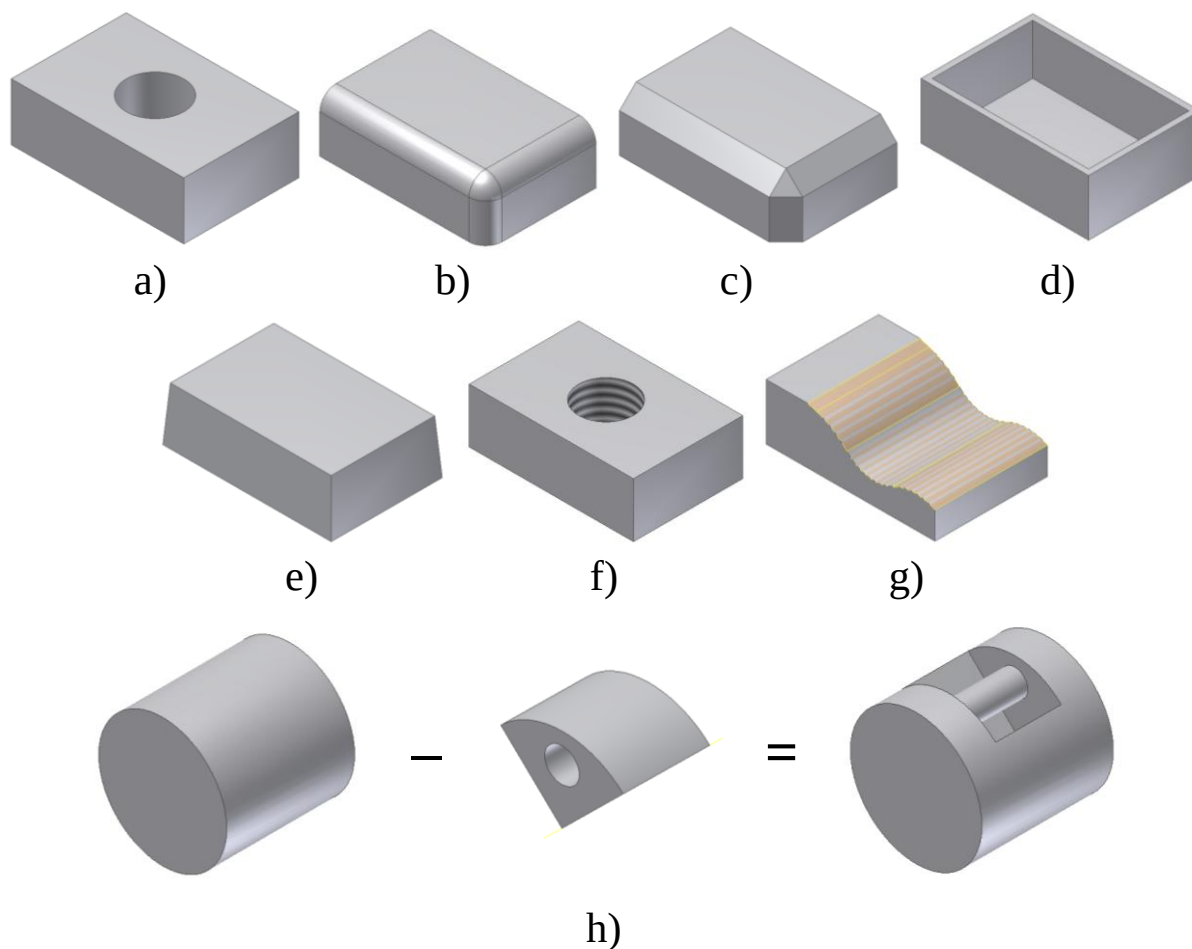
4.2.2.2. Elhelyezett alaksajátosságok

A tervezői gyakorlatban gyakran ismétlődő formaelemek (pl. furat, lekerekítés, élettörés stb.) elhelyezéséhez nem kell külön vázlatot készíteni, hanem előre definiált alaksajátossággként, a méretek megadása után közvetlenül elhelyezhetők a modellben. Ezeket az alaksajátosságokat **elhelyezett alaksajátosságoknak** nevezik. Ezzel az eljárással lényegesen gyorsítani lehet a tervezés folyamatát. (Megjegyezzük, hogy az elhelyezett alaksajátosságok természetesen vázlatra épülő alaksajátosságokként is létrehozhatók.)

Az elhelyezett alaksajátosságok parancsait a 4.14. ábra foglalja össze. Ezek a parancsok rendre: **Hole** (furat), **Fillet** (lekerekítés), **Chamfer** (letörés), **Shell** (hég), **Draft** (kilökési ferdeség), **Thread** (menet), **Split** (szétvágás), **Combine** (összevonás), **Move Face** (felület mozgatása), **Copy Object** (objektum másolása), **Move Bodies** (testek mozgatása). Az elhelyezett alaksajátosságokra egy-egy példát a 4.15 ábrán mutatunk be.



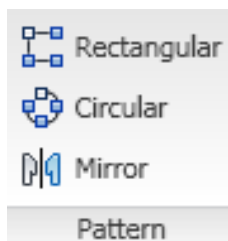
4.14. ábra. Elhelyezett alaksajátosságok



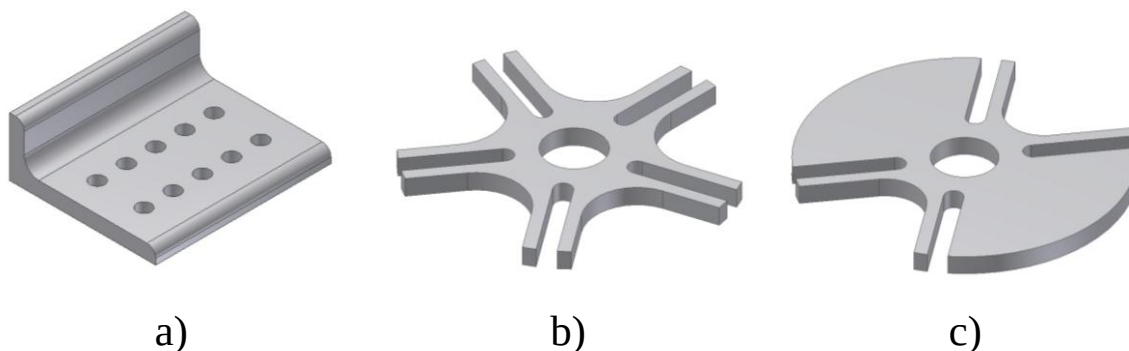
4.15. ábra. Egy-egy példa az elhelyezett alaksajátosságokra. a) furat; b) éllekerekítés; c) élettörés; d) héj képzés; e) kilökési ferdeség; f) menet; g) szétvágás; h) alkatrészek közötti halmazműveletek.

4.2.2.3. Sokszorozással létrehozott alaksajátosságok

A sokszorozással létrehozott építőelemek alapja egy korábban elkészített alaksajátosság, amelyet a program egy mintázat szerint helyez el. A sokszorozással létrehozott alaksajátosságok parancsait a 4.16. ábra foglalja össze. Ezek a parancsok rendre: **Rectangular** (négyzetes kiosztás), **Circular** (poláris kiosztás), **Mirror** (tükrözés). A sokszorozással létrehozott alaksajátosságok egy-egy példát a 4.17 ábrán mutatunk be.



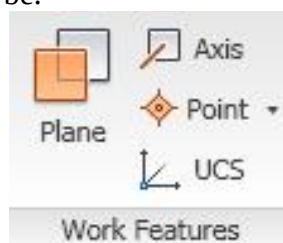
4.17. ábra. Sokszorozással létrehozott alak sajátosságok



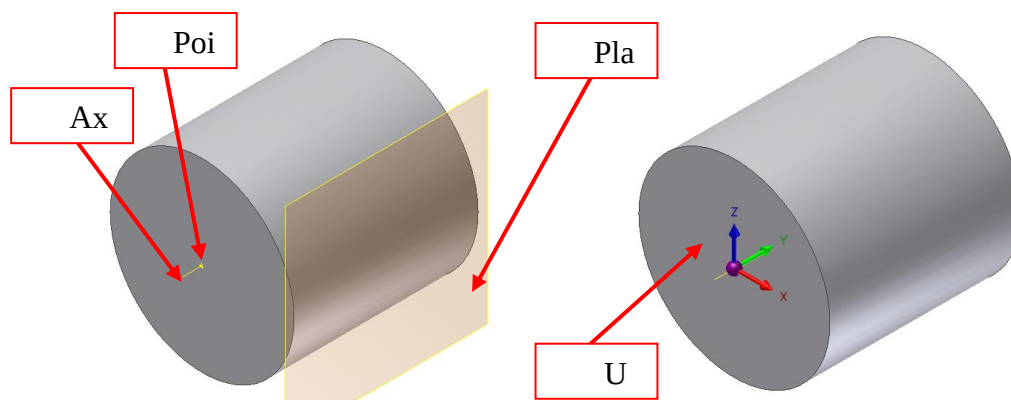
4.18. ábra. Egy-egy példa a sokszorozással létrehozott alak sajátosságokra.
a) négyzetletes kiosztás; b) poláris kiosztás; c) tükrözés.

4.2.2.4. Munka alak sajátosságok

A munka alak sajátosságok közvetlenül nem részei az alkatrésznek, csak segítik a modellel. A munka alak sajátosságok parancsait a 4.19. ábra mutatja. Ezek rendre: **Plane** (munkasík), **Axis** (munkatengely), **Point** (munkapont), **UCS** (felhasználói koordináta rendszer). A munka alak sajátosságokat a 4.20. ábra mutatja be.



4.19. ábra. Munka alak sajátosságok



4.20. ábra. Egy-egy példa a munka alak sajátosságokra

Munkapont létrehozható egy pont megadásával (sarokpont, él felezőpontja, geometriai pont megjelölése, kör, ív középpontja), két egyenes vagy három sík metszéspontjaként, egyenes és sík metszéspontjaként.

Munkatengely létrehozható két pont megjelölésével (ez lehet munkapont, sarokpont, felezőpont, középpont), egy pontból egy felületre bocsájtott merőlegesként, egy adott ponton egy adott éllel húzott párhuzamosként, egy forgásfelület tengelyeként, egy tetszőleges él megjelölésével, két sík metszéspontjaként.

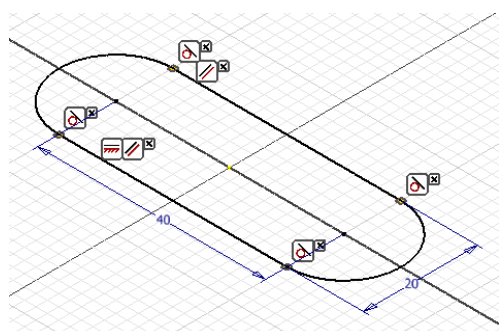
Munkasík létrehozható három pont megadásával, egymást metsző két egyenes megjelölésével, egy adott sík megjelölésével, illetve ezzel párhuzamosan, egy adott síkkal párhuzamosan egy forgástestet érintve.

Egy alkatrészhez tetszőleges számú munka alaksajátosság rendelhető hozzá, vázlagsík viszont mindig csak 1 lehet.

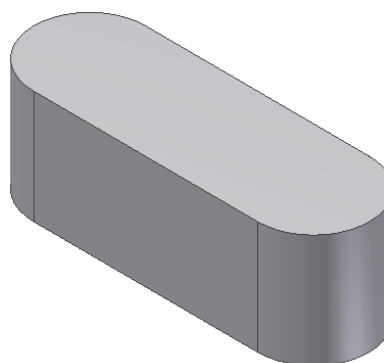
A munka alaksajátosságok használata nélkül elképzelhetetlen lenne bármely parametrikus modellező rendszer hatékony használata, ezért ezek kötelező módon meg is találhatók minden szoftver típusban.

4.2.3. Modell történet

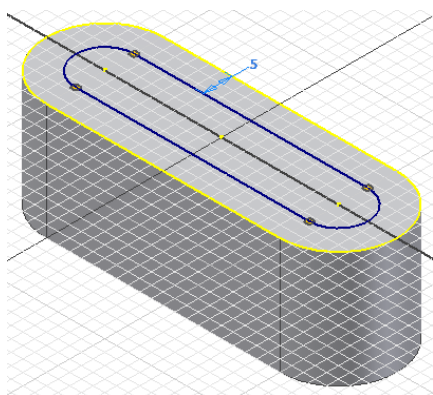
Egy egyszerű alkatrész kialakításának sorrendjét a 4.21. ábrán mutatjuk be. Első lépésként a bázis alaksajátosság profilvázlatát kell kialakítani (4.21a ábra). A vázlagsík az x-y sík. Az ábrán bejelöltük a geometriai- és méret kényszereket. A bázis alaksajátosságot kihúzással állítjuk elő (4.21b ábra).



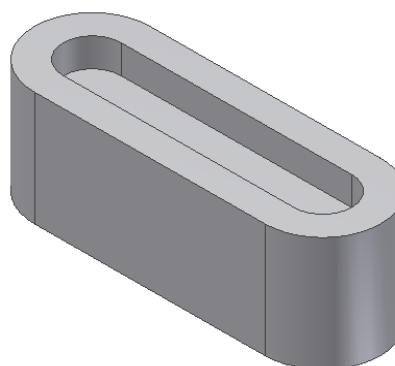
a)



b)

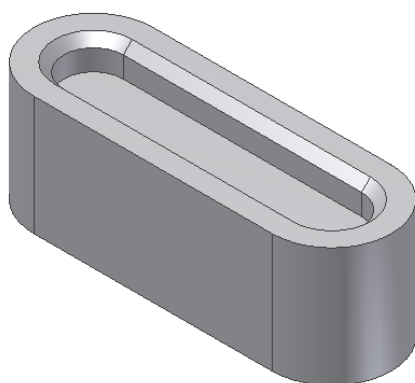


c)

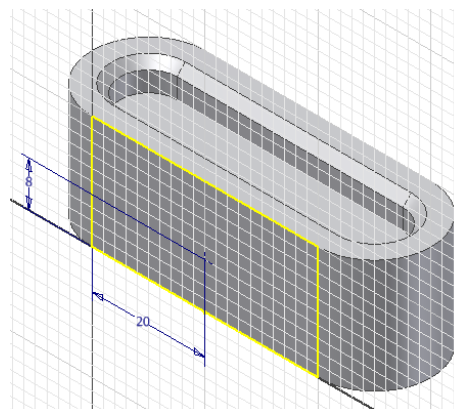


d)

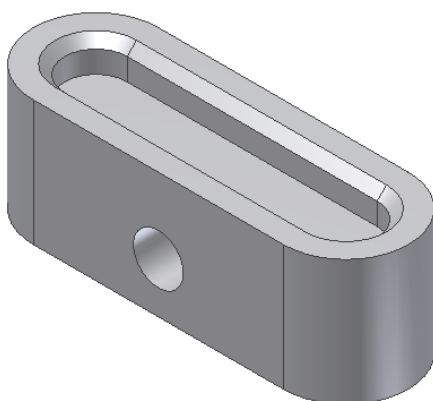
4.21. ábra. Egyszerű alkatrész létrehozása



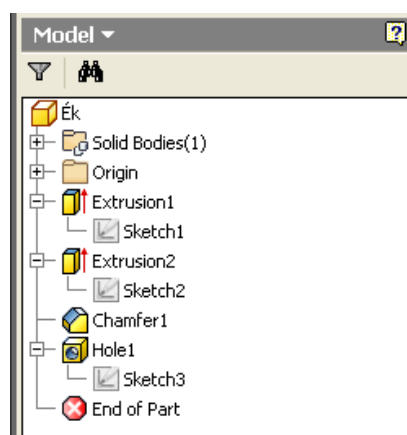
e)



f)



g)



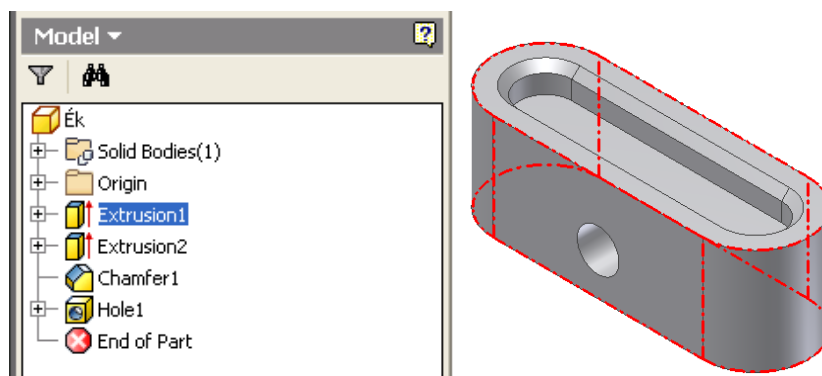
h)

4.21. ábra folytatása. Egyszerű alkatrész létrehozása

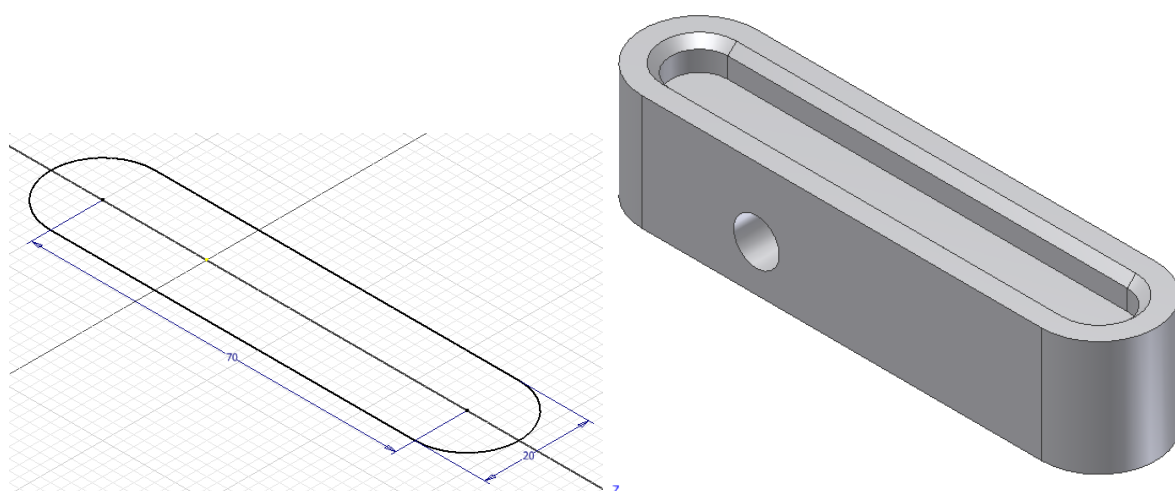
Az új vázlatsíkot a bázis alaksajátosság felső lapján vesszük fel, és az offset parancs segítségével hozzuk létre az új profilvázlatot (4.21c ábra). A második vázlatra épülő alaksajátosságot ismét kihúzással hozzuk létre kivonásos üzemmódban (4.21d ábra). A belső élet letörjük egy elhelyezett alaksajátosság segítségével (4.21e ábra). Az oldalsó furat elkészítéséhez az oldalfelületen kell felvenni egy vázlatsíkot, a furatközéppont kijelöléséhez (4.21f ábra). Az Ø8-as furatot a „furat” elhelyezett sajátossággal hozzuk létre (4.21g ábra).

A modell létrehozásának sorrendjét, az ún. **modell történetet** a program az áttekintőben (**browser**) mutatja ((4.21h ábra). Az áttekintő megmutatja, hogy a modell milyen alaksajátosságokból épül fel, milyen sorrendben, és az egyes alaksajátosságok mely vázlatra épülnek. Mindezek mellett az áttekintő nem egy passzív leírás, hanem a megfelelő sor kijelölésével javítani, módosítani lehet az alaksajátosságot vagy a profilvázlatot.

A 4.22. ábrán egy módosítás folyamatát mutatjuk be. Példaképpen a 4.21a ábra szerint 40 mm-es hosszt kell 70 mm-re módosítani. Ehhez a bázis alaksajátosságot kijelölve, és ennek a vázlatát kiválasztva (4.22a ábra), egyetlen méret átírásával a módosítás elvégezhető. Az eredményt a 4.22b ábra mutatja. A szinte egyetlen kattintásra elvégezhető módosítást az alaksajátosságok alkalmazása teszi lehetővé, azaz a geometriai elemek közötti logikai kapcsolat rendszer.



a)



b)

4.22. ábra. Az alkatrész egy paraméterének módosítása

4.2.4. Parametrikus alkatrész modellezés

Az alkatrész modellező szoftverek fontos tulajdonsága, hogy az alkatrészek létrehozásakor, a felhasznált méretek automatikusan táblázatba íródnak, és a program minden mérethez külön kódot rendelnek. Ezeknek a kódoknak másodlagos elnevezést is lehet adni. Egy ilyen kódtáblára mutat példát a 4.23. ábra. A táblázat első oszlopában a másodlagos elnevezésű kódok láthatók. A másodlagos elnevezéssel tervezői összefüggések írhatók le. Így például alapláncnak választva az „alapkör_átmérő” (10 mm), további méretek összefüggésekkel kifejezhetők:

$$\begin{aligned} \text{Magasság} &= 2,7 * \text{Alapkör\_átmérő} \\ \text{Fejkör\_átmérő} &= 2,4 * \text{Alapkör\_átmérő} \\ \text{Öv\_magasság} &= 0,6 * \text{Alapkör\_átmérő} \\ \text{Furat\_helyzet\_1} &= 1,0 * \text{Alapkör\_átmérő} \dots \end{aligned}$$

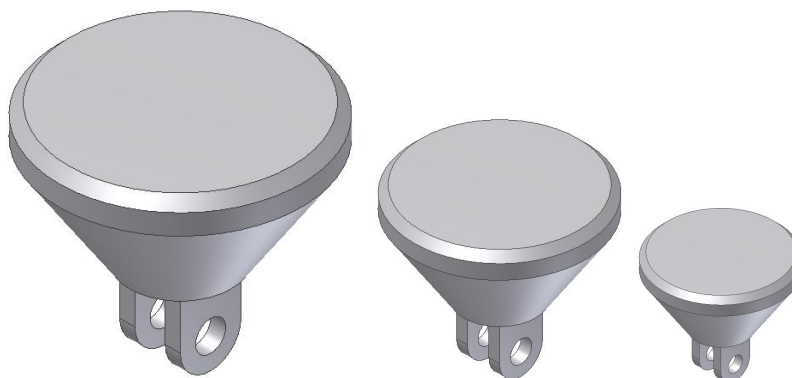
A relációk előírhatók közvetlenül a paraméter táblában, vagy akár egy Excel fájlban, amit a paraméter listához lehet rendelni. Az alaplánc megváltoztatásával automatikusan módosul az alkatrész többi mérete. A parametrikus modellezés eredményére mutat példát a 4.24. ábra.

Parameters							
Parameter Name	Unit	Equation	Nominal Value	Tol.	Model Value		Comment
User Parameters							
I:\KK_Munkák\Ára...							
Alapkör_átmérő	mm	10 mm	10,000000	●	10,000000	☐	
Magasság	mm	27 mm	27,000000	●	27,000000	☐	
Fejkör_átmérő	mm	24 mm	24,000000	●	24,000000	☐	
Öv_magasság	mm	6 mm	6,000000	●	6,000000	☐	
Furat_helyzet_1	mm	10 mm	10,000000	●	10,000000	☐	
Fül_sugár	mm	6 mm	6,000000	●	6,000000	☐	
Furat_helyzet_2	mm	6 mm	6,000000	●	6,000000	☐	
Fül_szélesség_1	mm	12 mm	12,000000	●	12,000000	☐	
Fül_szélesség_2	mm	6 mm	6,000000	●	6,000000	☐	
Furat_átmérő	mm	6 mm	6,000000	●	6,000000	☐	
Letörés	mm	2 mm	2,000000	●	2,000000	☐	

☐ Display only parameters used in equations

Reset Tolerance:

4.23. ábra. Parametrikus alkatrész modellezés kód táblája



4.24. ábra. Példa a parametrikus alkatrész modellezés használatára

4.2.5. Attributív információk

Az alkatrészhez számos attributív információ rendelhető. Ezek többek között a vállalat neve, a gyártmány és az alkatrész neve, a tervező, szerkesztő, jóváhagyó neve, a létrehozás, módosítás dátuma, rajzszám, stb. De az attributív információk közül talán a legfontosabb az alkatrész anyagának megadása. Az anyag a programokhoz rendelt adatbázisból választható ki, amelyik adatbázis a felhasználó által bővíthető.

Az adatbázis anyaghoz rendelt fizikai és mechanikai jellemzőket is tartalmaz. Ezek közül a sűrűség segítségével határozható meg az alkatrész tömege, a tömegközéppontjának helye, a különböző koordináta rendszerekben számolt tehetetlenségi nyomatéka, stb. A 4.25. ábra – példaképpen – egy olyan tulajdonság ablakot mutat, ahol egy acélból készült alkatrész számított mechanikai jellemzői láthatók.

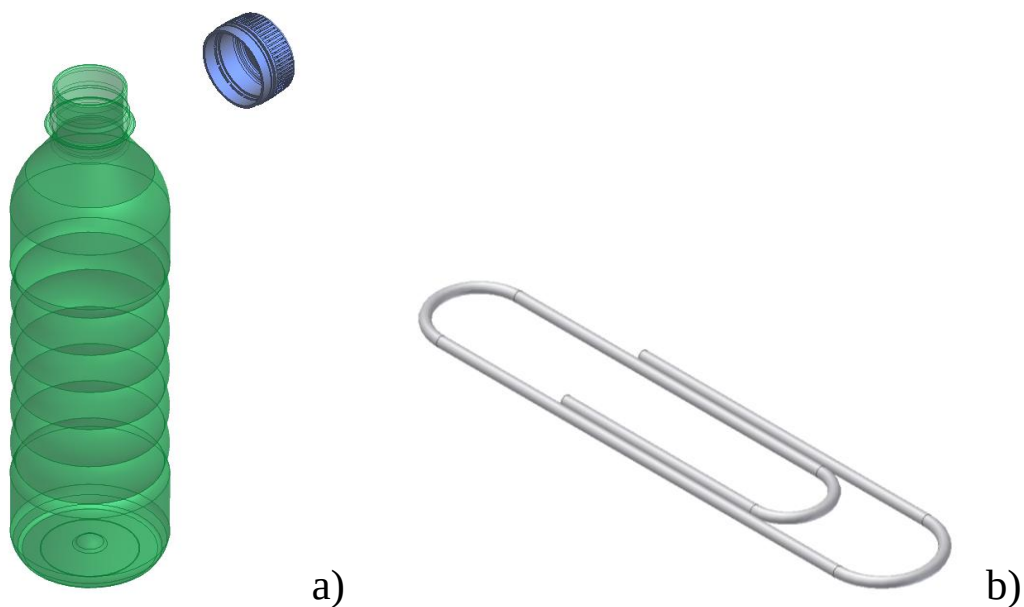
Az egyéb mechanikai jellemzők, mint például a rugalmassági modulus, szakító szilárdság, folyáshatár, hővezetési tényező, fájhő, stb. a mérnöki és numerikus számításokhoz szolgálhatnak anyagjellemző adatokul.

Az anyagadatbázis természetesen nyitott, a felhasználó tetszés szerint bővítheti saját használatú anyagainak bevitelével.

4.25. ábra. Egy alkatrész mechanikai jellemzői

4.2.6. Néhány példa az alkatrész modellezés keretében létrehozott alkatrészekre

A 4.26. ábra a megforgatás és a söprés alaksajátosság alkalmazására mutat egy-egy példát.



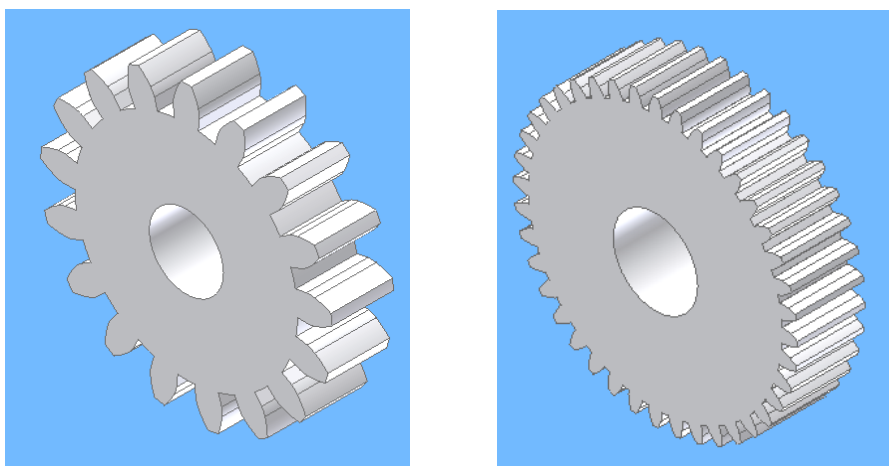
4.26. ábra. a) megforgatás alaksajátossággal létrehozott PED palack és záró kupakja;
b) söprés alaksajátossággal létrehozott gémpapír

A 4.27. ábrán pásztázással létrehozott bútorfogantyú látható. A pásztázás különösen alkalmas arra, hogy szép kialakítású, formatervezett felületeket hozzunk létre. A szép felületek kialakítását segíti az ún. zebracsíkos vizuális esztétikai vizsgálat.



4.27. ábra. Pásztázással létrehozott bútorfogantyú, és a felület zebracsíkos esztétikai vizsgálata

A 4.28. ábra a parametrikus modellezés jó példája. A paraméter tábla úgy van felépítve, hogy a fogszám és modul megadásával a program generálja a fogaskerék alkatrész.



4.28. ábra. Példa a parametrikus modellezés alkalmazására

Két öntött alkatrész látható a 4.29. ábrán. A bal oldali egy kis kézi sajtoló szerszám állványa, a jobb oldali egy kis kompresszor hengere hűtőbordákkal. Mindkét alkatrészen jól láthatók az öntvényhelyes kialakítás jellemzői.

A 4.30. ábrán egy csőszorító tartót és egy nagy fordulatszámú robbanómotor dugattyúját mutatjuk be. És végül a 4.31. ábrán egy formatervezett autófelni látható.

Számos gépszerkezeti elem készül lemezből. A lemezalkatrészek tervezés az alkatrész modellezés önálló fejezete, a lemezhajlítás, kivágás, mélyhúzás, kiterítés stb. speciális lemezparancsokkal. A lemezalkatrészek modellezéséhez használt parancsok messzemenően figyelembe veszik a lemez megmunkálási technológiáját. A 4.32. ábrán példaképpen két lemezalkatrészt mutatunk be.

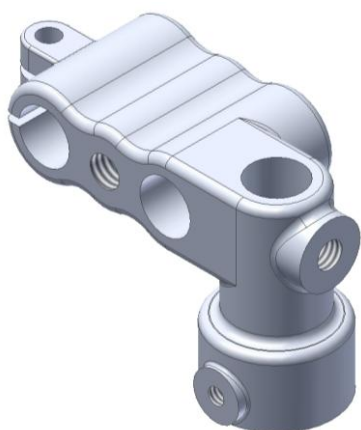


a)



b)

4.29. ábra. Öntött alkatrészek. a) kézi sajtoló szerszám állványa; b) kompresszor ház



a)

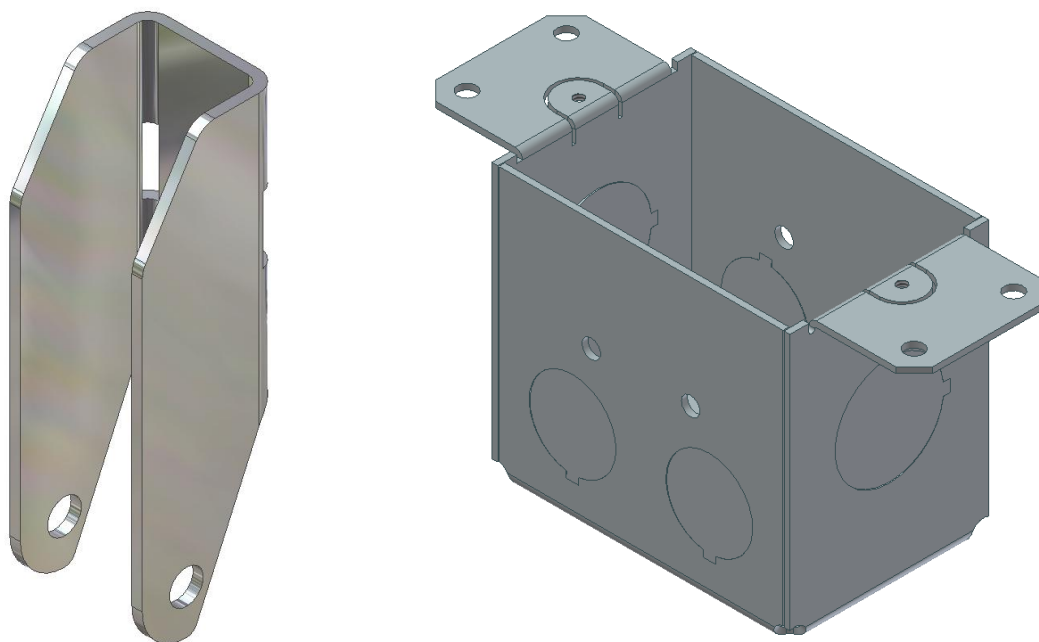


b)

4.30. ábra. a) csőtartó; b) robbanómotor dugattyú



4.31. ábra. Egy formatervezett autófelni



4.32. ábra. Két példa a lemezekből kialakított alkatrészekre

4.3. Az alkatrész modellezés fejlesztési irányai

Hagyományos modellezés. A leginkább elterjedt modellezési mód, amelyik a kezdetektől fogva lehetővé teszi a felhasználónak a *modelltörténeten alapuló, alaksajátosságokkal rendelkező, parametrikus* modellezést. Ez ugyanakkor hibrid megoldás is, mert egy alkatrészen egyszerre használhatóak a *szilárdtestmodellezés* és a *felületmodellezés* eszközei. Az alaksajátosságok (kihúzás, kivágás, stb.) létrehozását általában megelőzi egy vázlat, amely az alaksajátosságok alapjául szolgál. A vázlat módosítása fog visszahatni a testre, ami egyben az alaksajátosságok hierarchikus kapcsolatát jelenti, amit a modelltörténet testesít meg. A modelltörténet elején lévő alaksajátosság szerkesztése az őt követő elemek újraszámítását eredményezi.

A hagyományos modellező rendszerek jellemzői:

- minden építőelem (geometriai és méretkényszerek) módosítható;
- a modellt paraméterek vezérlik;
- a modelltörténet magán viseli a tervező látásmódját.

A hagyományos modellező rendszerek hátrányai:

- a módosításhoz a modellt és a modelltörténetben szereplő minden alaksajátosságot ismerni, értelmezni kell;
- a modelltörténet elején lévő alaksajátosságok módosítása az egész modell újraszámolását igénylik;
- helytelen módosítás következtében a modell könnyen szétesik.

A tervezőrendszerek fejlesztésének egy másik irányaként az ún. **explicit modellező rendszerek** jöttek létre. Az iparban jelentős szerepet nem tudtak/tudnak betölteni a modelltörténet alapú rendszerekhez képest.

Az explicit modellező rendszerek jellemzői:

- középpontban a modell áll, a modellt létrehozó lépések sorrendje elveszti a jelentőségét;
- a modell rugalmas, módosításkor nincs újraszámolás;
- a 30 – 50 %-kal kisebb fájl méret;
- más rendszerekből származó elemek viszonylag egyszerűen lekezelhetők.

Az explicit modellező rendszerek hátrányai:

- nincsenek alaksajátosságok;
- módosításkor a paraméterek használata korlátozott;
- a tervezési folyamat egyes lépései nehezen automatizálhatók.

A **szinkron modellezési technológia** a hagyományos és az explicit alapú modellezés előnyeit egyesíti. Ez a modellezés parametrikus, alakelem alapú modellezést tesz lehetővé a modelltörténet kötöttsége nélkül. Itt közvetlenül a modellel dolgozunk, a vázlat nem vezeti a modellt, így módosításkor nincs újraszámolás. A technológia intelligenciájának köszönhetően idegen modellekkel is úgy lehet dolgozni, mintha saját modellként készült volna.

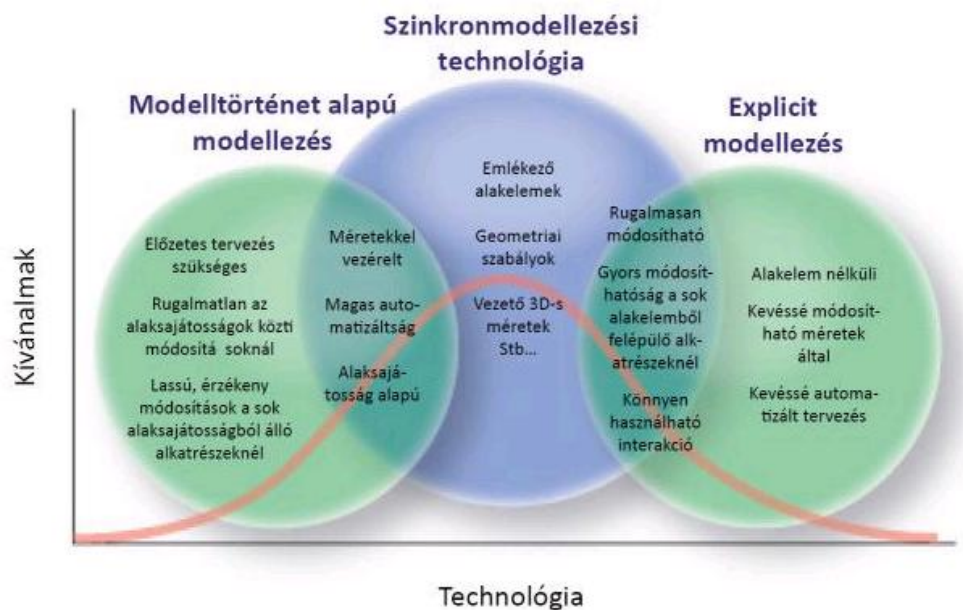
A szinkron modellező rendszerek jellemzői:

- a modell nem vázlatra épül;
- nincs modelltörténet;
- a modellt paraméterek vezérlik.

A szinkron modellező rendszerek előnyei a hagyományos technológiához viszonyítva:

- a modell módosítása nem igényli a modell felépítési sorrendjének ismeretét, ennek megfelelően a módosítás egyszerű ;
- multiCAD környezetben is könnyű használni;
- használata egyszerű, ezért általánosan használható eszközzé válhat.

A modelltörténet alapú, a szinkron modellezési technológia és az explicit modellezés egymáshoz való viszonyát a 4.33. ábra.



4.33. ábra. A különböző modellezési technológiák egymáshoz való viszonyai [3]

4.4. Irodalomjegyzék

- [1] Horváth I. – Juhász I.: Számítógéppel segített gépészeti tervezés. Műszaki könyvkiadó, Budapest, 1996.
- [2] Kunwoo Lee: Principles CAD/CAM/CAE Systems. Addison-Wesley, 1999.
- [3] Molnár L. – Váradi K.: CAD alapjai. Készült a Nemzeti Fejlesztési Terv HEFOP 3.3.1 Operatív Program keretében
- [4] <http://www.graphit.hu/velocity/solidedge/cikkek/szinkrontech.aspx>

5. ATTRIBUTÍV INFORMÁCIÓK ÉS MÉRNÖKI SZÁMÍTÁSOK

**Szerző:
Papp Olivér**

Az attributív információk lényegében egy Windows alapú fájl jellemzőit jelentik. Ezek segítik azonosítani, osztályozni és csoportosítani az adott fájlt. Például egy informatív megnevezés, a szerző neve, a tárgy, és kulcsszavak vagy egyéb fontos információk egy fájlban belül. Ezen információk alapján kereshetők is az egyes fájlok. A 3D-s tervező szoftverek mind adnak extra információkat az alkatrészekhez, összeállításokhoz és rajzokhoz. A hozzáadható információk egy része automatikusan hozzáadódik a fájlokhoz, illetve egyedi attribútumokkal is bővíthetők.

Ezeket a fájl jellemzőket, attribútumokat szokták még meta adatnak (metadata) is hívni.

A fájl jellemzők több osztályba sorolhatók.

Automatikus

Az automatikus jellemzőket az alkalmazás hozza létre a fájlok mentésekor. Ezek tartalmazzák azokat a jellemzőket melyek a létrehozás dátumára, utolsó módosítás idejére és a fájl méretére vonatkoznak.

Előre definiált

Az elődefiniált jellemzők már léteznek az alkatrész elkészítésekor is, de a felhasználónak kell megadni a pontos értékét. Ezek a jellemzők általában egy külső – módosítható, szöveges – fájlban vannak felsorolva és az alkatrész/összeállítás sablonban definiáljuk őket. Az elődefiniált jellemző típusa lehet szöveg, dátum, igen/nem és szám érték.

Egyedi

Egyedi jellemzőket a felhasználó hoz létre és a teljes dokumentumra érvényes értékeket tartalmaz.

Konfiguráció függő

Az ilyen típusú jellemzők értékei hasonlóan az előző osztályokhoz, többfajta is lehet, azonban hatóköre csak az egyes konfigurációkra terjed ki.

Számos egyedi attribútum van, melyek automatikusan frissülnek az alkatrész/összeállítás változásakor. Ezek közé tartozik az alkatrészek tömegét vagy anyagát tartalmazó jellemzők.

5.1. Tipikus információk

Gépészeti szempontból a leggyakoribb attributív információk a következők:

Rajzszám, megnevezés, anyag, tömeg, rajzolta, ellenőrizte, jóváhagyta, dátum, felületkezelés, megjegyzés, revízió, stb...

Mindezen információk megadása az alkatrészen rendkívül fontos és kettős szerepet tölt be. Segítségükkel az alkatrész 3D-s modellje minden információt tartalmaz, mely alapján azonosítható és gyártható az adott alkatrész. Másrészt a gyártási dokumentáció és a műhelyrajz el-



5.1. ábra. Fájl attributív információk

készítéskor rengeteg időt és energiát spórol meg, mivel ezek a fájl jellemzők a rajz szövegmezőjébe és darabjegyzék táblázatába automatikusan bekerülnek.

5.1.1. Fájl attribútumok használata

A fájl jellemzők számos módon felhasználhatók.

Alkatrészek, összeállítások és rajzok

A fájl jellemzők használhatók parametrikus feliratok készítésére. Rajzi feliratok, melyek hozzá vannak csatolva egy fájl jellemzőihez automatikusan frissülnek amikor az értékek változnak.

Összeállítások

Hatékony kiválasztás és alkarész rejtés/mutatás végezhető a fájl jellemzők segítségével. Például ha egyszerre akarjuk elrejtetni/megmutatni az összes kötőelemet vagy kereskedelmi árut az adott összeállításból. Kikeresni az összes alkatrészt, amelyet egy adott tervező készített vagy anyag alapján csoportosítani az alkatrészeket.

Műhelyrajzok

A fájl jellemzők segítségével tölthetjük ki automatikusan a rajzlap szövegmezőjét, az alkatrészjegyzéket, revíziós blokkot és a feliratokat, gyártási megjegyzéseket.

5.1.2. Egyedi információ beviteli ablak készítése

A fájl jellemzők létrehozhatók közvetlen a fájlban, vagy a 3D-s tervező rendszerben meghatározott módszerekkel.

Közvetlen megközelítés

A fájl jellemzőket a felhasználó közvetlenül a fájlban hozza létre. A Windows explorer vagy egyéb fájlkezelő program segítségével.

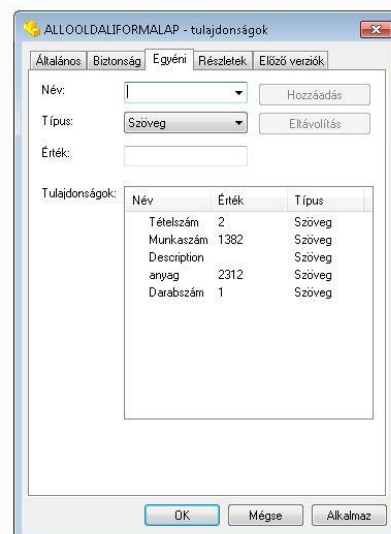
Lépései: Jobb kattintás egy fájlra – Tulajdonságok/Properties

Egyéni fülre kattintva egy legördülő menüből lehet választani vagy közvetlenül bevinni adatokat. A részletek fülre kattintva a fájl további attribútumai olvashatók.

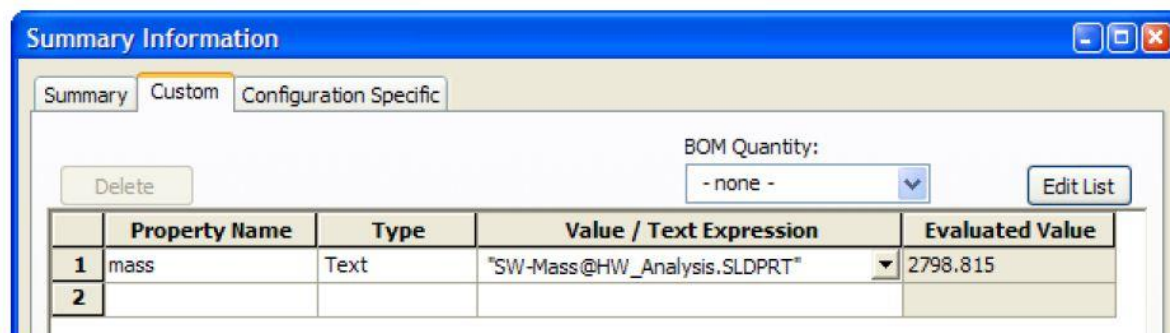
(Megjegyzés: Ezt a megközelítést nem szokták használni.)

Egyedi jellemző fül

A File menüpontra kattintva egy 3D-s tervező rendszerben, lehetőség nyílik a fájl jellemzőinek módosítására, illetve bővítésére. Ezen ablakon keresztül lehet megadni az alkatrész/összeállítás egyedi attribútumait. Itt lehet választani a közvetlen kézi bevitel vagy az előre definiált listák használata közül.



5.2. ábra. Egyedi attributív információk



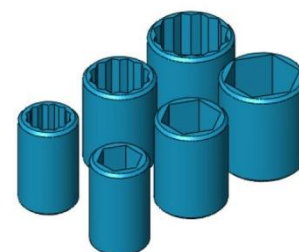
5.3. ábra. Tömeg jellemzők megadása mint egyedi fájl jellemző

Tervezői táblák /táblázat használata

Alkatrész család készítésekor használható ún. tervezői táblázat is, mely többek között alkalmas az alkatrészhez (és annak konfigurációihoz) egyedi attribútumokat rendelni.

PDM / PLM rendszer használata

A PDM (Product Data Management) termék adat kezelő rendszer, mely segítségével a 3D-s tervező rendszer képes egy központi serveren tárolni és csoportosítani az adatokat. Ennek segítségével nyílik igazán lehetőség csoportmunkát végezni. Az alkatrészek/összeállítások szerverre másolásakor a rendszer automatikusan attribútumokkal bővíti a fájlokat. Ilyen adatok lehetnek: sorszám, státusz, megnevezés, projekt neve, revízió. A PDM beállítható, hogy egyedi – a rendszergazda által meghatározott – változókkal is bővítse a fájlokat.



5.4 ábra. Termékcsalád

5.1.3. Alkatrészhez rendelt információk kinyerése

A két legelterjedtebb példa egy 3D-s alkatrész attributív információinak kinyerésére az alkatrésztől készített műhelyrajt szövegmezője és az alkatrésztől készített darabjegyzék táblázat. Mind a szövegmező, mind a darabjegyzék táblázat a Csatolás tulajdonsághoz parancs (vagy ennek megfelelője) segítségével nyeri ki és tünteti fel az alkatrészben tárolt adatokat.

Tervező:	Gyártmány:	Méret arány:	EUROCAD Kft.
Pappo	CAD Alapjai	1:1	
Dátum:	Megnevezés:	Vet.mód:	Rajzsám:
2010. november 7.	Távtartó		SW-100-001
Ellenőrizte:	Anyag:	Tömeg:	Filenév: SW-100-001.sldprt
M.L.	1.400 (X6Cr13)	0.4 kg.	

Egy előre jól elkészített műhelyrajzi sablon naponta akár egy órányi munkát is megspórol a tervező számára. Az 5.5 ábrán a késsel jelölt információ automatikusan kitöltődik a rajzlapon, a modell beillesztésekor.

5.4. ábra. Automatikusan kitöltődő szövegmező

5.2. Intelligens sajátosság katalógus áttekintése

Az intelligens sajátosság katalógus vagy más néven könyvtárművelet egy olyan sűrűn használt művelet vagy műveletek kombinációja, melyet egyszer létrehozunk és elmentjük a könyvtárba későbbi felhasználás céljából. A legtöbb művelettípust támogatják a programok bizonyos korlátozásokkal.

A könyvtárműveletek általában az alpművelethez adott műveletből állnak, és nem maga az alpművelet. Mivel nem lehet két alpművelet egyetlen modellben, nem illeszthetünk be alpműveletet tartalmazó könyvtárműveletet olyan modellbe, amely már tartalmaz egy alpműveletet. Azonban létrehozhatunk olyan könyvtárműveletet, mely tartalmazza az alpműveletet és beilleszthetjük egy üres modellbe.

A felhasználó létrehozhat általánosan használt műveleteket, például, furatokat, hornyokat és elmentheti őket könyvtárműveletként. Számos könyvtárműveletet használhatunk építőelemként egyetlen modellhez. Ezzel idő takarítható meg és segíti a modellek konzisztenciáját biztosítani.

5.2.1. Általános jellemzők

A könyvtárműveletekkel az alábbiak bármelyikét elvégezhetjük:

- A konfiguráció kiválasztása a könyvtárművelet, modellbe történő beillesztése során.
- A szülő modellre mutató hivatkozás felvétele.
- Szerkesztés a konfigurációk váltásával, más pozíció választásával stb.
- Leírások hozzáadása a referenciákhoz a könyvtárművelet mentésekor.
- Rajzjelek hozzáadása a könyvtárművelethez, és azok beillesztése a modellbe a könyvtárművelettel együtt.

(Amikor rajzjelet illesztünk be egy könyvtárműveletbe, akkor vagy magának a rajzjelenek, vagy a mutatónak érintenie kell a művelettel elmentendő műveletet.)

- Csavarvonal tárolása könyvtárműveletként.
- Vázlat irányának váltása a könyvtárművelet beillesztése során, az irányt mutató nyílra történő kattintással a grafikus területen.
- A könyvtárműveletben megadott vizuális jellemzők, pl. mintázatok, átvitele a beillesztett műveletekre.

5.2.2. Tervezési könyvtár

A Tervezési könyvtár mappákat tartalmaz, melyekben újra használható elemek, például rajzjelek, összeállítások, és formázó eszközök találhatók. A Tervezési könyvtár az összes könyvtárműveletet kezeli, beleértve az alábbiakat is:

- A könyvtárműveletek és almappák megjelenítése, melyek könyvtárműveleteket tartalmaznak.
- Könyvtárművelet modellek elő nézete.
- Könyvtárművelet beillesztése egy modell felületelemébe vagy egy síkba a grafikus területen.

A Tervezési könyvtár az alábbi helyen található:

5.2.3. Könyvtárművelet létrehozása

Könyvtárművelet létrehozásához először létre kell hozni egy alpműveletet, melyhez a tervező hozzáadja a könyvtárműveletben szerepeltetni kívánt műveleteket. A könyvtárműveletek általában külön fájltypusként vannak mentve. A könyvtárművelet felépítésének módja befolyásolja azt, hogyan végzi el az alábbiakat:

- A könyvtárművelet **pozicionálása** a modellen.
- A könyvtárművelet pozíciójának **szerkesztése**.

A könyvtárművelet építése során eldönthetjük, hogy belevesszük vagy kizárjuk a referenciákat.

5.2.3.1. Referenciák

A **referenciákat** tartalmazó könyvtárművelet létrehozásához méretezni kell a könyvtárműveletet az alapmodellhez viszonyítva, melyen létrehoztuk. A referenciák méreteket hoznak létre, melyek **pozicionálják** a könyvtárműveleteket a modellen.

A felületelem referenciákkal, pl. lekerekítéssel rendelkező könyvtárműveleteknek nem kellene referenciáméretük.

Létrehozhatunk referenciákat kapcsolatok használatával is. Például, ha egy ív középpontját vízszintesen, függőlegesen vagy egybeesően igazítjuk a vázlat origóhoz, egy referencia jön létre.

5.2.3.2. Hely

Referenciák nélküli könyvtárművelet létrehozásához, hozzunk létre a könyvtárműveletet az alapmodellhez viszonyított méretek vagy kapcsolatok nélkül. A könyvtárművelet pozicionálására használt referenciák helyett a könyvtárművelet vázlatát szerkeszti és ezt a vázlatot pozicionálja a modellhez viszonyítva.

Nem hozható létre könyvtárművelet modell többtestű modell dokumentumból.

Könyvtárművelet létrehozása:

1. Nyissunk meg egy új modellt, és rajzoljunk egy vázlatot és abból hozzunk létre egy alpműveletet.
2. Hozzuk létre a műveleteket, melyeket bele kívánunk venni a könyvtárműveletbe.

Amikor létrehoztuk a modellt, mely több kihúzott műveletet tartalmaz, és amelyeket könyvtárműveletként kívánunk elmenteni, győződjünk meg róla, hogy az **Eredmény összefűzése** opció ki van választva. Ez biztosítja, hogy valamennyi művelet bevonásra kerül, amikor a könyvtárműveletet a modellre vonsozljuk.

3. Határozzuk meg, a könyvtárművelet pozícióját, amikor azt a modellhez adjuk:

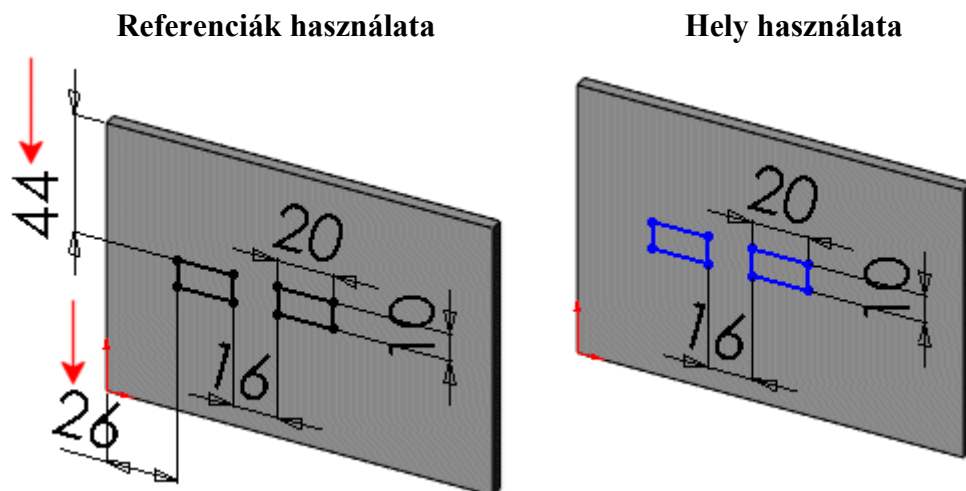
Hivatkozások. A műveletek méretezése a bázishoz.

- vagy -



5.5 ábra. Tervezői könyvtár

Hely. A műveletek és a bázis közötti méret vagy kapcsolatok kizárása.



5.6. ábra. Könyvtár műveletek megadása

4. A műveletek létrehozása után adjunk hozzá további konfigurációkat.
5. Zárjuk be a vázlatot és végezzük el az alábbiakat:
 1. Kattintsunk a **Tervezési könyvtár** fülre a Feladat táblán.
 2. Válasszuk ki a Tervezési könyvtár fület.
 3. Válasszuk ki a mappát, ahová a könyvtárműveletet szeretnénk adni.
 4. A Műveletkezelő tervezési fában válasszuk ki azokat a műveleteket, melyeket könyvtárműveletként akarunk elmenteni.

Az alapműveletet ne vegyük bele mint a könyvtárművelet része. Ha bele vesszük az alapműveletet, az alap a könyvtárművelet része lesz, amikor ráhúzzuk a modellre.

 5. Tartsuk lenyomva a **Ctrl** billentyűt, és húzzuk át a műveleteket a Feladat tábla alsó paneljére.

Néhány művelet kivonása újraépítési hibákat okozhat a könyvtárművelet modellben a megoldatlan függőségek miatt.

- 6. A **Mentés másként** párbeszédablakban adjuk meg a nevet és (opcionálisan) az alábbiak valamelyikét:
 - a. Adjunk meg egy leírást.
 - b. Válasszuk a **Mentés másolatként** opciót.
 - c. Kattintsunk a **Referenciák** gombra, hogy megjelenjen a **Mentés másként referenciákkal** párbeszédablak.
- 7. Kattintsunk a **Mentés** gombra.

5.3. Programok szolgáltatotta mérnöki számítások

A 3D-s tervező rendszerek nem csak a modellezésben és térbeli megjelenítésben tudják megkönnyíteni a tervező mérnökök munkáját, hanem a méretezésben és mérnöki számításokban is.

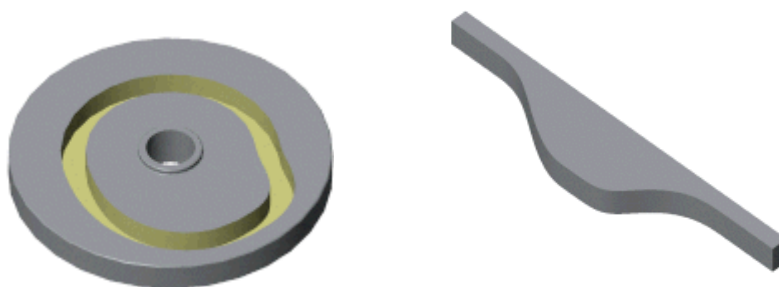
A legelterjedtebb modulok a mérnöki számítások közül:

- Cam-es szerszámpályák tervezése.
- Szabványos hornyok beillesztése
- Tartószerkezet számítás
- Csapágy méretezés
- Szabványos tartóelem beillesztés
- Falvastagság analízis
- Fogaskerék / Fogasléc tervezés

5.3.1. CAM-es szerszámpálya tervezés

Segítségével teljesen definiált mozgás útvonallal rendelkező cam pályát és követőjét tervezhetjük meg.

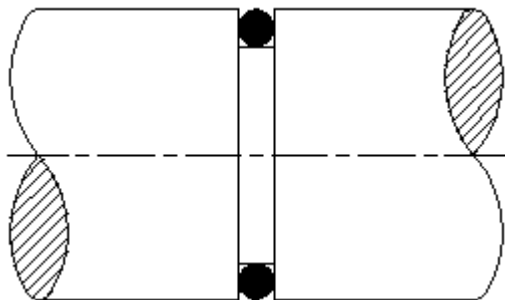
Választhatunk köríves vagy lineáris típusból, továbbá számos mozgás változatból. Kiválaszthatjuk a követő pálya típusát. (Teljesen keresztül vágott, vagy zsebes.)



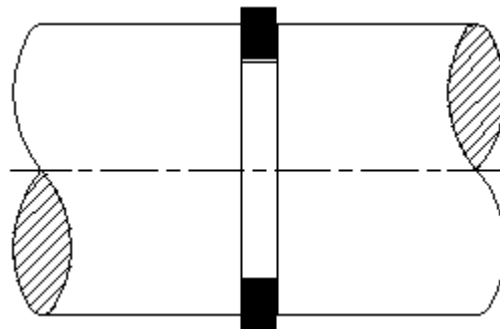
5.7. ábra. Köríves és lineáris pálya

5.3.2. Horony

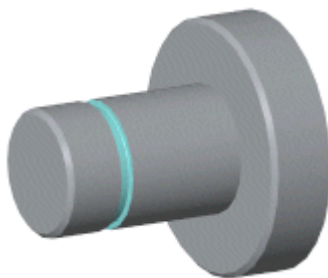
Tengelyekre illetve henger szimmetrikus alkatrészekre lehet vele ipari szabványos O-gyűrűkre vagy biztosító gyűrűkre méretezett hornyokat illeszteni.



5.8. ábra. O-gyűrű horony



5.9 ábra. Seeger gyűrű tengelyen



5.10. ábra. 3D-s modell egy tengelyvégről

Az 5.5 ábrán világoskék színnel láthatjuk a kivágott területet.

5.3.3. Zártszelvények és tartószerkezetek szilárdsági méretezése

Lehajlási vagy feszültség számítási műveletek végezhetőek el ezzel a modullal szerkezeti idomok keresztmetszetére.

1. A Rúdelem méretezőben válasszuk ki a terhelés típusát.
2. A Számítás típusánál válasszunk a Lehajlás vagy a Feszültség közül.
Az adat beviteli mezők megjelenítik a kiválasztásunk jellemzőit.
3. Válasszunk ki egy rúdelemet:
4. Válasszunk egy Tengelyt, hogy meghatározzuk az inercia nyomaték értékét.
5. Gépeljük be a maradék beviteli mezőbe a hiányzó jellemzőket, kivéve azt az értéket amire méretezni szeretnénk, és kattintsunk a Megold gombra.

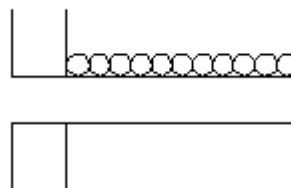
Például, ha a lehajlás mértékét szeretnénk megtudni, ellenőrizzük, hogy minden mező ki legyen töltve a lehajlás kivételével, mielőtt a Megold gombra kattintunk.

Terhelés típusa

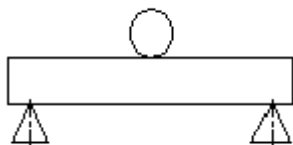
A számítás elvégzéséhez határozzuk meg a terhelés típusát. Egy csúszka segítségével a következő terhelés és megfogás típusokból választhatunk.



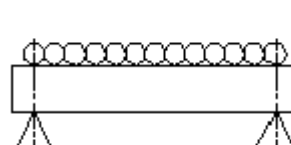
5.11. ábra. Fix befogás az egyik végén és terhelés a másikon.



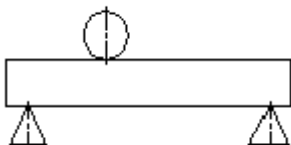
5.12. ábra. Megoszló terhelés és egyik végén fix megfogás.



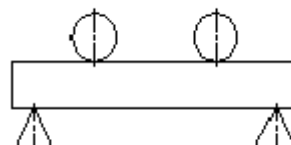
5.13. ábra. Két végén alátámasztva és közepén terhelve.



5.14. ábra. Két végén alátámasztva és megoszló terhelés.



5.15. ábra. Két végén alátámasztva és a terhelés adott távolságra a közepétől.



5.16. ábra. Két végén alátámasztva és két szimmetrikus terhelés.

Számítás típusa: Meghatározza, hogy lehajlási vagy feszültségi számítást végzünk. Az adat beviteli mezők a számítás típusának megfelelően változnak.

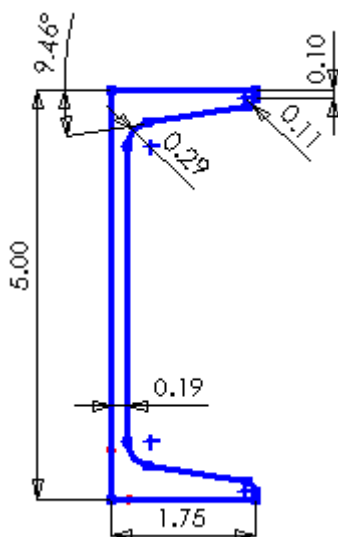
5.3.4. Csapágy méretező kalkulátor

A kalkulátorral lehetőségünk nyílik csapágy terhelhetőségi és egyszerű élettartam számítások elvégzésére.

1. Válasszuk ki a Csapágy méretezőben egy szabványt, a csapágy típusát és egy elérhető csapagyat.
2. Válasszuk ki a mértékegységet, amiben az eredményeket kapcsni szeretnénk.
3. A Megbíthatóság alatt válasszunk egy hibaszázalékot.
4. Kapacitás alatt válasszuk azt hogy Számolva vagy azt hogy Névleges (ha ismerjük a kapacitást).
 - Ha a Számolva-t választottuk, fogadjuk el az alapértékeket vagy gépeljük be a Golyókmszámát, átmérőjét (vagy Görgők számát és átmérőjét), és kattintsunk a számolás gombra.
 - Ha a Névlegest választottuk adjunk meg a kapacitás értékét.
5. Egyenértékű terhelésnél, adjuk meg a terhelés értékét a kombinált sugár és tengely irányú csapágy terhelésekre.
6. Sebességre adjuk meg a percenkénti fordulatszámot.
7. Végül kattintsunk az élettartam számításra.

A csapágy kalkulátor fordulatonkénti élettartalmat vizsgál (több milliónyi fordulatra értelmezve) és az élettartam órákban kifejezve.

5.3.5. Szabványos szerkezet idom hozzáadása alkatrészhez



A szabványos tartószerkezetek méretei kötöttek, melyeket nem a tervezőnek kell újra és újra megrajzolni. Ezzel a tervezést segítő eszközzel bármilyen alkatrészbe be tudunk illeszteni egy szerkezeti elem keresztmetszetének méretezett vázlatát. A méreteket a szabványnak megfelelő katalógusból tölti fel a rendszer és teljesen definiált. A beillesztés után egy kihúzás paranccsal lehet testté alakítani a vázlatot.

1. A párbeszéd ablakban válasszuk ki a szabványt, a rúd elem típusát és a keresztmetszetet a betekintő ablak képe alapján.

Az alkatrész jellemzői a választásunknak megfelelően frissülnek.

5.17. ábra. Szabványos szerkezeti idom

5.3.6. Falvastagság analízis

Az alkatrészünk falvastagságának ellenőrzésére használjuk a falvastagság analízis számoló eszközt. Különösen műanyag fröccsöntött alkatrészek vagy vékony falú öntvények tervezésénél lehet hasznos, amikor kerülni szeretnénk a hirtelen falvastagság változást.

A következőkre használhatjuk a falvastagság analízist:

- Azonosítani a vastag és vékony területeket egy alkatrészen belül (különösen műanyag alkatrészeknél és öntvényeknél)
- Adott vastagságú felületek azonosítására
- Potenciálisan veszélyes vagy tönkremenetel szempontjából kényes régiók és tervezői hibák kiszűrésére
- Öntvények és fröccsöntött alkatrészek tervezési támogatására

5.4. Interneten található gyártói katalógusok

Ahogy az iparban és a hétköznapi életben egyre elterjedtebbé váltak a 3D-s tervező rendszerek, a tervező mérnökökben megszületett az igény, hogy a kereskedelmi forgalomban kapható alkatrészeket összeállításokat az internetről letöltve tudják beilleszteni terveikbe. Kezdetben a cégek saját erőből, termék katalógusaik mellé CD-n adták a 3D-s modelleket, melyeket egyre inkább kivált az internetről letölthető ingyenes vagy fizetős tartalmak.

Mára több vállalkozás is arra szakosodott, hogy egy-egy vállalat kereskedelmi forgalomban kapható termékeit (melyek beépíthetők célgépekbe) lemodellezze 3D-ben és közzé tegye azt weboldalán.

Néhány példa az így elérhető modellek közül: SKF csapágyak, alumínium profilok, hűtőbordák, kapcsolók, görgők és kerekek, szivattyúk és motorok százai...

Mára az interneten elérhető 3D-s modellek száma több millió.

Európában a következő weboldalakon lehet találni letölthető 3D-s modelleket.:

- 3dcontentcentral.com
- part-solution.com
- skf.com

5.4.1. 3D ContentCentral

A 3D ContentCentral[®] egy ingyenes tároló, konfiguráló és letöltő tartalom központ 3D-s modellek, alkatrészek, összeállítások, 2D-s blokkok, könyvtári műveletek és makrók számára.

Mára több mint fél millió regisztrált felhasználóval ez a legnagyobb online 3D-s közösség. A csatlakozáshoz egy egyszerű e-mailes regisztráció szükséges, s ezek után már le is tudjuk tölteni az általunk kiválasztott modelleket. A tartalomközpontba bárki feltöltheti a saját modelljeit is, így biztosítva, hogy folyamatosan bővüljön az elérhető alkatrészek száma.

• Önkiszolgáló katalógus feltöltés

Beszállítói szolgáltatásként az ipari alkatrészek és beszállítók is ingyenesen tölthetik fel a 3Dcontentcentrálba az alkatrészeiket. Számukra további eszközöket is biztosít a weboldal, hogy naprakész információt tudjanak nyújtani a tervező mérnökök számára. Mára számos 3d-s tervező program közvetlen feltöltési lehetőséget nyújt a tárhelyre.

5.5. Tervezői elemtár

A tervezői elemtár vagy más néven Toolbox egy szabványos kötőelem könyvtár. A könyvtár segítségével már előre elkészített elemeket – szabványos alkatrészeket - használhat fel összeállításában.

A tervezői elemtár a 3D-s tervező rendszerrel együtt kerül telepítésre, s lehetőséget biztosít a felhasználó számára, hogy a kereskedelmi forgalomban kapható rögzítő elemeket (csavarokat, anyákat, alátéteket, stb...) pár kattintással beillessze az összeállításába.

A beillesztés történhet manuálisan, illetve automatikus furat-kötőelem pár felismertetéssel.

Mauálisan

A tervezői elemtárból kiválasztva a megfelelő kötőelemet, az egér bal gombjának nyomva tartása közben húzza be az összeállításba. A megfelelő furat felett engedje el az egér gombját. A szabványos alkatrészek úgy vannak kialakítva, hogy a beillesztve az összeállításba automatikusan egybeeső és koncentrikus kényszerekkel kapcsolódni fognak az alattuk lévő alkatrészekhez. (Ilyen automatikusan kapcsolódó kényszereket a saját elemtár alkatrészekhez mi is adhatunk)

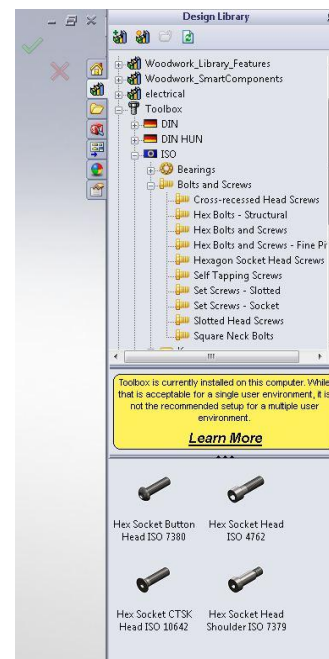
Automatikusan (Gyors kötőelem beillesztés)

Amikor egy alkatrészen létrehozunk egy furatot, a furat szabványos méreteit a rendszer egy táblázatból olvassa ki. Ugyanezt a táblázatot használhatja arra is, hogy csavar típusokat rendel hozzá a különböző típusú furatokhoz. Ha a rendszer ismeri az így definiált furat-kötőelem párokat, a Gyors kötőelem parancsra kattintva, automatikusan feltölti kötőelemekkel az összeállításban kiválasztott furatokat.

A Gyors Kötőelemek tartalmaznak egy MateReferences csatlakozási beállítást, mely tartalmaz két előre beállított kényszer kapcsolatot. Az előre beállított kényszer kapcsolatok segítségével a csavar a furatba tud illeszkedni. Ez egyik kényszer a **Koncentrikus**, mely a furat és a csavar illesztésének egy tengelyűségéért felelős. Valamint az **Egybeeső**, mely a csavar feje és a furat felületének illeszkedéséért felelős, így a csavar a furatba csatlakozásnál teljesen fel-fekszik. Ilyen előre beállított kapcsolódásokat Mi is készíthetünk az alkatrészeinkre.

A Tervezői Elemtár több könyvtárnyi szabványos alkatrészt tartalmaz, melyek teljes egészében integráltak a 3D-s tervező rendszerünkbe. A felhasználónak csak annyi a dolga, hogy kiválasztja az alkatrészt amit be akar illeszteni, és jobb oldalról az egér bal gombjának nyomva tartása közben bevonszolja az összeállításba.

Az elemtár alkatrészei testre szabhatóak, ezáltal nyílik lehetőség, hogy minden tervező a cégénél rendszerben lévő szabványok alapján tudjon dolgozni. Az eszköztár bővíthető is, mind a már



meglévő alkatrészek további méretekké láthatók el, mind teljesen egyedi alkatrészeket is adhatunk a könyvtárhoz. Ezáltal könnyen elérhetővé válnak a cégünkben leggyakrabban használt szabványos alkatrészek.

A tervezői elemtár tartalmaz egy fő alkatrész fájlt – a szabványos méretekké – és egy adatbázist (SWBrowser.mdb) az alkatrészek méretével és konfigurációs adataival. Amikor egy szabványos alkatrészből új méretű darabot illesztünk be az összeállításba, a tervezői elemtár frissíti a fő alkatrész fájlt és hozzáad egy új konfigurációt az általunk kiválasztott méretekké.

A tervezői elemtár, illetve a Toolbox támogatja a nemzetközi szabványokat, beleértve az: ANSI, AS, BSI, CISC, DIN, GB, ISO, IS, JIS, és KS szabványt. Továbbá a következő típusú alkatrészeket tartalmazza:

- Csapágyak
- Csavarok
- Cams
- Fogaskerekek
- Jig bushings
- Anyák
- PEM[®] alkatrészek
- Tű
- Biztosító gyűrűk
- Sprockets
- Szerkezeti idomok alumínium és acél
- Szíjak
- Unistrut[®]
- Alátétek

1. Intelligens sajátosság katalógus használatának előnyei (példák)
2. Egyszerű sajátosság elkészítése
3. Programok szolgáltatása mérnöki számítások (rövid felsorolás a ma elérhető „kalkulátorokból”) (tengely, csapágy, fogaskerék, stb..)
4. Szabványos alkatrészek (gyakorlati használat, alkalmazásuk, különbség köztük és a saját alkatrészek között) és rövid leírás az interneten található gyártói katalógusokról. (PartSolution, 3dcontentcentral, SKF, stb...)
5. Saját elemtár készítése
6. Elemtárba szánt alkatrész és termékcsalád elkészítése, illetve attributív információk megadása egy interneten található gyártói katalógus alapján.

6. LEMEZALKATRÉSZEK MODELLEZÉSE

Szerző:
Madarász István

TARTALOMJEGYZÉK

1.	LEMEZALKATRÉSZEK TERVEZÉSI SAJÁTOSSÁGAI	117
1.1.	Alapfogalmak bevezetése	117
1.2.	Lemezalkatrésszel kapcsolatos alapbeállítások	118
1.3.	Technológiai helyes lemezalkatrész tervezés	119
1.4.	Lemezalkatrésznél használatos alaksajátosságok	119
1.4.1.	Hajlítás jellegű alaksajátosságok.....	119
1.4.2.	Mélyhúzás jellegű alaksajátosságok.....	122
1.4.3.	Technológiai alaksajátosságok.....	122
1.5.	Alkatrészváltozók és kezelésük	123
2.	LEMEZALKATRÉSZEK TERÍTÉKKÉPZÉSE	124
2.1.	Terítékszámítás alapjai.....	124
2.2.	Semleges szál tényező jelentősége.....	126
2.2.1.	Elhanyagolásából eredő hibák.....	126
2.2.2.	Semleges szál tényező meghatározása	127
2.3.	Teríték méretezése	127
2.4.	Kimeneti adatformátumok	128
3.	LEMEZALKATRÉSZEK TERVEZÉSE A GYAKORLATBAN	129
3.1.	Gyártói adatszolgáltatás és jelentősége.....	129
3.2.	Megrendelői adatszolgáltatás és jelentősége	129
3.3.	Lemezalkatrészek speciális kötőelemei	129
3.4.	Tervezési javaslatok a gazdaságos összeállításért	130

1. LEMEZALKATRÉSZEK TERVEZÉSI SAJÁTOSSÁGAI

A lemezalkatrészek tervezése speciális felkészültséget és gondolkodásmódot igényel a mérnöktől, hiszen ez esetben az alkatrészmodellezéshez szükséges technikák ill. tervezési stratégiák csak kis mértékben használhatók fel. Az iparban elterjedt, lemezalkatrészek tervezésére szolgáló szoftverek szinte azonos alapelvek mentén működnek, nevezetesen a lemezek megmunkálásához szükséges technológiai lépések megfeleltethetők egy-egy tervezési lépésnek.

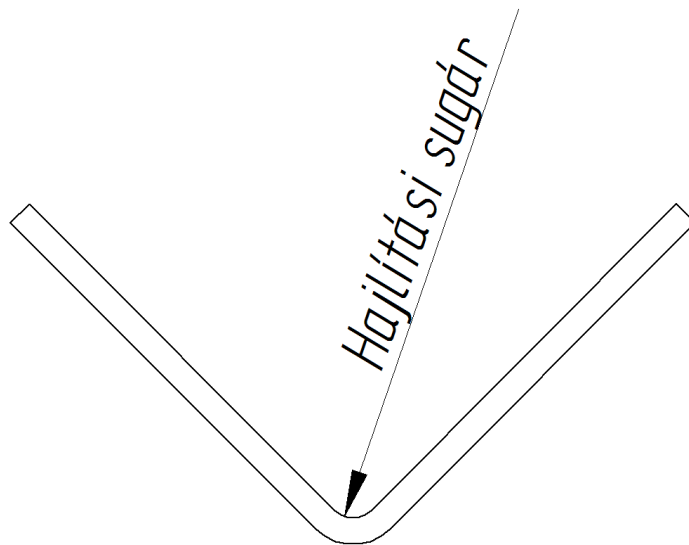
Fentieket összefoglalva: míg alkatrészmodellezéskor a tervező a szoftver által biztosított eszközökkel – különféle korábban már tárgyalt stratégiák mentén – a gyártási technológiától függetlenül dolgozhat, addig lemezalkatrészek tervezésekor a rendelkezésére álló – alkatrészmodellezéshez képest szűkös – lehetőségek rákényszerítik a technológiahelyes tervezésre.

1.1. Alapfogalmak bevezetése

A lemezalkatrészekre vonatkozó tervezési lehetőségek tárgyalása előtt szükséges néhány alapfogalom bevezetése és egyértelmű definiálása.

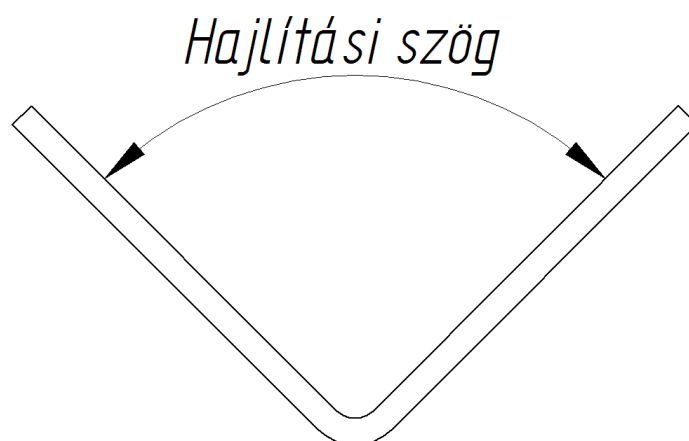
Lemezvastagság: talán a legkönnyebben érthető fogalom, mely a megmunkálandó lemez vastagságát adja meg mm-ben. Egy adott alkatrészen belül a lemezvastagságnak állandónak kell maradnia!

Hajlítási sugár: a meghajlított lemez hajlítási élén mérhető belső rádiusz, gyakorlatilag megegyezik a hajlító szerszám élének lekerekítési sugarával (1. ábra).



6.1. ábra. Hajlítási sugár

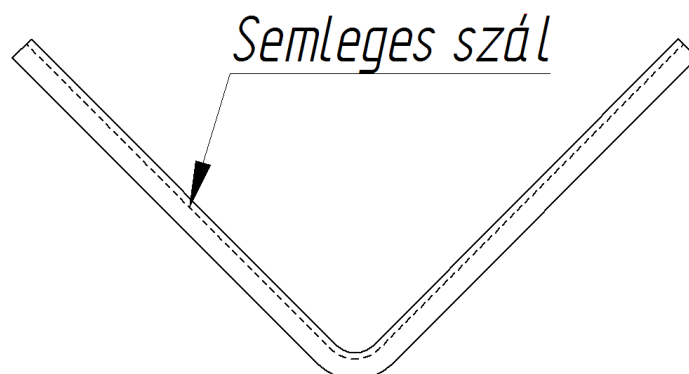
Hajlítási szög: a meghajlított lemez síkjai közt mérhető szög, értéke mindig kisebb mint 180° . Hajlítási szög alatt mindig a valós szög értendő, tehát még tompa szögű hajlításnál sem adható meg a hajlítás kiegészítő szöge (2. ábra).



6.2. ábra. Hajlítási szög

Semleges szál: a lemez keresztmetszetének azon rétege, melynek hossza nem változik a hajlítási művelet során.

Semleges szál tényező: arányszám, mely a semleges szálnak, a hajlítási sugár által megadott felületétől mért távolsága, és a lemez vastagságának a hányadosa (3. ábra).



6.3. ábra. Semleges szál

1.2. Lemezalkatrésszel kapcsolatos alapbeállítások

Új lemezalkatrész tervezésekor az első és legfontosabb lépés az adott alkatrésze vonatkozó anyag- és technológiaspecifikus alapbeállítások megadása. Ezek a következőkben foglalhatóak össze:

- lemezvastagság megadása,
- alapértelmezett hajlítási sugár megadása,
- semleges szál tényező megadása,
- felmerülő igény esetén egyedi terítékszámítási algoritmus megadása.

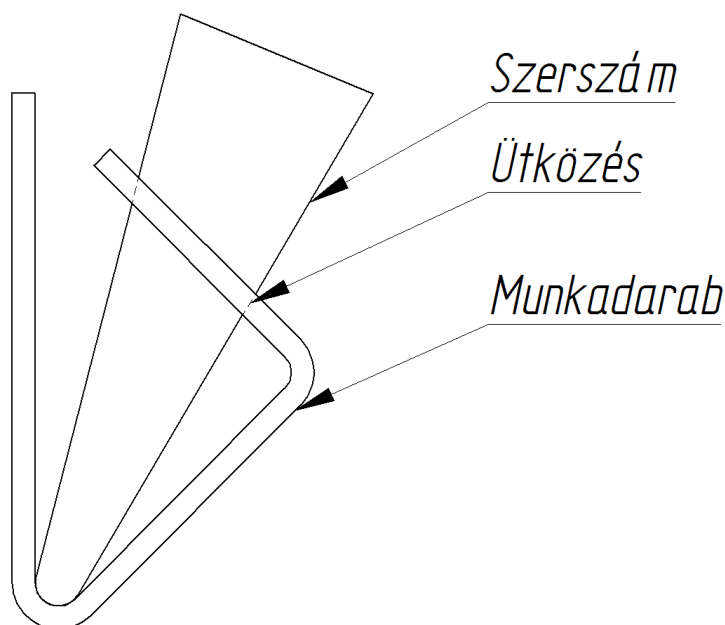
Az alapadatok megadásának elmulasztása, ill. nem kellően pontos megadása miatt előforduló gyakori hibák:

- tervezési ellentmondások,
- gyártási nehézségek,
- selejtgyártás.

1.3. Technológiailag helyes lemezalkatrész tervezés

A lemezalkatrészek tervezésekor szükséges figyelembe venni néhány olyan szempontot, melyek a lemezalakítási technológiákból adódnak.

Az egyik leggyakoribb hiba szokott lenni a 360 fokot közelítő hajlítási sor, melynél a hajlítási szerszám nem fér be az alkatrész belsejébe (4. ábra).



6.4. ábra. Szerszám ütközés

Ezen felül érdemes figyelni a választott technológia által biztosított legkisebb hajlítási szögére, valamint arra, hogy a lemezmegmunkálás pontossága kb. az 1mm nagyságrendjébe esik, mindezek miatt a nagyon összetett hajlításokat célszerű lehet több különböző hajlításból összeállítani.

1.4. Lemezalkatrésznél használatos alaksajátosságok

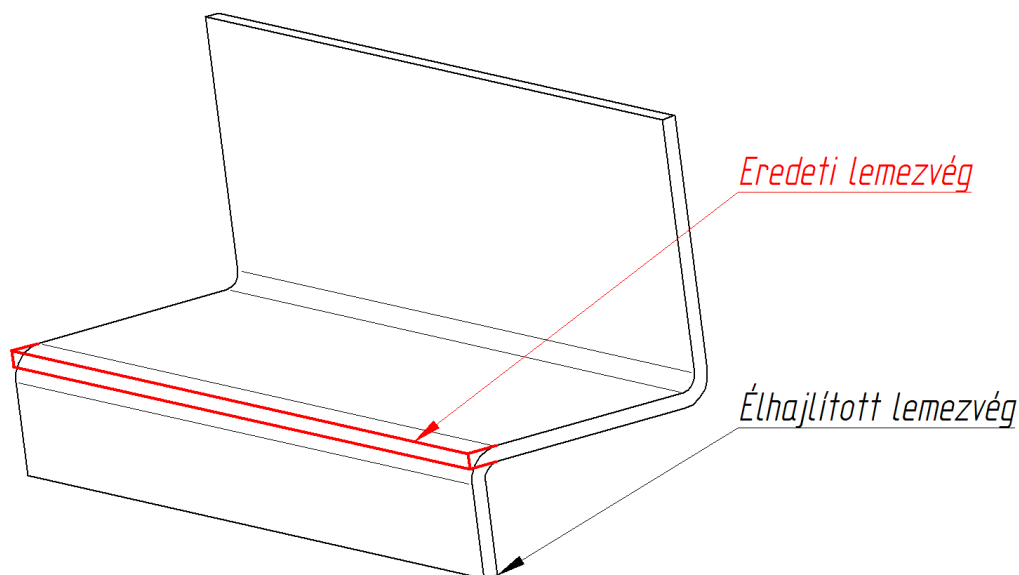
A lemezalkatrészek tervezésénél az előzőekben említett indokok miatt speciális tervezési lépésekre van szükség jelen fejezetben ezek vázlatos ismertetése történik.

1.4.1. Hajlítás jellegű alaksajátosságok

1.4.1.1. Élhajlítás

Az élhajlítás során meglévő lemeztáblából vagy részben elkészült alkatrészből történik az alaksajátosság létrehozása (5. ábra). Ezen hajlítás típusnál nincsen szükség vázlat (sketch) rajzolására, hanem a már elkészült modell egy élének kiválasztásával kezdődik a hajlítás elkészítése. Az élhajlítás során egyszerre csak egy hajlítás elkészítésére van lehetőség. Az él kiválasztása után lehetőség van beállítani a hajlítás összes paraméterét úgy mint:

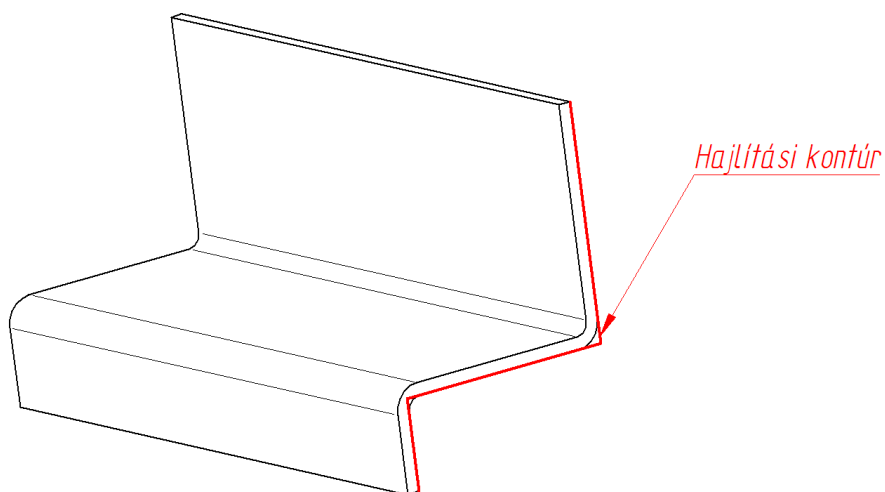
- hajlítás szöge
- hajlítás hossza
- hajlítás szélessége
- hajlítás helye
- hajlítás sugara (amennyiben eltérés szükséges az alapbeállításoktól)
- stb.



6.5. ábra. Élhajlítás

1.4.1.2. Kontúrhajlítás

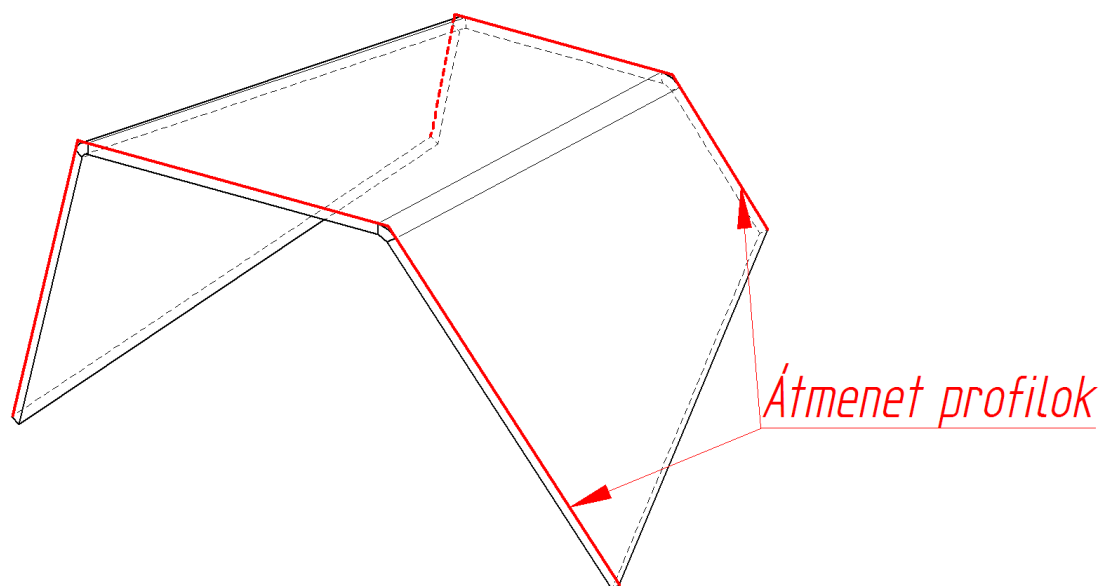
A kontúrhajlítás során szükség van vázlatrajzolásra, ugyanis itt a hajlítási élre merőleges síkon kell megrajzolni a hajlítás profilját (6. ábra). A kontúrhajlítás előnyei közé tartozik, hogy egy lépésben több hajlítás is elvégezhető, ugyanakkor az élhajlításhoz képest korlátozott beállítási lehetőségek vannak, hiszen nem lehet megadni a hajlítás helyét és összetett hajlításoknál figyelni kell a lemezvastagságra és a hajlítási sugarak elhelyezkedésére.



6.6. ábra: Kontúrhajlítás

1.4.1.3. Átmenet

Az átmenet parancs leginkább a kontúrhajlításhoz hasonlítható, ugyanis itt két egymással párhuzamos vagy szöget bezáró síkra rajzolt vázlatot lehet összekötni (7. ábra). Azért van szükség ezen külön parancsra, mert a kontúrhajlítás parancs segítségével csak a vázlat síkjára mérőleges és állandó profilú hajlításokat lehet készíteni.

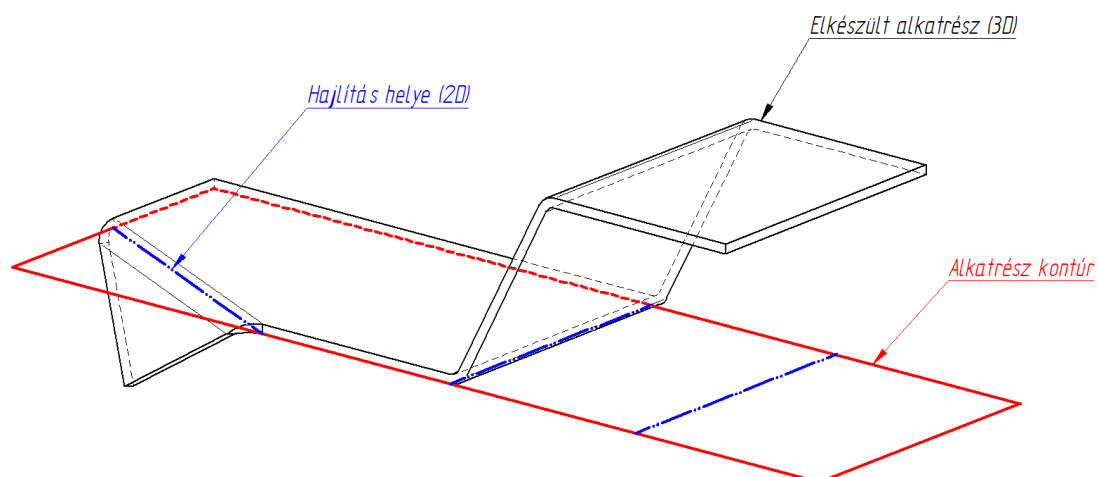


6.7. ábra. Átmenet

1.4.1.4. Hajlítás

A hajlítás parancs lehetőséget ad arra, hogy már meglévő 2D tervek alapján elkészíthető legyen az alkatrész 3D modellje (8. ábra).

A hajlítás során a meglévő alkatrész terítékének felhasználásával – teríték kontúrú lemeztáblából kiindulva – a bejelölt hajlítási középvonalak felhasználásával készíthető el a 3D modell.



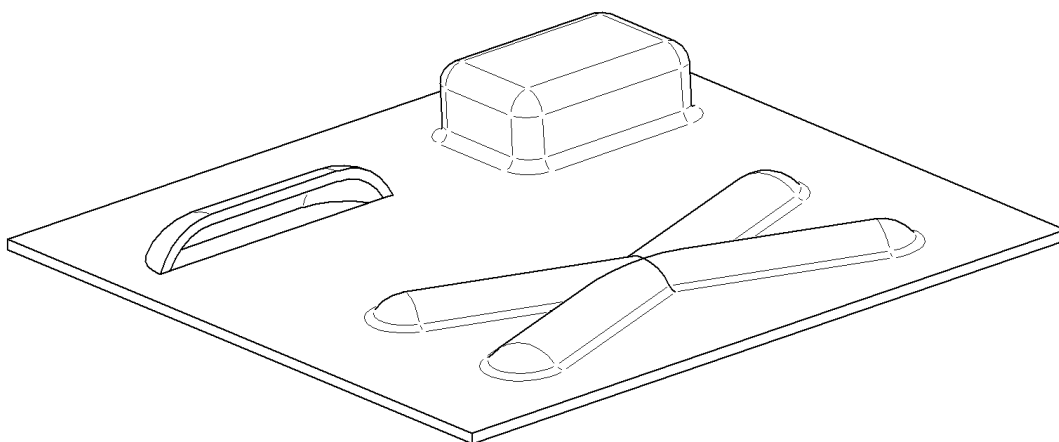
6.8. ábra. Hajlítás

1.4.2. Mélyhúzás jellegű alaksajátosságok

A mélyhúzás jellegű alaksajátosságok közé tartozik: mélyhúzás

- mélyhúzás
- kopoltyú
- merevítő borda
- stb.

Mivel a mélyhúzás jellegű alaksajátosságok hagyományos élhajlító szerszámokkal nem készíthetők el, ezért ezek az alaksajátosságok nem kerülnek kiszámításra a terítékképzés során (9. ábra). Ezen tulajdonságok miatt fontos, hogy még a tervezési fázis előtt történjék egyeztetés a gyártóművel, mely során kiderül, hogy az ilyen jellegű alaksajátosságok milyen szerzői költség mellett gyárthatók le.



6.9. ábra. Mélyhúzás jellegű alaksajátosságok

1.4.3. Technológiai alaksajátosságok

A technológiai alaksajátosságok a hajlítás jellegű alaksajátosságok segítségével részben elkészült alkatrészek más technológiákkal történő továbbalakítását illetve befejezését szolgálják.

1.4.3.1. Lemeztábla

A lemeztábla paranccsal történik az alkatrészek bázisának kialakítása, melyből hajlításokkal és egyéb technológiai alaksajátosságokkal alakítható ki az alkatrész végleges formája. A lemeztábla parancs gyakorlatilag megfelel az alkatrészmodellezésnél kitárgyalt kihúzás paranccsal, azzal a különbséggel, hogy a kihúzás hossza megegyezik a lemeztáblavastagsággal.

1.4.3.2. Kivágás

A kivágás parancs szinte 100%-ban megegyezik az alkatrészmodellezés fejezetben tárgyaltakban. Itt is zárt vagy nyitott profilok segítségével a megrajzolt profilra merőleges anyageltávolítás készíthető. A kivágás iránya mindig merőleges a kivágás profiljára! A kivágás paraméterei megegyeznek az alkatrészmodellezésnél leírtakkal.

1.4.3.3. Normál kivágás

A normál irányú kivágás egy speciálisan lemezalkatrészekhez kitalált kivágás. Szinte mindenben megegyezik a kivágás paranccsal. Az egyetlen, ámde lényegi különbség, hogy a normál irányú kivágásnál a kivágás iránya mindig a lemezalkatrész felületére merőleges, ebből adódóan a vágott felületek is merőlegesek a lemez síkjára, így még véletlenül sem tervezhetőek kivágó lyukasztó szerszámmal illetve lézeres vágással nem létrehozható vágási felületek.

1.4.3.4. Furat

A furat parancs 100%-ban megegyezik az alkatrészmodellezésnél használt furatparanccsal. Itt is csak a furat középpontját kell megadni egy vázlaton és egy külön párbeszédablakban állíthatók be a furat különféle paraméterei, úgy mint:

- furat típusa,
- furat átmérője,
- furat mélysége,
- menet paraméterei,
- furat végkialakítás (zsákfurat),
- stb.

1.5. Alkatrészváltozók és kezelésük

Az alkatrészváltozók közül kiemelt jelentősége lemezalkatrészek esetén a lemezspecifikus változóknak van, hiszen a tervezési folyamat során különösen kontúrhajlítás esetén (1.4.1.1.) szükséges figyelembe venni a lemezvastagság és a hajlítási sugár nagyságát és elhelyezkedését. A tervezés során a profil méretezése közben célszerűen felhasznált változókkal (anyagvastagság, hajlítási sugár, stb.) szinte teljesen kizárhatók az alapadatok utólagos módosításából adódó pontatlanságok, hiszen minden változtatáskor a program újra számolja a változók segítségével meghatározott méreteket.

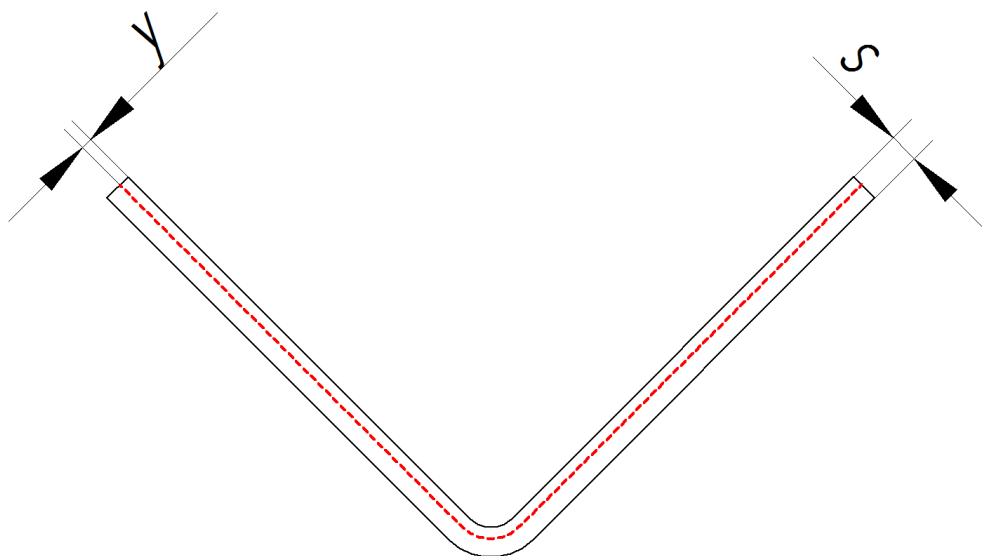
2. LEMEZALKATRÉSZEK TERÍTÉKKÉPZÉSE

A lemezalkatrészek legyárthatóságának alapfeltétele az alkatrész terítékének elkészítése, hiszen a gyártási folyamat a teríték kivágásával kezdődik és csak azt követően indulhat az alkatrész végleges alakját adó hajlítások sorozata.

2.1. Terítékszámítás alapjai

A lemezek hajlításakor általánosan használt technológiák miatt, terítékszámításkor sajnos nem érvényes a feltételezés, mely szerint a hajlított keresztmetszet középvonalában helyezkedik el a semleges szál, mely hossza az 1.1-ben leírtak szerint nem változik a hajlítás során. Ennek oka abban keresendő, hogy a hajlítási folyamat során a lemeznek maradós alakváltozást kell szenvednie.

A fentiek alapján szükséges bevezetni a semleges szál tényezőt, mely az 1.1-ben leírtak szerint: az az arányszám, mely a semleges szálnak, a hajlítási sugár által megadott felületétől mért távolsága, és a lemez vastagságának a hányadosa (10. ábra).



6.10. ábra. Semleges szál tényező

$$n = \frac{s}{y}$$

ahol:

n – semleges szál tényező,

s – lemezvastagság,

y – a semleges szálnak, a hajlítási sugár által megadott felületétől mért távolsága.

A fentiek alapján:

$$k = \frac{\beta \cdot \pi (r + (n \cdot s))}{180}$$

ahol a 11. ábra szerint:

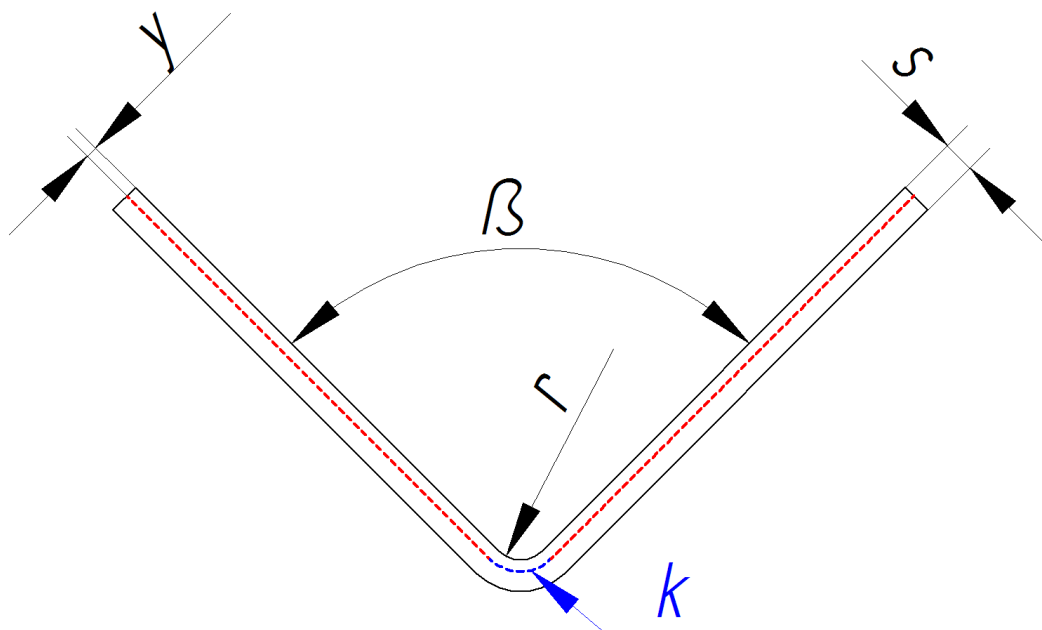
k – képlékeny zóna hossza,

r – hajlítási sugár,

n – semleges szál tényező,

s – lemezvastagság,

β – hajlítási szög.



6.11. ábra. Képlékeny zóna hossza

A fentiek alapján a teríték egy adott hajlításra merőleges hossza:

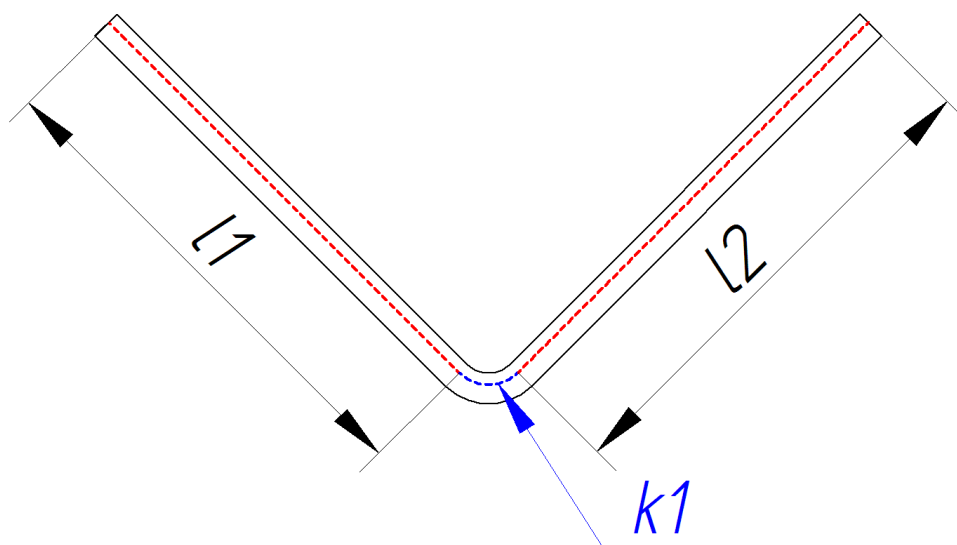
$$l = \sum_{i=1}^n k_i + \sum_{j=1}^{n-1} l_j$$

ahol a (12. ábra) szerint:

l – kiterített hossz,

l_j – a keresztmetszet egyenes szegmenseinek hossza,

k_i – a keresztmetszet képlékeny zónáinak hossza.



6.12. ábra. Kiterített hossz

2.2. Semleges szál tényező jelentősége

A fentiekből látszik, hogy a semleges szál tényező pontos meghatározása alapvető a lemezalkatrész kellő pontosságú tervezése és gyártása során.

2.2.1. Elhanyagolásából eredő hibák

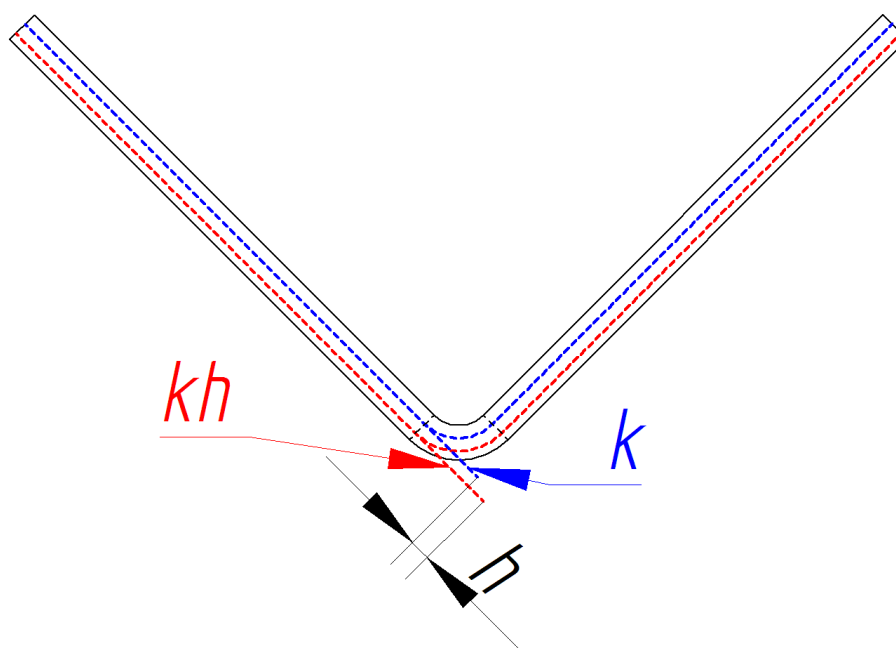
A semleges szál nem kellő pontosságú meghatározásából eredő hiba az alábbiak szerint számítható:

$$h = k - k_h$$

ahol a 13. ábra szerint:

k – képlékeny zóna hossza,

k_h – képlékeny zóna hibásan meghatározott hossza.



6.13. ábra. Terítékszámítás hibája

A 2.1-ben leírtak szerint könnyen belátható, hogy a hiba nagysága:

$$h_0 = h * i$$

ahol:

h_0 – összes hiba,

h – az egy képlékeny zónára vonatkoztatott hiba,

i – hajlítások száma

A fentiek alapján a semleges szál hibás vagy nem kellő pontosságú meghatározására visszavezethető hibák a következőekben foglalhatók össze:

- nem illeszkedő alkatrészek,
- pontatlan szerszámkészítés,
- selejtgártás.

A felsorolt hibák közül legsúlyosabbként a pontatlan szerszámkészítés említhető, hiszen a különféle hajlító ill. mélyhúzó szerszámok előállításának költsége – különösen egy összetett alkatrész esetén – elérheti az akár több 10 millió Ft-os nagyságrendet is. Ezek alapján könnyen belátható, hogy egy aprónak tűnő tervezési hiba akár veszteségessé is teheti egy termékcsoporthoz gyártását, vagy kritikus helyen akár az élet és vagyonbiztonságot is veszélyeztetheti, tehát nem lehet eléggé hangsúlyozni pontos, precíz tervezést és a mérnöki felelősségvállalást.

2.2.2. Semleges szál tényező meghatározása

A semleges szál tényező matematikai úton történő egzakt meghatározása a gyakorlatban nem kivitelezhető, hiszen a tényező minden esetben függ:

- az anyagminőségtől,
- a lemezvastagságtól,
- a hajlítási technológiától.

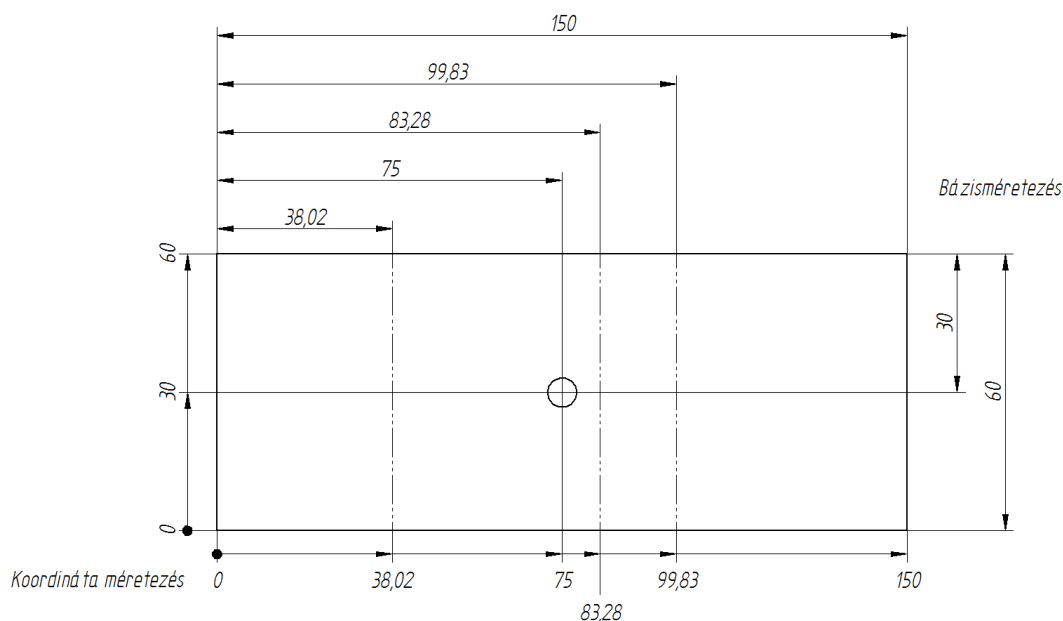
Az előzőekben említettek miatt a semleges szál tényező meghatározása kísérleti úton történik, és mivel ezekhez szükségeltetnek a hajlítógépek ill. szerszámok ezért általában a gyártómű feladatai közé sorolható.

A tényező meghatározásához az adott minőségű és vastagságú anyagból a szükséges technológiával próbadarabot gyártanak, és a kiindulási teríték ill. az elkészült próbadarab mérete alapján a 2.1-ben leírtak szerint visszaszámolható a semleges szál tényező.

2.3. Teríték méretezése

A gyakorlatban általában két méretezési mód terjedt el, ez egyik a koordinátaméretezés, a másik pedig a bázisméretezés.

A két méretezési módot megtekintve (14. ábra) látszik, hogy mindkét méretezési mód azonos alapokon nyugszik. A két módszer közt – elvi és rajztechnikai szempontból – lényegi különbség nincsen ezért célszerű a gyártóművel egyeztetett igények alapján elkészíteni őket.



6.14. ábra. Méretezési módok

2.4. Kimeneti adatformátumok

A tervezés kimeneteként első lépésben a használt tervezőszoftver saját formátumában jelenik meg a rajz. Ezek után szükség lehet valamilyen platformsemleges formátumba történő konverzióra, mely segítségével könnyebbé, gyorsabbá válhat a gyártó gépek programozása. A semleges formátum (általában *.dxf) típusának meghatározása illetve a fordítási beállítások pontosítása végett elengedhetetlen a gyártóművel való egyeztetés.

3. LEMEZALKATRÉSZEK TERVEZÉSE A GYAKORLATBAN

3.1. Gyártói adatszolgáltatás és jelentősége

Lemezalkatrészek tervezése során elengedhetetlenül fontos, hogy a tervező és a gyártómű közti adatcsere folyamatos és zavartalan legyen. Minderre azért van szükség, mert a gyártói adatok nélkül a tervezés során komoly hiányosságok léphetnek fel, amelyek rengeteg nehézséget, vagy végső soron selejtgyártást eredményezhetnek.

A gyártótól beszerzendő adatok az alábbiakban foglalhatók össze:

- semleges szál tényező,
- hajlító szerszám méretek,
- hajlító szerszámból adódó hajlítási korlátok,
- lyukasztó szerszámok méretei,
- kivágó szerszámok méretei,
- maximális munkadarab méret,
- megmunkálható maximális és minimális lemezvastagság,
- megmunkálható anyagminőségek,
- szükség van-e null szériára.

3.2. Megrendelői adatszolgáltatás és jelentősége

A megrendelői adatszolgáltatás a gyárthatóság ill. a gyártás gazdaságosságának eldöntését segíti elő.

A megrendelő adatszolgáltatás főbb elemei az alábbiakban foglalható össze:

- szükség van-e adatkonverzióra,
- ki végzi az esetlegesen felmerülő módosításokat,
- kit terhelnek ennek költségei,
- megmunkálandó anyagminőség,
- befoglaló méretek,
- megkövetelt pontosság,
- darabszám,
- gyártási ütemezés.

3.3. Lemezalkatrészek speciális kötőelemei

A lemezalkatrészek speciális megmunkálásából adódik, hogy ezen munkadarabok rögzítésének gazdaságos kivitelezése speciális kötőelemeket igényel. Ezen kötőelemeket általában hegesztéssel vagy besajtolással rögzítik a munkadarabban. A gyártás sebességnövelése érdekében az előbb említettek közül –amennyiben lehetőség nyílik rá – célszerű a sajtolható elemeket használni.

A sajtolható elemek rögzítésekor egy előre elkészített furatba történik az elemek bepréselése. A kötőelemek célszerű kialakítása folytán a lemez anyaga lokálisan megfolyik és ez biztosítja a kötőelemnek a munkadarabba történő rögzítését (15. ábra).



6.15. ábra. Besajtolható lemezanya kialakítások

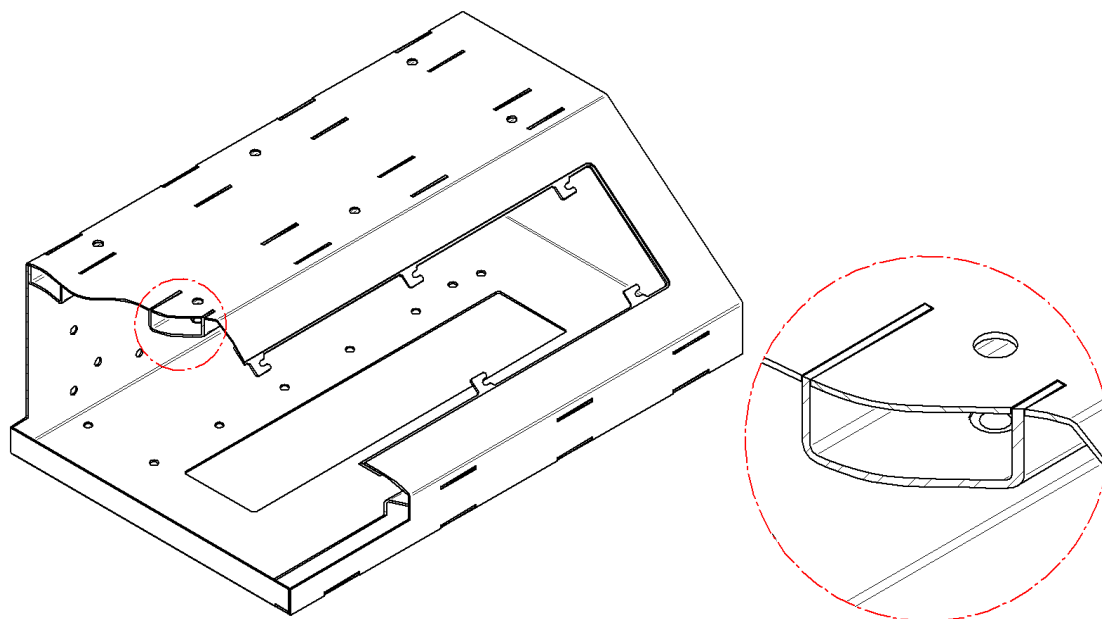
A besajtolható kötőelemek nagy választékban állnak rendelkezésre, melyek – a teljesség igénye nélkül – az alábbiakban foglalhatók össze:

- anyák,
- csapok,
- tájoló csapok,
- távtartók,
- elveszíthetetlen csavarok,
- stb.

3.4. Tervezési javaslatok a gazdaságos összeállításért

A lemezalkatrészekből készített szerkezetek könnyű és gyors összeszerelése érdekében már tervezéskor szükséges néhány olyan szerkezeti kialakítás alkalmazása, amelyek jelentősen lerövidíthetik a szerelésre fordított időt és ezáltal jelentős költségmegtakarítás érhető el.

Ezen szerkezeti elemek közül az egyik leggyakrabban használt pozícionáló fül –melyet a gyártói szakzsargonban „kramlinak” hívnak (16. ábra). Ennek segítségével az egymásra merőlegesen álló alkatrészek gyors és pontos pozícionálása válik lehetővé, illetve bizonyos esetekben elkerülhető a hegesztősablonok használata is.



6.16. ábra. Pozícionáló fül

A lemezalkatrészek készítése során már a tervezési fázisban különös figyelmet kell fordítani a későbbi felületkezelésre, ugyanis a felületkezelésből adódó vastagság növekedés figyelmen kívül hagyása igen gyakran szokott összeszerelési problémákat okozni.

7. FELÜLETMODELLEZÉS

Szerzők:

Szabó István, Nagy István

A számítógéppel segített tervezési folyamat kulcsfontosságú eleme a műszaki gyakorlatban elterjedt felületek szabatos és kellően pontos leírása. A könyvünk 2. fejezetében a CAD modellalkotás geometriai alapjai már ismertetésre kerültek, így az alapvető fogalmak (pont ábrázolása, térbeli koordinátarendszerek, elemi transzformációk stb.) bemutatásától eltekintünk és az elkövetkező oldalakon elsősorban a gépészeti tervezőmunka során előforduló, jellemző felületek számítógépes előállításának technikáira koncentrálnak. A felületek modellezésének jelentősége abban áll, hogy sok esetben a tömör testek (alkatrészek) leírásának ez az alapja, ahogyan ezt a 3. fejezetben is láthattuk. Bár az alkalmazott matematikai leírási módszer ismerete sok esetben nem szükséges a CAD eszközök alkalmazási praktikuma során, az elméleti ismeretanyag elsajátítása hasznos lehet a megfelelő modellező eljárás (vagy magának a CAD rendszer) kiválasztásában, illetve az esetleges problémák kiküszöbölésében.

7.1. Felületek ábrázolásának matematikai alapjai

A legbonyolultabb műszaki felületek számítógéppel segített tervezése is néhány alapvető geometriai entitás megadására vezethető vissza. A felhasználó interaktív módon pontokat, görbéket és eljárásokat (ezek háttérben pedig természetesen algoritmusokat) ad meg a felületreprezentáció érdekében. Ahogyan az előző fejezetekben már elemzésre került, a CAD gyakorlatban a különböző felület- (és görbe-) megadási módok eltérő jelentőséggel bírnak. Egy 3D felület matematikailag az alábbi kétváltozós folytonos függvénykapcsolattal írható le:

$$z = f(x, y) \quad (7.1)$$

Így a descartes-i koordinátarendszerben az adott felület egy tetszés szerinti pontjához húzott $\mathbf{P}$ helyvektor megadható az alábbiak szerint:

$$\mathbf{P} = x \cdot \mathbf{i} + y \cdot \mathbf{j} + f(x, y) \cdot \mathbf{k} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ f(x, y) \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

Belátható, hogy ez a megadási mód a felületi pontok kiszámítására és a különböző analízisekhez jól alkalmazható, ugyanakkor az egyértelmű leképezés sajátossága miatt zárt felületek (pl. gömb) leírására nem megfelelő. Ugyancsak problémát jelenthet a számítógépes reprezentáció során, az a jelenség, hogyha a felülethez húzott érintő sík párhuzamossá válik a z tengellyel a számítógépes algoritmusok instabillá válhatnak (ez az ún. „tangens érzékenység”). Ezeket a fogyatékoságokat az implicit megadási módok kiküszöbölik, ahol a felület megadásának általános alakja a következő:

$$F(x, y, z) = 0 \quad (7.3)$$

Például egy R sugarú, origó középpontú gömb felületén lévő $P(x, y, z)$ pontra igaz, hogy:

$$x^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0 \quad (7.4)$$

Ez a megadási mód ugyan megoldást jelenthet az előzőekben felvázolt hiányosságokra, ugyanakkor nem alkalmas a felület egyes pontjainak közvetlen kiszámítására, vagyis a gyakorlati számítógépes grafikai megoldásokban csak korlátozottan használható. Ezen túlmenően mindkét leírási mód koordinátarendszer függő, míg a műszaki gyakorlatban alkalmazott felületek egyes pontjainak leírásakor nem egy mesterséges koordinátarendszerhez, hanem inkább az egymáshoz viszonyított relatív helyzetük a meghatározó. Ezen negatívumok miatt is vált meghatározóvá a számítógépes grafikában és a CAD/CAM gyakorlatban a felületek parametrikus megadása. Ennek általános formája:

$$P(u, v) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(u, v) \\ y(u, v) \\ z(u, v) \end{bmatrix}; \quad u_{\min} \leq u \leq u_{\max}, \quad v_{\min} \leq v \leq v_{\max} \quad (7.5)$$

Ezzel a módszerrel a korábban megadott R sugarú és origó középpontú gömb a következőképpen definiálható:

$$\begin{aligned} x(u, v) &= R \cdot \cos(2\pi u) \cdot \sin(\pi v) \\ y(u, v) &= R \cdot \sin(2\pi u) \cdot \sin(\pi v) \\ z(u, v) &= R \cdot \cos(\pi v) \quad u, v \in [0, 1] \end{aligned} \quad (7.6)$$

Amint a 7.1. ábrán is látható a felületrepresentáció ebben a formában az E^2 paraméterteret képezi le az E^3 Descartes-féle koordináta-rendszerbe. A paraméterek értékészlete korlátos, gyakran normalizált (a paraméterek ilyenkor a $[0, 1]$ értékeket vehetik fel). A felület határoló görbéit rendre az $u_{\min}, u_{\max}, v_{\min}, v_{\max}$ helyettesítéssel kaphatjuk meg. Amennyiben rögzítjük az egyes paraméterek értékeit ($u = u_{\text{cons}}, v = v_{\text{cons}}$) a felületen végigfutó görbéket kapunk, metszéspontjuk $P(u_{\text{cons}}, v_{\text{cons}})$. Az egyes görbék célszerű megválasztásával bonyolult felületalakzatok is létrehozhatók.

Nyilvánvaló, hogy bizonyos esetekben célszerű lehet a teljes felületet részekből, ún. „foltokból” (az angol terminológiában „patch”) összeállítani. A csatlakozások egy közös határgörbe mentén következhetnek be (pl. amennyiben a megadott felülethez a $u = u_{\max}$ oldalon illeszkedik a csatlakozó 2. folt) értelemszerűen fenn kell, hogy álljon, a 7.5 összefüggés felhasználásával, hogy:

$$P(u_{\max}, v) = \begin{bmatrix} x(u_{\max}, v) \\ y(u_{\max}, v) \\ z(u_{\max}, v) \end{bmatrix} = P_2(u_{\min}, v) = \begin{bmatrix} x(u_{\min}, v) \\ y(u_{\min}, v) \\ z(u_{\min}, v) \end{bmatrix}; \quad (7.7)$$

Ez a kitétel biztosítja a 2. fejezetben már tárgyalt ún. C^0 folytonossági kritériumot, vagyis a két folt teljes egészében kapcsolódik, közös egy oldaluk. További feltételt jelenthet a kapcsolódáshoz, ha a megfelelő paraméteres görbék deriváltjai is megegyeznek, azaz teljesül a C^1 folytonossági feltétel is:

Vagyis az adott esetben fennáll, hogy:

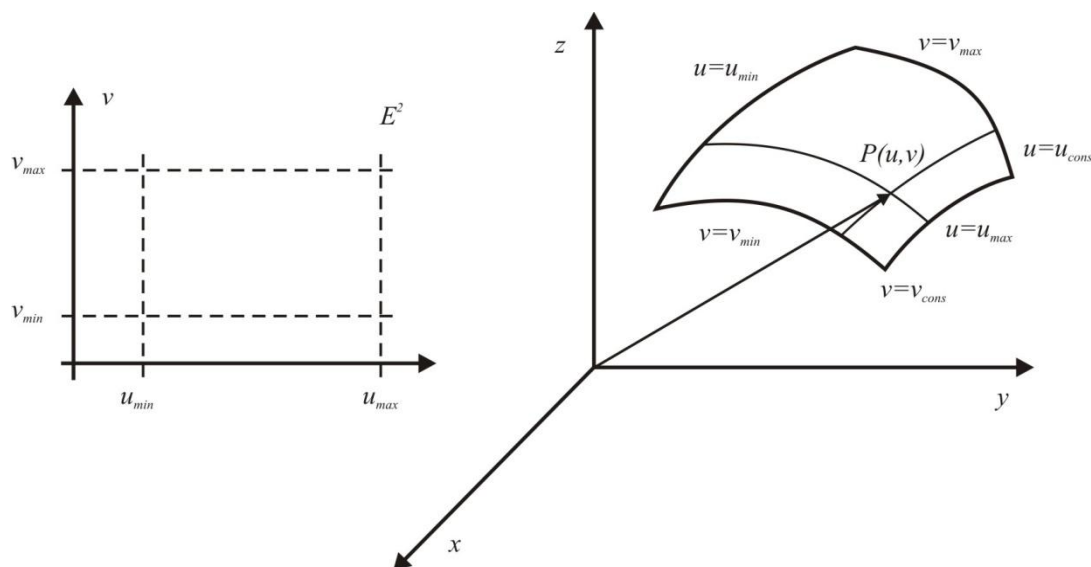
$$\frac{\partial P(u_{\max}, v)}{\partial u} = \frac{\partial P_2(u_{\min}, v)}{\partial u}, \quad \text{valamennyi } v \text{ értékre} \quad (7.8)$$

Természetesen hasonlóképpen definiálhatnánk a C^2 , vagyis a másodrendű folytonossági feltételek teljesülését is.

Vegyük észre, hogy a felületfolt geometriai peremfeltételeit a négy határoló görbe, valamint a 4 sarokpontban kalkulálható 2-2 érintővektor jelenti. A teljes körű leírás kiegészül még a sarokpontokban felírható, 4 úgynevezett „csavarodási” vektorral, amely a $\frac{\partial^2 P}{\partial u \partial v}$ másodrendű derivált segítségével kalkulálható u, v szélsőértékeinek helyettesítésével.

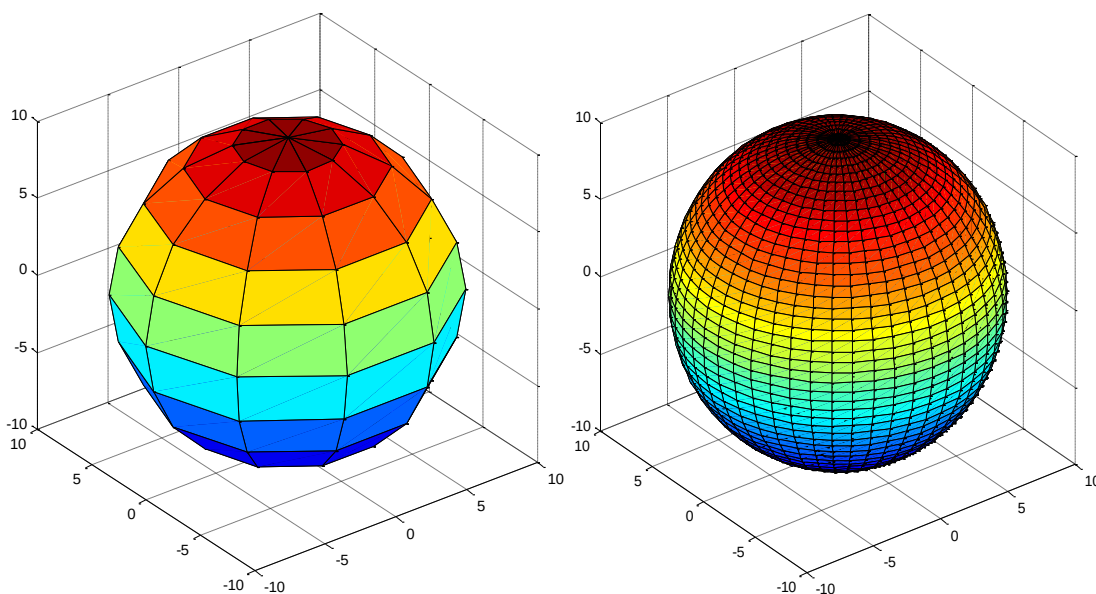
Az érintővektor párosok – nyilvánvalóan nem csak a szélső pozíciókban - egy érintő síkot határoznak meg. Bizonyos műszaki feladatok (pl. az NC forgácsoló gépek programjai, vagy a felületek árnyékolt megjelenítését végző algoritmusai) igénylik a felületi normális definiálását is. Könnyű belátni, hogy a normál vektorra minden u, v pontban fennáll, hogy az adott pontban átmenő paramétergörbékhez húzott érintővektorok vektoriális szorzata:

$$N(u, v) = \frac{\partial P(u, v)}{\partial u} \times \frac{\partial P(u, v)}{\partial v} \quad (7.9)$$



7.1. ábra. A felületek parametrikus ábrázolása

A számítógépes feldolgozhatóság érdekében a paraméterteret véges számú diszkrét elemre célszerű felosztani, így összességében $m \times n$ rendezett paraméterpár áll a felületleíró és leképező algoritmus rendelkezésére (m, n egész számok, nagyságuk a felületet lefedő „háló” sűrűségét határozza meg). A 7.6 összefüggésekkel definiált origó középpontú 5 egység sugarú gömb megjelenítése a 7.2 ábrán tanulmányozható. Az ábra baloldalán a paraméterteret 50×50 egysegre osztottuk fel, míg a jobboldali ábra 10×10 -es hálózással készült.



7.2. ábra. Gömb parametrikus számítógépes ábrázolása eltérő hálósűrűség mellett

7.2. A CAD gyakorlatában alkalmazott felületek

A CAD gyakorlatában az alkalmazott felületeket jellemzően nem egyenleteikkel adjuk meg – a legtöbb esetben a függvénykapcsolatok nem is állnak rendelkezésre –, hanem a számítógépes környezethez jobban illeszkedő input paraméterekre (alapsíkok, kiválasztása, pontok kije-

lölése, analitikus görbék kijelölése stb.) támaszkodunk. A kijelölés történhet interaktív módon, például a felhasználói felületen történő kurzormozgatással és „klikkeléssel”, és/vagy a szükséges input adatok numerikus bevitelével. Bizonyos esetekben célhardver is segíti az információ-bevitel gördülékenységet (digitalizáló táblák, 3D pozicionáló eszközök stb.). A következő oldalakon a műszaki gyakorlatban legelterjedtebben használatos felületek és felületcsoportok létrehozásának jellemzőit tekintjük át.

7.2.1. Analitikus felületek ábrázolása

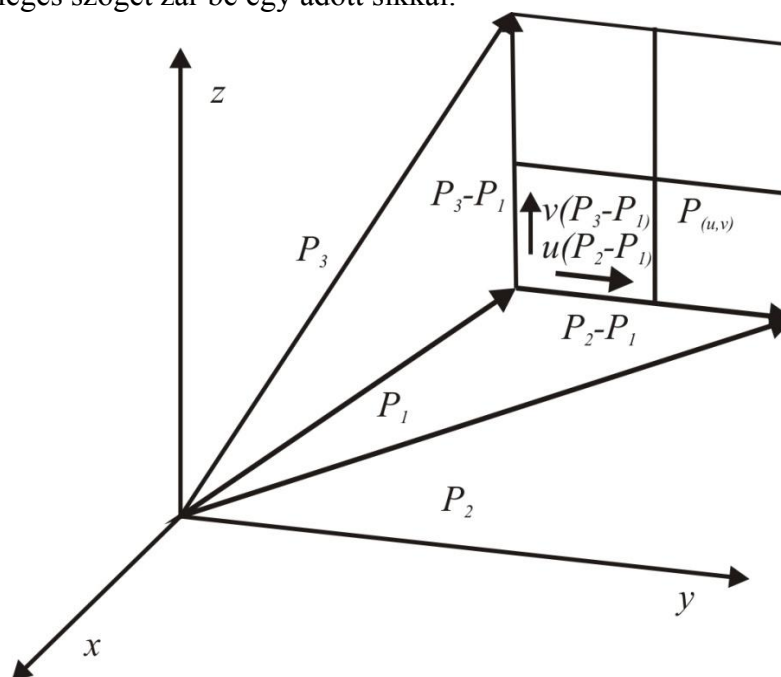
A klasszikus geometriai alakzatok definiálása a számítógépes tervező rendszerekben elemi geometriai entitások (pontok, egyenesek, körök, parabolák, egyéb analitikus görbék) megadásával történhet. A legegyszerűbb ilyen felület a **sík**. Megadásának triviális formája 3 - a síkot meghatározó - pont definiálása (P_1, P_2, P_3). Ebben az esetben a sík valamennyi pontjára fennáll, hogy:

$$P(u, v) = P_1 + u \cdot (P_2 - P_1) + v \cdot (P_3 - P_1); \quad 0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1 \quad (7.10)$$

Az összefüggésben szereplő vektorkülönbségek felfoghatók „irányvektorként” is, vagyis a megadott forma alkalmas a sík megadására abban az esetben is, ha a felület egy tetszőleges pontja és a síkot „kifeszítő” irányok adottak. Természetesen feltételezzük, hogy az „irányvektorok” függetlenek, azaz, a három pont nem egy egyenesen található.

További sík megadási lehetőségek:

- adott a sík normálisa és egy pontja;
- adott egy görbült felület és a sík a felület egy pontjához érintőlegesen illeszkedik;
- a sík tetszőleges szöget zár be egy adott síkkal.



7.3. ábra. A síkfelület parametrikus megadása

Az analitikus felületek egy másik jellemző csoportját alkotják az ún. **vonalfelületek**. Ebben az esetben a felületet alkotó bármelyik ponton át húzható egy egyenes, úgy hogy az egyenes valamennyi pontja a felülethez is tartozik. A számítógépes felületábrázolások során a legelterjedtebbek azok a vonalfelületek, amelyek két térgörbe megfelelő pontjait kötik össze

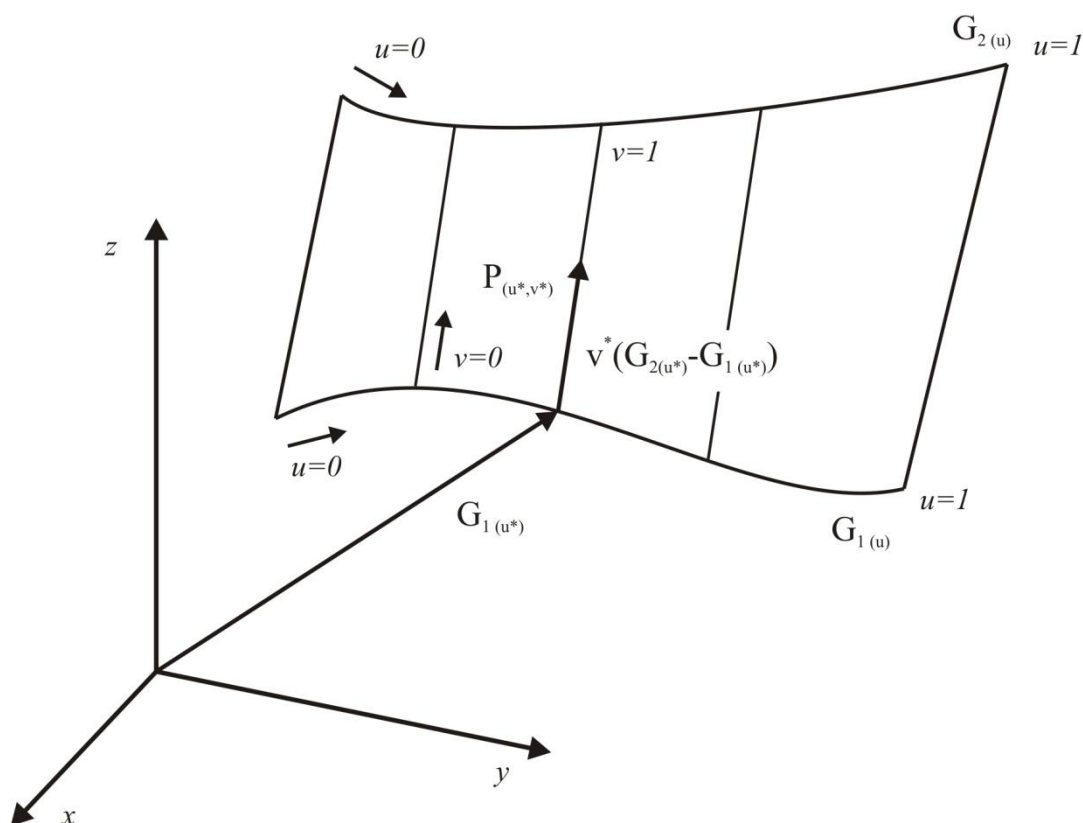
egyenes szakaszokkal. Ha a két görbe parametrikusan $\mathbf{G}_1(u)$, $\mathbf{G}_2(u)$ alakban írható fel, belátható, hogy a 7.4 ábrán vázolt felületre fennáll:

$$\mathbf{P}_{(u,v)} = \mathbf{G}_1(u) + v \cdot (\mathbf{G}_2(u) - \mathbf{G}_1(u)) , \quad (7.11)$$

átrendezve pedig:

$$\mathbf{P}_{(u,v)} = (1-v) \cdot \mathbf{G}_1(u) + v \cdot \mathbf{G}_2(u); \quad 0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1 \quad (7.12)$$

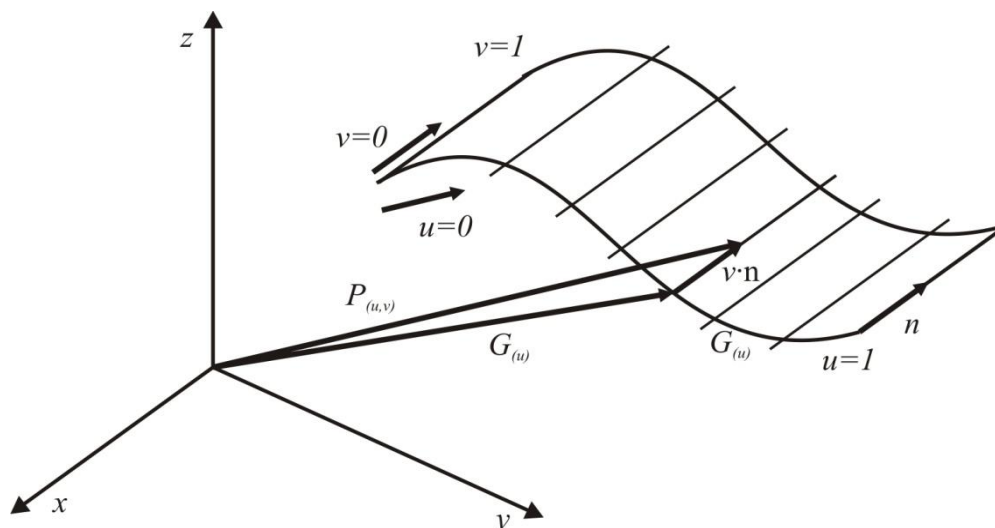
Az összefüggés tulajdonképpen tetszőleges $\mathbf{G}_1(u)$, illetve $\mathbf{G}_2(u)$ pontok által meghatározott egyeneseket ír le és igazolható, hogy $\mathbf{G}_1(u) = \mathbf{P}_{(u,0)}$, míg $\mathbf{G}_2(u) = \mathbf{P}_{(u,1)}$.



7.4. ábra. Vonalfelület származtatása

A vonalfelületek speciális eseteként értelmezhető a tabulált felületek csoportja, ahol a síkbeli vezérgörbe $\mathbf{G}(u)$ minden egyes pontjához egy rögzített irányú ($\mathbf{n}$) alkotó egyenessel pásztázva jön létre a kívánt felület. A 7.11 összefüggés analógiájával ebben az esetben a felület leírása az alábbi formában lehetséges:

$$\mathbf{P}_{(u,v)} = \mathbf{G}(u) + v \cdot \mathbf{n}; \quad 0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1 , \quad (7.13)$$



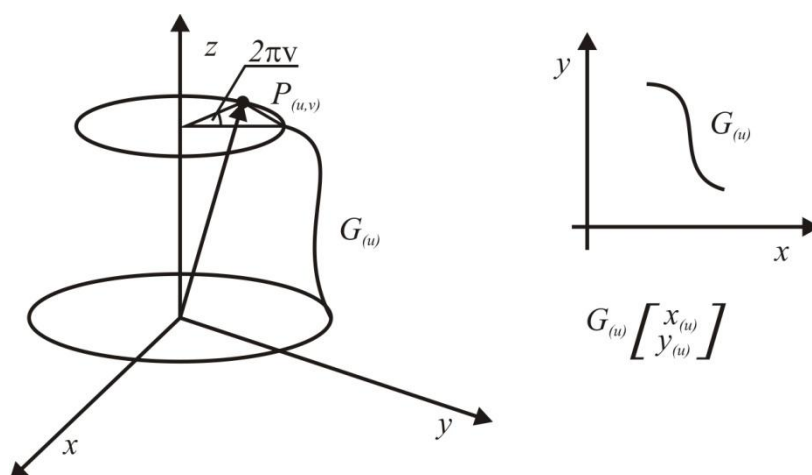
7.5. ábra. Tabulált felület származtatása

Amennyiben egy síkbeli $G(u)$ görbét egy adott tengely körül elforgatunk egy forgásfelületet állítunk elő. Az előállítás során a görbe valamennyi pontja egy körön mozdul el, amelynek sugara (a forgástengelytől való távolsága) $r(u)$ lesz. Feltételezve, hogy a forgástengely és a koordináta-rendszer y tengelye egybeesik ($r(u) = x(u)$), valamint a 7.6 ábra jelöléseit felhasználva az alábbi összefüggést kapjuk:

$$G(u) = \begin{bmatrix} x(u) \\ y(u) \\ 0 \end{bmatrix}; \quad 0 \leq u \leq 1, \quad (7.14)$$

$$P(u, v) = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(u) \cdot \cos(2\pi \cdot v) \\ y(u) \\ x(u) \cdot \sin(2\pi \cdot v) \end{bmatrix}; \quad 0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1 \quad (7.15)$$

Természetesen a kapott eredmény egy egyszerű koordináta-transzformációval tetszőleges vonatkoztatási rendszerbe átszármaztatható.



7.6. ábra. Forgásfelület származtatása

7.2.2. Szintetikus felületek ábrázolásának alapjai

Az előzőekben bemutatott un. analitikus felületek sok esetben nem elégítik ki a tervezői igényeket, hiszen a gyakorlatban összetett és bonyolult alakzatok alkalmazása szükséges, amelyeket az ismertebb matematikai függvényeken alapuló ábrázolásokkal nem tudunk jól leírni. A személygépkocsik karosszériaelemei, vagy egy formatervezett konyhai kézi mixer műanyag borításának (esetleg egy turbinalapát alakjának) egzakt megadására az analitikus felületek nem alkalmasak. A megoldást a 2. fejezetben már említett polinom alapú approximációs és interpolációs parametrikus görbék létrehozásához analóg eljárások jelenthetik úgy, hogy a technikai az ott megismert algoritmust kiterjesztjük az „u-v” paramétertérre. A területi korlátok – és a jelen tananyag rész célkitűzésének megfelelően – a következőkben részleteiben a *Hermite-féle* felületelem leírásának matematikai részleteit tekintjük át, felhasználva a korábbi 7.1. ábrát is.

A 2. fejezetben láttuk, hogy a Hermite harmadfokú szplajn íve két végpontra és az itt megadott érintő irányokkal adható meg, az alábbi összefüggés segítségével:

$$P(u) = \sum_{i=0}^3 C_i u^i \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (7.16)$$

Belátható, hogy ez az összefüggés skalár formában a következő alakot veszi fel:

$$x(u) = C_{3x}u^3 + C_{2x}u^2 + C_{1x}u + C_{0x}; \quad 0 \leq u \leq 1, \quad (7.17)$$

$$y(u) = C_{3y}u^3 + C_{2y}u^2 + C_{1y}u + C_{0y};$$

$$z(u) = C_{3z}u^3 + C_{2z}u^2 + C_{1z}u + C_{0z};$$

ahol C az un. algebrai együttható, amely vektoros alakban is felírható (a^T jelölés a mátrix transzponáltját jelenti):

$$C = [C_3 \ C_2 \ C_1 \ C_0]^T;$$

Amennyiben bevezetjük a paraméter vektort is az $u = [u^3 \ u^2 \ u^1 \ u]^T$ formában az előző skalár egyenletcsoport mátrix alakra hozható:

$$P(u) = u^T C; \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (7.18)$$

Figyelembe véve, hogy a görbe definíciója során a végpontok érintővektoraira is szükségünk lesz, célszerű felírni az alapegyenlet (7.16) deriváltját is, amely a görbe minden egyes u pontjában megadja az érintő iránytangensét.

Amennyiben a 7.16 alapján a görbe egyenlete:

$$P(u) = C_3 u^3 + C_2 u^2 + C_1 u + C_0 \quad (7.19)$$

akkor a deriváltra fennáll, hogy:

$$P'(u) = 3C_3 u^2 + 2C_2 u + C_1 \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (7.20)$$

Amennyiben egy konkrét ív megadására van szükségünk, a peremfeltételek megfelelő helyettesítésével az együttható mátrix meghatározható. Tegyük fel, hogy a Hermite ív definíciójának megfelelően adottak a P_0 , P'_0 , P_1 , P'_1 , vektorok az $u=0$, illetve az $u=1$ szélsőértékeknél. Ezeket a vektorokat az un. peremfeltétel (vagy geometriai) mátrixba rendezhetjük a következő formában:

$$\mathbf{B} = [\mathbf{P}_0 \mathbf{P}'_0 \mathbf{P}_1 \mathbf{P}'_1]^T$$

Behelyettesítve a 4 peremfeltétel értékét (vagyis az $u=1$ és $u=1$ helyettesítési paramétereiket) a 7.19 és 7.20 egyenletekbe kapjuk, hogy:

$$\mathbf{P}_0 = \mathbf{C}_0; \mathbf{P}'_0 = \mathbf{C}_1; \mathbf{P}_1 = \mathbf{C}_3 + \mathbf{C}_2 + \mathbf{C}_1 + \mathbf{C}_0; \mathbf{P}'_1 = 3\mathbf{C}_3 + 2\mathbf{C}_2 + \mathbf{C}_1; \quad (7.21)$$

A négy egyenletből a keresett együtthatók kifejezhetők, így azt kapjuk, hogy:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_0 &= \mathbf{P}_0 \\ \mathbf{C}_1 &= \mathbf{P}'_0 \\ \mathbf{C}_2 &= 3(\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_0) - 2\mathbf{P}'_0 - \mathbf{P}'_1 \\ \mathbf{C}_3 &= 2(\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}_1) + \mathbf{P}'_0 + \mathbf{P}'_1 \end{aligned} \quad (7.22)$$

Visszahelyettesítve az így kapott együtthatókat az alapegyenletbe és átrendezve az összefüggést az alábbi eredményt kapjuk:

$$\mathbf{P}(u) = (2u^3 - 3u^2 + 1)\mathbf{P}_0 + (-2u^3 - 3u^2)\mathbf{P}_1 + (u^3 - 2u^2 + u)\mathbf{P}'_0 + (u^3 - u^2)\mathbf{P}'_1 \quad (7.23)$$

A könnyebb informatikai feldolgozhatóság érdekében az összefüggést mátrix alakra is hozhatjuk, alkalmazva a korábban már bevezetett jelöléseket:

$$\mathbf{P}(u) = [u^3 \ u^2 \ u \ 1] \cdot \begin{bmatrix} 2 & -2 & 1 & 1 \\ -3 & 3 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{P}_0 \\ \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{P}'_0 \\ \mathbf{P}'_1 \end{bmatrix} \quad (7.24)$$

$$\mathbf{P}(u) = \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{M}_{\text{Her}} \cdot \mathbf{B} \quad (7.25)$$

ahol $\mathbf{M}_{\text{Her}}$ az un. Hermite mátrix, amely univerzálisan alkalmas a görbe egzakt parametrikus lineáris algebrai leírására a peremfeltételek ismeretében, vagyis megfelelő grafikus szoftver-környezetben jól használható az ilyen típusú spline generálásra.

Nyilvánvaló, hogy az algebrai együtthatókra fennáll, hogy $\mathbf{C} = \mathbf{M}_{\text{Her}} \mathbf{B}$.

Analóg módon a derivált görbe is előállítható, ha az együtthatókat a 7.20 összefüggésbe helyettesítjük vissza és a peremfeltétel-vektorok együtthatóit összerendezzük:

$$\mathbf{P}'(u) = (6u^2 - 6u)\mathbf{P}_0 + (-6u^2 + 6u)\mathbf{P}_1 + (3u^2 - 4u + 1)\mathbf{P}'_0 + (3u^2 - 2u)\mathbf{P}'_1 \quad (7.26)$$

Ebben az esetben a mátrixalgebrai leírása a görbe deriváltjának az előzőekhez hasonlóan előállítható:

$$\mathbf{P}'(u) = [u^3 \ u^2 \ u \ 1] \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & -6 & 3 & 3 \\ -6 & 6 & -4 & -2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{P}_0 \\ \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{P}'_0 \\ \mathbf{P}'_1 \end{bmatrix} \quad (7.27)$$

Illetve:

$$\mathbf{P}'(u) = \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{H}_{du} \cdot \mathbf{B} \quad (7.28)$$

ahol $\mathbf{H}_{du}$ az un. Hermite deriváló mátrix.

A Hermite felületfolt ábrázolása az előzőekben vázolt görbedefiníció kiterjesztésével könnyen értelmezhető. A „bikubikus” felületelem négy sarokpontra és az ott értelmezhető érintőirányokra épül. Amint a Hermite ívnél láttuk, egy görbeszakasz definíciója 4 vektor (vagy 12 skálár) megadását igényelte, ugyanez a felületfolt esetében 16 vektort (48 skálár adatot)

jelent: a 4 sarokpont helyvektora, valamint sarkonként 2 érintővektor (az „u” és „v” irányokban) és a 4 csavarodási vektorral (ahogyan ez a 7.1 fejezetben bevezetésre került).

A Hermite felületfolt egyenletére – a görbe felírásának analógiáját felhasználva, azt „v” paraméter irányba kiterjesztve – adódik, hogy:

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 C_{ij} u^i v^j \quad 0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1 \quad (7.29)$$

Hasonlóan az ív előzőekben részletezett lineáris algebrai megadási lehetőségeihez (7.18), a felületfolt egyenlete is kezelhető ún. mátrix alakban:

$$P(u, v) = u^T C v; \quad 0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1, \quad (7.30)$$

ahol $u = [u^3 \ u^2 \ u^1 \ u]^T$, és $v = [v^3 \ v^2 \ v^1 \ v]^T$.

Az algebrai együttható-mátrix ebben az esetben az alábbi formát veszi fel:

$$C = \begin{bmatrix} C_{33} & C_{32} & C_{31} & C_{30} \\ C_{23} & C_{22} & C_{21} & C_{20} \\ C_{13} & C_{12} & C_{11} & C_{10} \\ C_{03} & C_{02} & C_{01} & C_{00} \end{bmatrix}. \quad (7.31)$$

Amennyiben megkívánjuk határozni az algebrai együtthatók értékét, a peremfeltételeket hívhatjuk segítségül és a 7.25 összefüggés kiterjesztett formáját alkalmazhatjuk (felhasználva M_{Her} már megismert értékét):

$$P(u, v) = u^T \cdot M_{Her} \cdot B \cdot M_{Her}^T \cdot v; \quad 0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1 \quad (7.32)$$

A peremfeltételekből alkotott 16 elemű mátrixra pedig fennáll, hogy:

$$B = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} & P_{v00} & P_{v01} \\ P_{10} & P_{11} & P_{v10} & P_{v11} \\ P_{u00} & P_{u01} & P_{uv00} & P_{uv01} \\ P_{u10} & P_{u11} & P_{uv10} & P_{uv11} \end{bmatrix}. \quad (7.33)$$

Vegyük észre, hogy a mátrix négy részmátrixból épül fel, rendre tartalmazva a 4 helyvektort, a sarokpontokban a 4-4 érintő vektort az u és v irányokban, valamint a 4 csavarodásvektort.

Természetesen a felületet leíró görbék deriváltjait itt is előállíthatjuk analóg módon a 7.28 összefüggéshez és felhasználva a H_d korábban bevezetett értékét.

$$P'_u(u, v) = u^T \cdot H_{du} \cdot B \cdot H^T \cdot v \quad (7.34)$$

$$P'_v(u, v) = u^T \cdot H \cdot B \cdot H_{dv}^T \cdot v$$

$$P''_{uv}(u, v) = u^T \cdot H_{du} \cdot B \cdot H_{dv}^T \cdot v ;$$

Belátható, hogy a felületleírás során a 2. fejezetben leírt Bezier görbe kiterjesztését is alkalmazhatjuk. Ebben az esetben az adott P_{ij} kontrollpontok egy kontrol poliédert alkotnak, amelyre a $P_{(uv)}$ felület rásimul. A korábbi fejezet jelölését és az ott bevezetett ún. Bernstein polinom ($BEZ_{i,n}$, $BEZ_{j,m}$) fogalmát felhasználva:

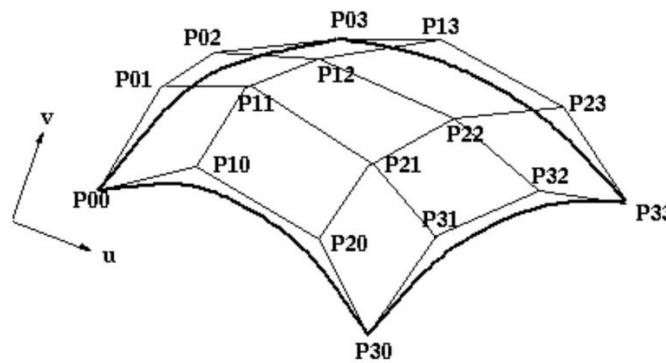
$$P(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} \text{BEZ}_{i,n}(u) \text{BEZ}_{j,m}(v); \quad 0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1 \quad (7.35)$$

A Hermite felület ismertetésénél bemutatotthoz hasonló eljárással – a levezetés részletezése nélkül – előállítható az ún. $\mathbf{M}_{\text{Bez}}$ mátrix, melynek segítségével a felület pontjai könnyen algoritmizálható formában az alábbi összefüggéssel generálhatók:

$$P(u, v) = \mathbf{u}^T \cdot \mathbf{M}_{\text{Bez}} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{M}_{\text{Bez}}^T \cdot \mathbf{v}; \quad 0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq 1 \quad (7.36)$$

Az elterjedten alkalmazott köbös (harmadfokú spline) görbékre épülő Bezier felületfolt esetében a kontrollpontok száma 4×4 , ezek helyvektorai alkotják a $\mathbf{B}$ peremfeltétel-mátrixot, míg $\mathbf{M}_{\text{Bez}}$ értékére fennáll, hogy:

$$\mathbf{M}_{\text{Bez}} = \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



7.6. ábra. Szorzat-felület származtatása (4x4 pontra)

Belátható, hogy ugyanilyen ún. szorzatfelület előállítható B-spline görbék alkalmazásával is. (A görbéről a 2. fejezetben volt már szó.) Tulajdonképpen a B-spline görbe a Bezier ívek kiterjesztéseként is értelmezhetők, két lényeges különbséggel. Mindenekelőtt a görbe foka $(k-1)$ bizonyos feltételek mellett független a kontrollpontok $(n+1)$ számától (a korábbi példákban jelzett 4 kontrollpont közelíthető 1., 2., és 3. fokú polinomokkal, mivel azonban a fokszám emelkedésével jelentősen nő a feladat számításigénye a gyakorlatban a harmadfokú görbék alkalmazása terjedt el nagyobb kontrollpont-szám esetében is). Másfelől a görbe parametrizálása már nem teljesen tetszőleges, függ a spline egyéb jellemzőjétől is.

Egy tetszőleges B-spline görbe az alábbiak szerint írható fel:

$$P(u) = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(u) \quad u_{\min} \leq u \leq u_{\max}; \quad n - k + 2 > 0 \quad (7.37)$$

Harmadfokú esetben az összefüggés az következő alakot veszi fel:

$$P(u) = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,3}(u) \quad u_{\min} \leq u \leq u_{\max}; \quad (7.38)$$

Ahol $N_{i3}(u)$ a harmadfokú bázisfüggvény. A pontos definíció erre a fokszámra a 2.26-ban megtalálható, illetve általános esetben tetszőleges fokszámra - az alábbi rekurzív összefüggéssel adható meg:

$$N_{i,1}(u) = \begin{cases} 1, & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{egyébként} \end{cases} \quad (7.39)$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{[(u - u_i)N_{i,k-1}(u)]}{u_{i+k-1} - u_i} + \frac{[(u_{i+k} - u)N_{i+1,k-1}(u)]}{u_{i+k} - u_{i+1}}$$

Az összefüggésben megjelenik u_i az un. csomóponti vektor eleme, amely nem csökkenő egészszámokat jelenthet (a szomszédos csomópontok közötti „távolság” ha egyforma, akkor un. „uniform” spline-ről beszélünk). A csomópont vektorra igaz, hogy:

$$u_j = \begin{cases} 0, & \text{ha } j < k \\ j - k + 1, & \text{ha } k \leq j \leq n \\ n - k + 2, & \text{ha } j > n \end{cases}, \quad (7.40)$$

és a felosztások számára fennáll, hogy

$$0 \leq j \leq n+k$$

A fentiek alapján a következők beláthatók:

$$\sum_{i=0}^n N_{i,k}(u) = 1$$

$$N_{i,k}(u) = 0, \quad \text{ha } u \notin [u_i, u_{i+k+1}], \text{ a bázisfüggvény az adott környezeten kívül zérus}$$

A jelzett tulajdonságok miatt a következők állapíthatók még meg:

- a görbe lokálisan vezérelhető, a kontrollponttól távol (k szegmensnél túl) a módosítás hatása nem jelentkezik;
- Ha növeljük a görbe fokszámát, a vonalvezetés „simábbá” válik (a görbe k -szor differenciálható). $k=2$ (elsőfokú görbe) esetében a kontroll poligont kapjuk, $k=1$ („nullad fokú polinóm”) magukat a pontokat eredményezik.
- Amennyiben $k=n+1$ (vagyis a fokszám megegyezik a pontok számával) Bezier spline-t kapunk.

Az előzők alapján a B-spline felület leírása az alábbi formában lehetséges:

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v); \quad 0 \leq u \leq u_{\max}, \quad 0 \leq v \leq v_{\max} \quad (7.41)$$

Természetesen a B-spline felület megőrzi a B-spline görbe előnyös tulajdonságait (lokális vezérelhetőség, fokszámok $/k-1, l-1/$ szabad meghatározhatóságának a lehetősége).

A CAD/CAM gyakorlatban és általában a számítógépes grafikában a felületek ábrázolásának szempontjából kitüntetett jelentősége van a NURBS felületeknek. Maga a kifejezés az angol „Non Uniform Rational B-spline” elnevezésből származik, vagyis olyan B-spline görbék használatára épül, amelyeknél a csomópontvektor egyes elemei nem egyenletes térközre

helyezkednek el. Továbbá az eddigi gyakorlattal ellentétben a bázisfüggvények polinomok hányadosaként kerülnek definiálásra. Kétségtelen, hogy ezzel az ábrázolás matematikailag összetettebb feladattá válik (például egy kör megadása hagyományosan 7 skalárral megoldható, míg NURBS esetében ehhez 38 adat szükséges), az előnyös tulajdonságok miatt a használatuk a CAD/CAM gyakorlatban egyeduralkodóvá vált. Hiszen a görbék (és az ezeken alapuló felületek) rendelkeznek az előzőekben tárgyalt objektumtípusok kedvező sajátosságaival (problémamentes transzformációs lehetőségek, invariancia, lokális vezérelhetőség stb.), sőt a NURBS alkalmazása alkalmat ad arra, hogy valamennyi görbetípust (analitikus, szintetikus) ugyanazzal az algoritmussal definiáljunk, amely a szoftverek grafikus magjának tervezését nagymértékben leegyszerűsíti.

A racionális B-spline definiálására alkalmas bázisfüggvényt – amely a korábbi nem racionális esettel analóg tulajdonságokat hordoz – formailag az alábbi alakban írhatjuk le:

$$R_{i,k}(u) = \frac{w_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n w_i N_{i,k}(u)} \quad (7.42)$$

Látható, hogy az összefüggés a klasszikus B-spline bázisfüggvény-típusának súlyozásával áll elő, formailag az egyes kontrollpontok „jelentőségét” a w_i tényezővel módosíthatjuk.

Ezzel a NURBS görbék generálására alkalmas összefüggés – a korábbi leírásokhoz hasonló formát ölt:

$$P(u) = \frac{\sum_{i=0}^n P_i w_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n w_i N_{i,k}(u)} \quad 0 \leq u \leq u_{\max}; \quad (7.43)$$

Az összefüggésből látható, hogy az egyes w_i „súlyok”, hogyan hatnak a görbe alakjára az egyes kontrollpontokban, illetve az is egyértelmű, hogy azonos súlyválasztás (mondjuk egységesen 1) esetében a görbe „nem racionális” válik. Azaz ismét egy olyan görbeosztályt ismertünk meg, amely valamilyen módon az előző kiterjesztéseként értelmezhető (speciális esetben a NURBS NUBS formát vesz fel). És amennyiben a csomópontvektort is uniform (azonos térfölöket tartalmazó) módon hozzuk létre a görbe általános B-spline alakot ölt.

Belátható, hogy az előzőek alapján egy egyenes NURBS alapú leírása a következő formát ölti:

$$P(u) = \frac{P_0 w_1 (1-u) + P_1 w_2 u}{w_1 (1-u) + w_2 u} \quad 0 \leq u \leq u_{\max}; \quad (7.43)$$

ahol P_0 és P_1 az egyenest definiáló 2 pont.

Vegyük észre, hogy ha a w súlyokat egységnyire választjuk az összefüggés a 2.7-ben már megismert klasszikus alakot veszi fel:

$$P(u) = P_0 (1-u) + P_1 u \quad 0 \leq u \leq u_{\max}; \quad (7.44)$$

A NURBS alapú megoldás „általános” jellegét jól tükrözi, hogy a $w_1=1$ és $w_2=0$ súlyválasztás az egyenest a P_0 ponttá torzítja, míg például a $w_1=1$ és $w_2=0,5$ verzió egy olyan szakaszt definiál, ahol a P_0 pont hatása erősebb.

Ha a NURBS görbékét alkalmazzuk a szabadfelület előállítására, akkor a korábban már vázolt felület-leírási mód az alábbira módosul:

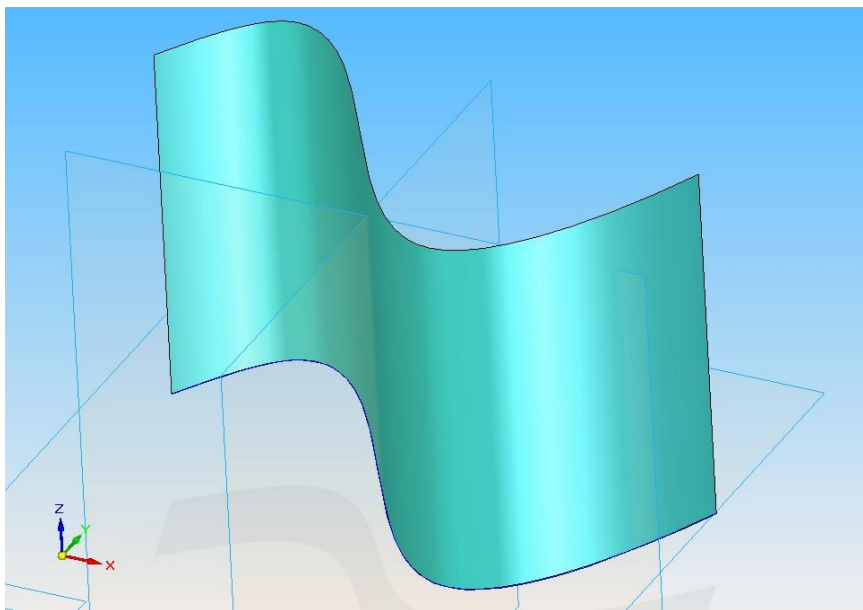
$$P(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m P_{i,j} R_{i,k}(u) R_{j,l}(v); \quad 0 \leq u \leq u_{\max}, 0 \leq v \leq v_{\max} \quad (7.44)$$

7.3. Jellemző felület-műveletek CAD rendszerekben

A különböző számítógépest tervezői rendszerekben az előzőekben tárgyalt felület típusok – a megadott elméleti megfontolásokon alapulva – de a felhasználó számára könnyen kezelhető és elsajátítható formában előállíthatók. Bár a konkrét lépések eltérhetnek (parancsok/műveletek megnevezése, input adat megadási lehetőségek stb.) a jellegzetes eljárások minden esetben beazonosíthatók. A gyakorlati alkalmazások során a bemeneti adatok (pontok, távolságok, szögek, relatív helyzet-kényszerek stb.) megadására is többféle megoldás létezik (még egy konkrét szoftver-implementáció esetében is). A hiányzó (vagy elvileg téves) adatokra a rendszer figyelmeztet, ugyanakkor körültekintően kell eljárunk, hiszen bonyolultabb esetekben egy rosszul megadott input adat következtében a felület integritása sérülhet, illetve nem a tervezői szándéknak megfelelő forma áll elő. A következő fejezetben - a teljesség igénye nélkül - néhány felülettípus megvalósításának gyakorlatára mutatunk be példát (a bemutatott ábrák SolidEdge szoftver felhasználásával készültek).

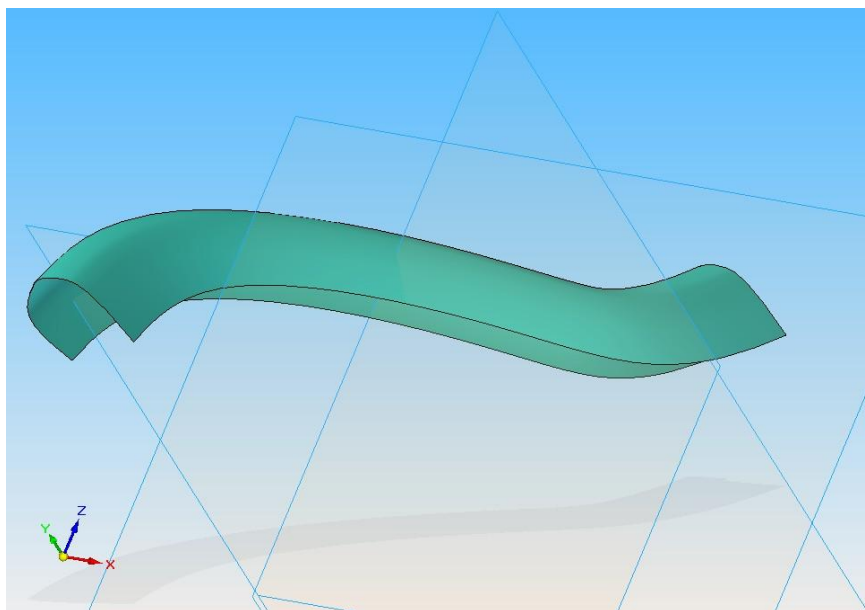
7.3.1. Felületek előállítása kihúzással

Egy görbe adott irányú elmozdítása (kihúzása) ún. tabulált felületet eredményez. A felület alakját meghatározó görbe létrehozható egyszerű geometriai elemekből (egyenes, körív) illetve általános esetben B-spline (vagy NURBS) felhasználásával. Ez utóbbiak az alakját a kontrollpontok és az ezekhez tartozó irányvektorok helyzete határozza meg. Spline alkalmazása esetén elvileg korlátlan számú kontrollpont létrehozható, ezzel finomítva a létrehozott felület alakpontosságát.



7.7. ábra. Tabulált felület létrehozása

A pásztázás a kihúzott felületek egy speciális osztályát képezi. Ebben az esetben a felület valamely görbének egy másik görbe mentén való végigvezetésével állítható elő. Mindkét görbe egyaránt lehet nyitott vagy zárt. A két görbe által létrehozott egyszerű pásztázáson kívül vezérgörbék alkalmazásával bonyolultabb felépítésű összetett felületek is szerkeszthetők, akár több zárt görbe (keresztmetszet) átmeneteinek kialakításával.

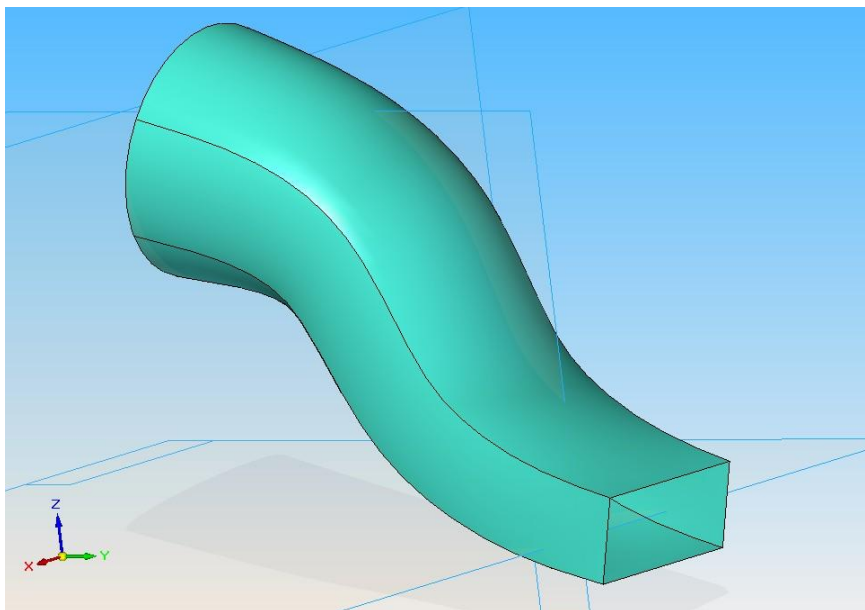


7.7. ábra. Pásztázott (swept) felület létrehozása

Speciális pásztázott felület érhető el, ha a keresztmetszetek a kihúzás során változnak. Ebben az esetben különleges átmeneti felületeket is elő lehet állítani.

Profilok közötti átmenet készítéséhez legalább két, egymástól megfelelő távolságra elhelyezkedő keresztmetszet szükség. A profilok egyaránt lehetnek nyitottak és zártak, de a két típus egymással nem kombinálható. A profilokat tartalmazó síkok egymáshoz képesti elhelyezkedése tetszőleges. Egyszerű esetben a két profil közötti legrövidebb út mentén jön létre a felület. Vezérgörbék használatával a profilok közötti útvonal, ezáltal a felület kialakítása igény szerint szerkeszthető. A vezérgörbe céljára rendszerint nyitott profil alkalmazható.

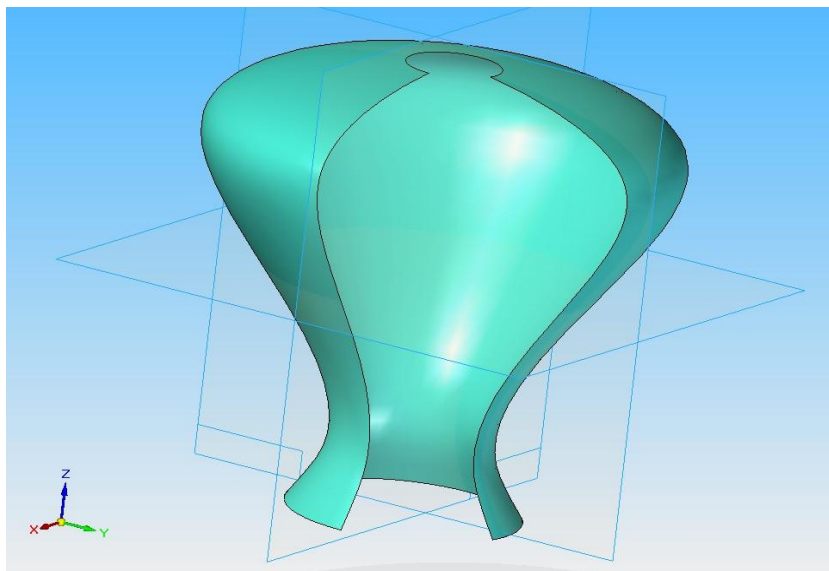
A tervezés során figyelmesnek kell lenni a különböző keresztmetszetek egymásnak megfelelő pontjainak definiálása során. Ellenkező esetben a felületen nem kívánt csavarodás léphet fel.



7.7. ábra. Pásztázott átmeneti (kör-téglalap) felület létrehozása

7.3.2. Forgásfelület (revolved surface)

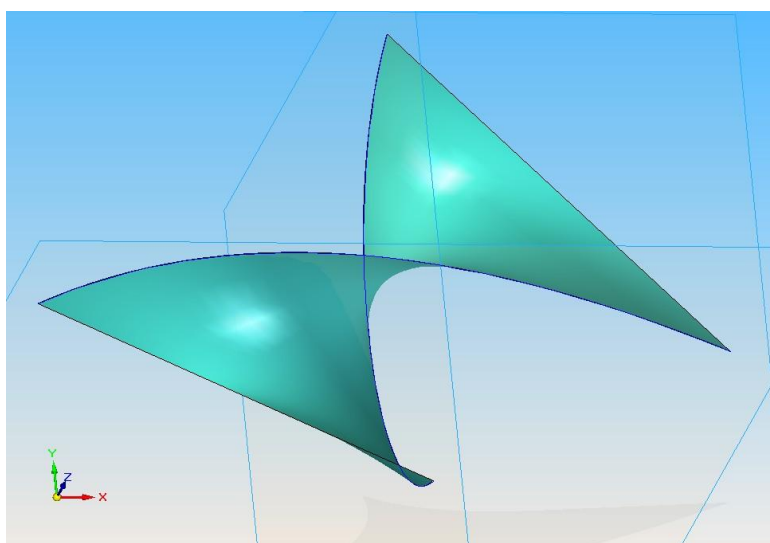
Valamely görbe egy központi tengely körüli elmozdításával forgásfelület hozható létre. A forgásfelület létrehozására alkalmazott görbe lehet nyitott vagy zárt, a tengelyt minden esetben egy egyenes alkotja. A felület létrehozásának alapvető feltétele, hogy a profil nem keresztezheti a forgástengelyként használt egyenest. A 7.8 ábrán jól látható a B-spline profil, amelyet a koordinátasíkok metszészvonala körül forgattunk meg. Az ábrán látható konkrét esetben profil nyitott és a körbeforgatás mértéke sem éri el a 360° fokot.



7.8. ábra. Forgásfelület létrehozása

7.3.3. Szorzatfelületek előállítása

Természetesen az előző fejezetben bemutatott szorzatfelületek is előállíthatók a tervezői rendszerek segítségével. A 7.9 ábrán látható felület két B-spline definiálásával jött létre, úgy, hogy két görbét egymáson kölcsönösen végigfuttatjuk (ez az eljárás megfelel a 7.41 összefüggés alkalmazásának). A spline-okat leíró geometriai entitások változtatásával rendkívül változatos felületkombinációkat hozhatunk létre.



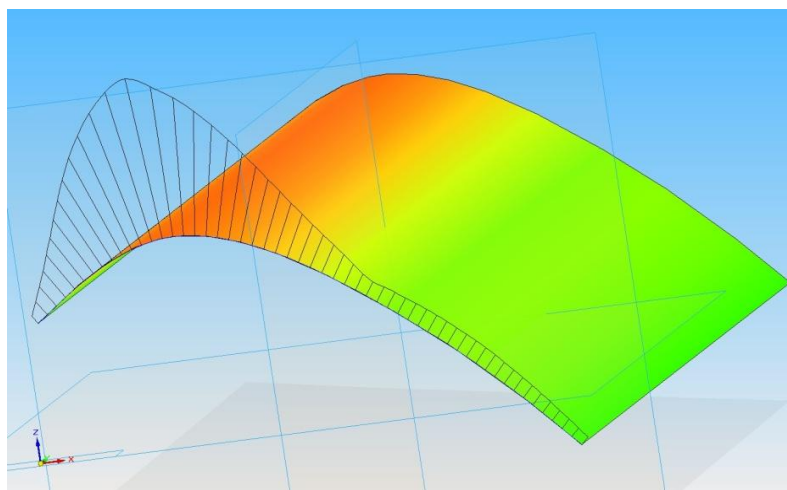
7.9. ábra. Összetett- (szorzat) felület létrehozása

7.3.4. Felületek ellenőrzése

A gyakorlatban előállított felületek során gyakran szükségessé válhat a felületek ellenőrzése. A több felület-elem kapcsolódásának vizuális ellenőrzésére bevált eszköz az ún. zebracsíkozás alkalmazása. Ezzel a módszerrel a kapcsolódó felületek folytonosságát, illetve a folytonosság minőségét lehet kontrollálni. Az eszköz csíkokat vetít a felületre és a mintázat alapján láthatóvá válik a folytonosság jellege (G^0 folytonosság esetén a felületek érintkeznek, de az érintők és görbületek eltérőek. Ilyen esetben a csíkozás elcsúszik. G^1 folytonosság esetén már közös érintő húzható a két csatlakozó felülethez, de a görbületi sugár eltér. Ilyenkor a zebracsíkok folytonosak, de megtörnek. G^2 esetben a folytonosságot a közös görbület is jelzi a csatlakozás mentén, a csíkozás törésmentesen folytatódik). A 710. ábrán jól látható a hengerpalást és az alapkör csatlakozásánál a G^0 folytonosság, míg a paláston a G^2). A felületi görbületek ellenőrzésére a tervezői rendszerek képesek megjeleníteni vizuálisan is ezt a felületjellemzőt. A 7.11 ábra erre az ellenőrzési módszerre mutat be példát.



7.10. ábra. Egy henger zebracsíkozással



7.11. ábra. Felületek görbületanalízise

Gyakorló feladat:

1. Írja fel az egységnyi sugarú origó középpontú henger felületének parametrikus egyenletét, ha az alapkör az X-Y síkban található és a henger Z irányú palásthossza kétegységnyi.

A jelzett kör az X-Y síkban parametrikusan az alábbi összefüggéssel írható le:

$$\mathbf{P}_{(u)} = \begin{bmatrix} \cos(2\pi \cdot u) \\ \sin(2\pi \cdot u) \\ 0 \end{bmatrix}; \quad 0 \leq u \leq 1$$

Így a felület egyenlete – felhasználva a 7.13 összefüggést :

$$\mathbf{P}_{(u,v)} = \begin{bmatrix} \cos(2\pi \cdot u) \\ \sin(2\pi \cdot u) \\ 0 \end{bmatrix} + v \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(2\pi \cdot u) \\ \sin(2\pi \cdot u) \\ 2 \cdot v \end{bmatrix}; \quad 0 \leq u, v \leq 1$$

8. KONSTRUKCIÓK, ÖSSZEÁLLÍTÁSOK MODELLEZÉSE

**Szerző:
Rabb László**

A gépészeti gyakorlatban a konstrukciók, összeállítások egy tervezett készülék vagy gyártmány egy részegységének vagy egészének összeszerelését jelenti az őt alkotó alkatrészekből. Mivel a konstrukció kifejezés tágabb értelmű, jelen esetben szabatosabb kifejezés az összeállítás vagy **szerelés**, ez utóbbi utal a kivitelezés technológiájára mint átfogó műveletre emiatt a továbbiakban ezt használjuk. (Szerelési technológia alatt értjük az összes oldható, oldhatatlan mechanikai kapcsolatot létesítő eljárást; pl csavar, szegecs kötés, csapágyazás, kényszerpálya, ragasztás, hegesztés stb.)

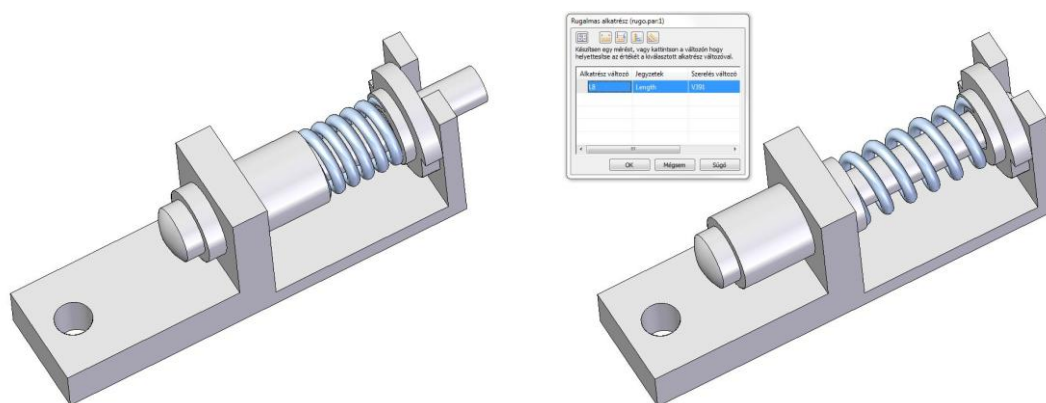
8.1. A szerelés definíciója, fajtái

A szerelés a szerelésben résztvevő alkatrészeket geometriailag egymáshoz rendeli, a térbeli szabad elmozdulásukat, a szabadságfokukat korlátozza, vagy elveszi kényszerek alkalmazásával. Jelen leírás tárgya a szilárdtest modellezést, emiatt érvényes az axióma, hogy egy adott alkatrész térbeli helyzetét 3 egymástól független pontja definiálja, 3 pont helyzete pedig 6 egymástól független mozgást tesz lehetővé. Ez azt jelenti, hogy kinematikai szempontból 6-os szabadságfoka van az alkatrésznek, a helyzete 6-os rendszámúan határozatlan, sőt ha az időben is vizsgálat tárgya az alkatrész pozíciója, akkor ez 7. (Az idő önmagában skalár, tehát nincs önálló iránya vagy perdülete.) A szerelés a kényszerek egymás utáni alkalmazásával a szabadságfokok elvétele, ezzel a határozatlanság megszüntetése. Egy-egy kényszer nem feltétlenül csak egy –egy szabadságfokot szüntet meg, az egy kényszer által határozottá tett szabadságfokok száma a kényszer rendszáma. (Egy adott kényszert matematikailag egy egyenlet, a kényszeregyenlet definiál és ebben több változó is szerepelhet.)

Ha csak geometriai pozíciókat vizsgálunk akkor reonom kényszerleírásról és passzív vagy geometriai kényszerekről, ha az időt is figyelembe kell venni, akkor szkleronom kényszerleírásokról és aktív vagy kinematikai kényszerekről beszélünk.

8.1.1. Topológiai és geometriai definíciók

A szerelés **manifold** (tehát sokoldalú de leképezhető) saját terére vonatkozólag, vagyis az alkatrészek elemei a szerelэшalmaznak. Ez a tény független attól, hogy egy-egy adott alkatrész manifold vagy non-manifold, ha a szerelésben résztvevő kényszerek olyan alkatelemekre vonatkoznak, amik teljesítik a szilárdtestmodell manifolddivitását. Emiatt bizonyos trükkökkel rugalmas, deformálható alkatrészek is lehetnek egy szerelésben, ilyenkor valójában ugyanazon alkatrész több szilárdtest reprezentációjáról van szó, ahol mindig csak az éppen aktuális látható és aktív. Ilyen például a sok tervezőrendszerben megjelenő rugómodellezés (8.1. ábra)

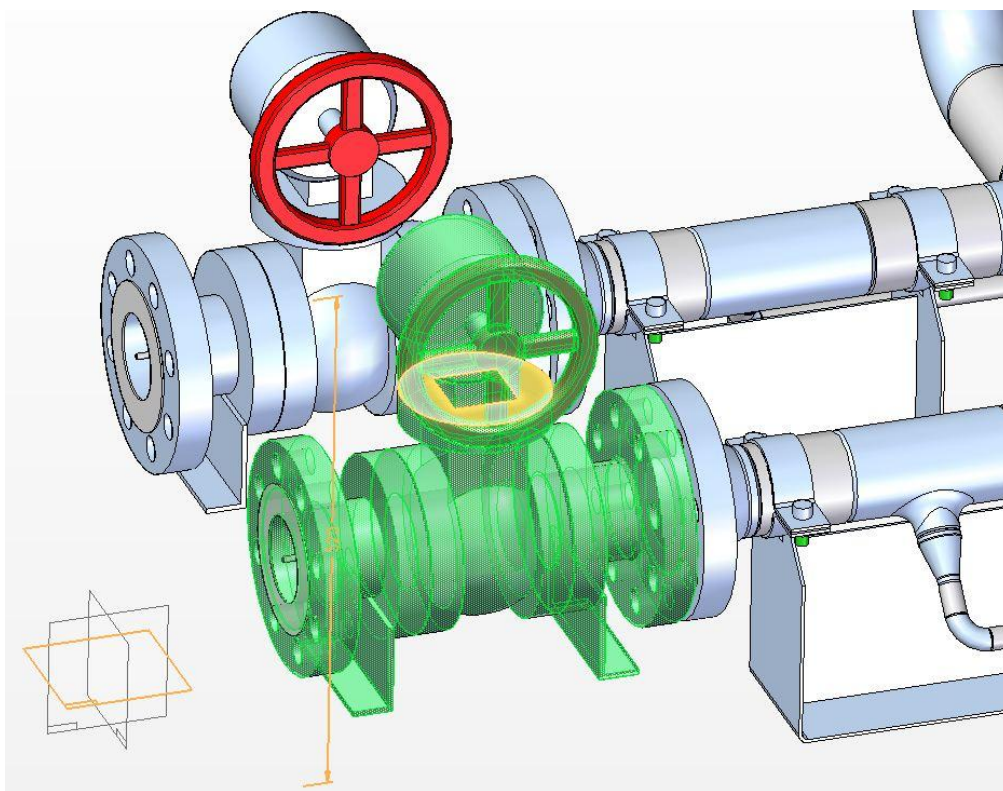


8.1. ábra. Egy rugó két működési helyzetében, szerelési változóval vezérelve

A geometriai kényszerek esetében a kényszerkapcsolat háromféle lehet; pontszerű, vonal menti és felület menti. A felület menti kényszerkapcsolat olyan felület mentén képzelhető el, amelyik önmaga mentén elmozdítható, ilyenek a sík, gömb, henger, forgásfelület és csavarfelület (helicoid, catenoid) Ezek a kényszerek a bennük résztvevő alkatrészekre kommutatívak, vagyis indifferentek, hogy milyen sorrendben választjuk ki az alkatrészeket. Ezeket a kényszereket alsórendű kényszereknek nevezzük.

A vonal menti és pontbeli kényszerkapcsolat esetében a kényszerben lévő alkatrészek kijelölése nem kommutatív, a kényszerkapcsolatot felsőrendűnek hívjuk. (Ez a tény egyben azt jelenti, hogy a szerelésben az ilyen kényszerek valószínűleg nem teljesítik az asszociativitást sem, tehát a kényszerek nem hozhatók létre tetszőleges sorrendben.)

Általánosságban az az ajánlott, hogy először a felsőrendű, majd az alsórendű kényszereket hozzuk létre. Ha a kényszerezés során előfordul az az eset, hogy az utolsónak alkalmazott kényszer túlhatározottá tenné a kényszeret – vagyis a kapcsolat szabadságfoka 0-nál kisebb lenne elméletileg – létrejöhét a **lebegő** határozottság. Ebben az esetben az alkalmazott kényszer több szabadságfokot tenne határozottá, de csak a felsőbbrendűt (-eket) definiálja, az alsóbbrendűt (-eket) pedig nem teljesíti. Ilyen például az alábbi alkatrész beszerelésben az utolsó síkra fektetési kényszer (8.2. ábra). Ebben az esetben az alsórendű kényszernek is megszűnik a kommutativitása, de asszociatív marad.



8.2. ábra. A kiválasztással zöldre színezett elzáró szerelvény először hengeres kényszerrel a cső nyomvonalához lett kötve, majd a kezelőszervi karima sík síkillesztési kényszerrel a bal-alsó sarokban látható referenciasíkhöz. A sík normálisát felvette a karimasík, de tőle egy „lebegő”, normálirányú távolságot kellett felvennie.

Általában a „lebegő” kényszer egyenes mentén (transzláció) elmozdulással létrejövő távolságméretet jelent, ugyanis a lekötendő szabadságfokokon belül is érvényesül a felsőbb-alsóbb rendűség, a rotáció pedig felsőbbrendű mint a transzláció. (A normálvektor rögzítése a hozzá

tartozó felület másik két tengely körüli forgatását zárja ki.) Elvileg elképzelhető „lebegő” szögméret is, de a fenti okok miatt ezt nem szokás alkalmazni a modellező rendszerekben.

8.1.2. A szerelési módszerek történeti fejlődése

A szerelések összeállítási módszerei egyrészt a modellező mód által meghatározott lehetőségek szerint alakultak, másrészt a modell által tartalmazott adatok féleségének és kezelési módjának megfelelő adatbázis kezelési lehetőségek függvényei.

Történeti sorrendben a szerelések összeállítási technikája a következő lépésekben fejlődött:

- A szilárdtest modellező rendszerek eleinte többnyire a CSG reprezentációt használták, az alkatrészek pozicionálására az alsórendű kényszerek alkalmazása a jellemző. A kényszerek alkotta szerelési struktúra kezelése az esetek többségében halmazműveletekkel történik az alkatrész építés analógiájának megfelelően.
- A CSG reprezentációk mellett főleg a forgácsoló megmunkálások technológiai követelményei által ösztönözve megjelenik a BR, eleinte itt is az alsórendű kényszerek alkalmazásával, a szerelési struktúra pedig faszerkezetű a technológiai hierarchiának megfelelően.
- A BR módszer lehetővé teszi a parametrikus modellezést, ez a paraméterezhetőség megjelenik a szerelési kényszerek adatainak paraméterezhetőségében is. Az alkatrészek építési történetének analógiájára a szereléstörténet alkalmazása terjed.
- A szereléstörténet lehetővé teszi a nem kommutatív és nem asszociatív kényszerek alkalmazását is, egyre inkább megszokottá válik a különféle felsőrendű kényszerek használata.
- Időközben kialakul a modell-történet független direkt modellezés (vagy explicit) eleinte ezen rendszerek szerelési funkcióiban jelentkezik az igény az idő mint változó önálló kezelésére. Ez a folyamat indukálja a passzív kényszerek mellett az aktív kényszerek megjelenését.
- Megjelennek a parametrikus rendszerekben is az aktív kényszerek, ezzel párhuzamosan elindul a deformálható alkatrészek valamilyen szintű kezelhetőségének igénye.
- Mind a parametrikus, mind a direkt rendszerekben megjelennek a deformálható alkatrészek egy-egy speciális csoportjának kezelhetősége, ezek a megoldások valójában a szilárdtest alkatrészmodell multiplikációi.
- A direkt és parametrikus modellezés integrációjával kialakul a szinkron technológia ez lehetővé teszi hogy a szerelésekben szereléstörténet nélkül is felsőrendű kényszerek legyenek alkalmazhatóak. (A direkt modellezési, szerelési módszerek a rendelkezésre álló aktuális geometria vizsgálatát is elvégzik, ezáltal a kényszerek geometriai peremfeltételei definiálják a lehetséges kényszer sorrendiséget a felsőrendű esetekben.)
- Jelenleg a deformálható szerelésekben történő alkatrészek korrekt kezelése (változó sűrűség), az aktív kényszerek folyamatos dinamikai elemzése és a kényszerek elhelyezésének minél teljesebb automatizálása a geometriai alakfelismerések alapján a cél.
- A jövő tervezőrendszereiben a szerelésekben várhatóan komplett mechanizmusok teljeskörű kinematikai elemzése is lehetséges lesz.

8.1.3. Szerelések nem geometria tulajdonságai

A szerelésekre ugyanaz az alapaxióma igaz mint az alkatrészmodellre; a 3D-s modell tartalmazza lehetőleg az összes alkatrésztre vonatkozó információt valamilyen módon, ezáltal biztosítsa az összes e modellt használó tervezőfunkció egységes és konzisztens adatforrását.

Itt általában szervezési és gyártási, nem geometriai adatokról van szó. Az előbbi körbe tartozik pl. az azonosító, rajzszám, projektazonosító stb. az utóbbi csoportba a műszaki és technológiai paraméterek, gyártásvezérlési és műveletvégzési, mérési adatok. Egy egyszerű gyakorlati példa látható alább (8.3. ábra)

Tulajdonság kezelő

Fájltypus:

Szintek nélkül

☒ Darabjegyzék

Megnevezés	mkg	DN	ISO_...	ISO_Boltt...	ISO_BO...	ISO_CLASS	ISO_BOL...	ISO_C...	ISO_CATEGORY
Tompahegeszthető acél könyök, 90o-os / buttwelding steel...	0,000 kg					5		18	FABRICATION
Tompahegeszthető acél könyök, 90o-os / buttwelding steel...	0,000 kg					5		18	FABRICATION
Hegztoldatos acél karima, szádos / Welding neck, tongue Fa...	1,200 kg	4,000			70,00 mm	7	12,000	35	FABRICATION
Hegztoldatos acél karima, hornyos / Welding neck, groove F...	1,200 kg	4,000			70,00 mm	7	12,000	35	FABRICATION
Hegztoldatos acél karima, szádos / Welding neck, tongue Fa...	2,640 kg	4,000			90,00 mm	7	16,000	35	FABRICATION
Hegztoldatos acél karima, szádos / Welding neck, tongue Fa...	6,380 kg	4,000			110,00 mn	7	24,000	35	FABRICATION
Hegztoldatos acél karima, hornyos / Welding neck, groove F...	6,380 kg	4,000			110,00 mn	7	24,000	35	FABRICATION
Hegztoldatos acél karima, szádos / Welding neck, tongue Fa...	10,300 kg	8,000			120,00 mn	7	24,000	35	FABRICATION
IBC lapostömítés / Flat Gasket, IBC-type_EN 1514-1	0,000 kg				55,00 mm	2	12,000	21	ERECTION
IBC lapostömítés / Flat Gasket, IBC-type_EN 1514-1	0,000 kg				65,00 mm	2	16,000	21	ERECTION
IBC lapostömítés / Flat Gasket, IBC-type_EN 1514-1	0,000 kg				75,00 mm	2	20,000	21	ERECTION
IBC lapostömítés / Flat Gasket, IBC-type_EN 1514-1	0,000 kg				80,00 mm	2	20,000	21	ERECTION
Csőszakasz címke (LABEL)-pont / ISO Label Branch						19			
Isometria osztópont / ISO Split Point						18			

OK

Mégsem

Súgó

8.3. ábra. A csővezetéki modelltörzsrészlet egyéni jellemzőinek egy táblázatrészlete, amit az egyéb-ként általános célú, volumetrikus modellezőrendszer az alkatrészekhez társítva implicit kezel.

Jól látható, hogy sok csőtervezés technológiai –ISO- paraméter és adat szerepel, vagyis a rendszer egyúttal gyártástámogató (kivitelezői) funkciókat is biztosít.

8.2. Kényszerek

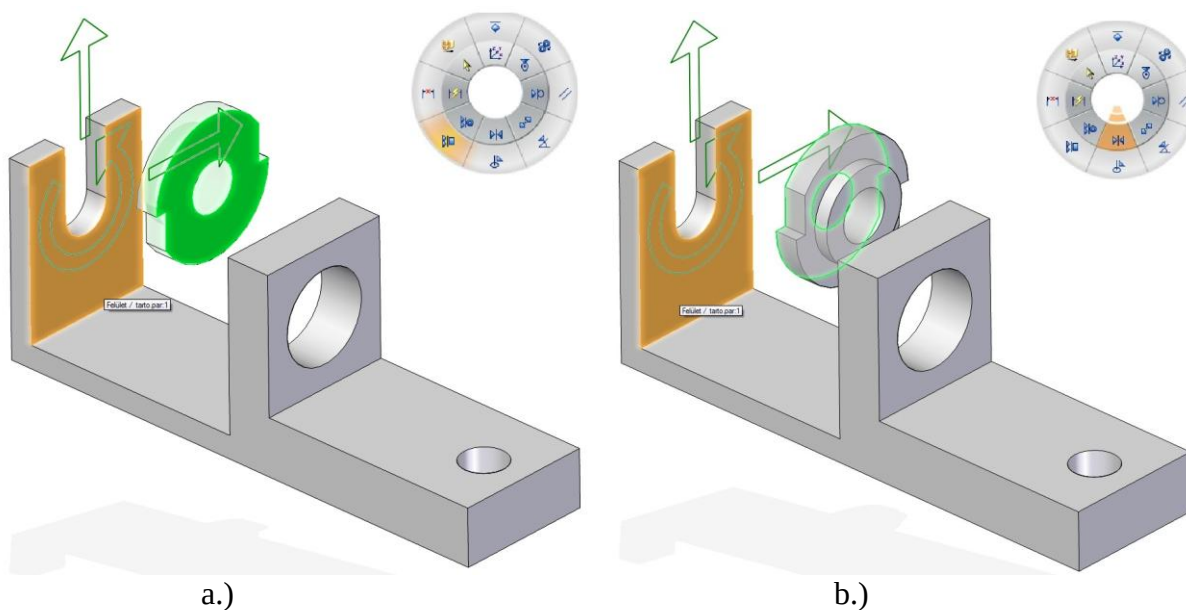
8.2.1. Geometriai, passzív kényszerek

A kényszerek a tervezőrendszerekben általában nem vegytiszta geometriai formula alakjában használhatóak, hanem a gyártás során is használható alkatrész szerelésbe pozicionálási analógiáknak megfelelőek. E szerint sokszor egy kényszer nem tisztán alsó vagy felsőrendű, homogén, hanem heterogén is lehet.

A pozicionálás az a folyamat, melynek során az adott alkatrészt alkalmazzuk a kényszereket, ezzel a határozatlansága (szabadságfoka) folyamatosan csökken, ha eléri a 0-át az alkatrész pozíciója (elhelyezkedése) teljesen határozott. Egy-egy kényszer egyszerre több szabadságfokot is megszüntet, ezáltal jöhet létre a túlhatározottság, melynek eredménye a már említett lebegő kényszer.

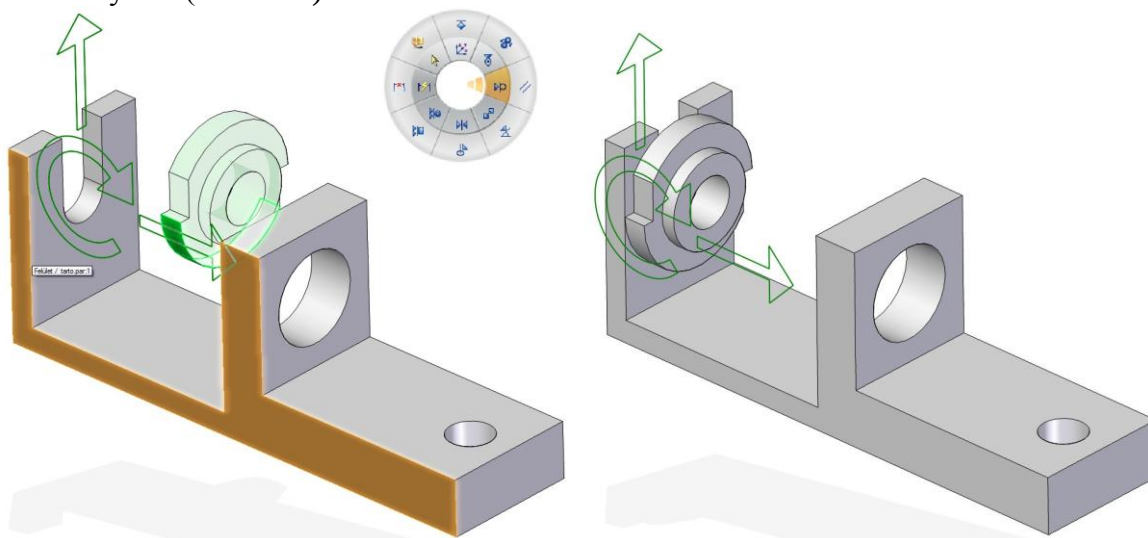
8.2.1.1. Leggyakoribb homogén, passzív kényszerek

Alapvető alsórendű kényszer a síkra illesztés. Két variánsát szokás megkülönböztetni, az **illesztés** azonos irányú normálisok szerint pozicionál, a **fektetés** szembefordítja a normálisokat. (Az alkatrész határoló felületén a normális mindig az anyagból kifelé mutat.) A kényszer rendszáma 3 (8.4. ábra).



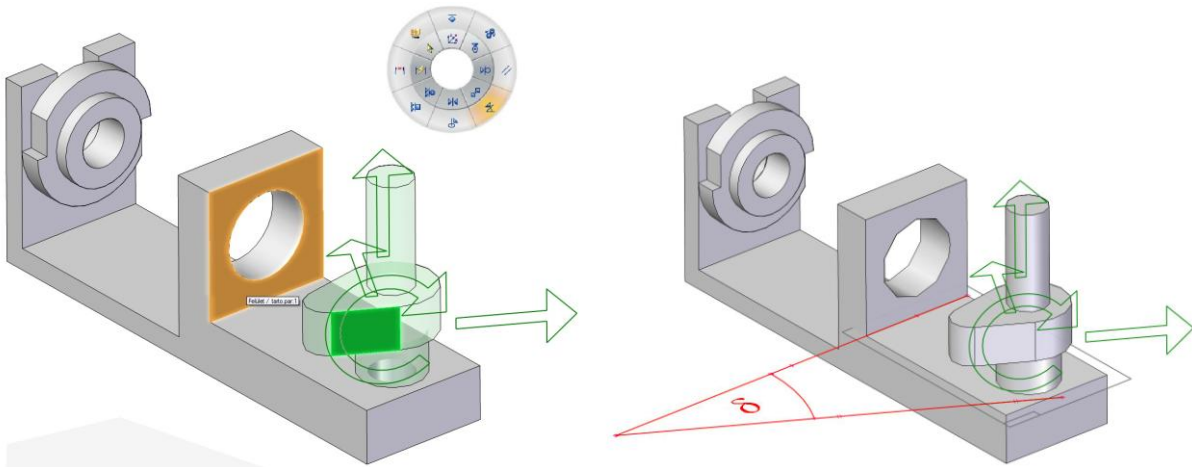
8.4. ábra. A nyilak a kényszer által szabadon hagyott mozgathatóságokat mutatják (szabadságfokok), a beszerelendő alkatrész kapcsolódó síkja zöld, a célalkatrésze narancs. Az a., eset a fektetés a b., eset a sík illesztés pozícionálását mutatja.

Az **érintő** (A felületek érintési pontjában a két alkatrész érintősíkjai vannak fektetve) kényszer matematikailag a sík fektetés kényszerre vezethető vissza, szintén 3 rendszámú alsórendű kényszer (8.5. ábra).



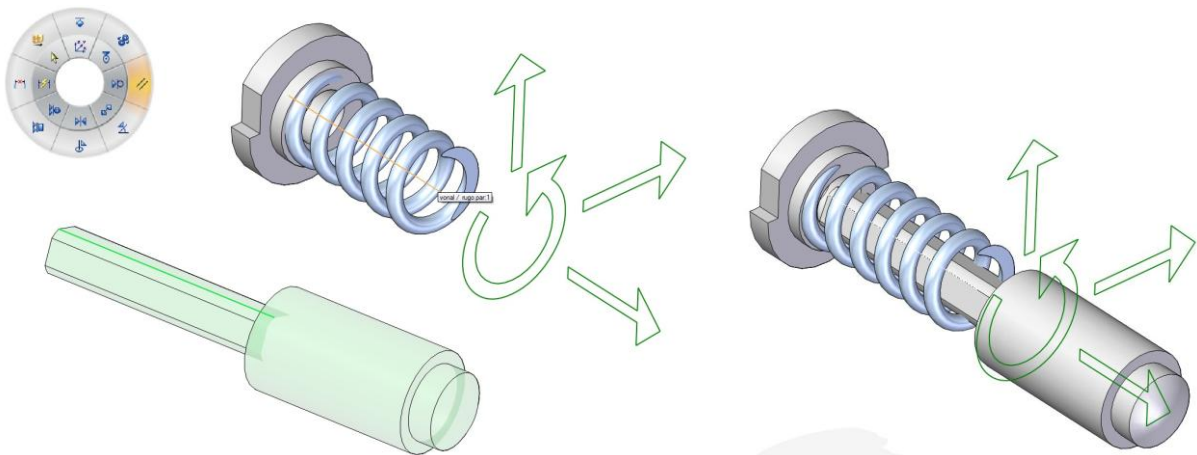
8.5. ábra. Baloldalt a pozicionálási fázis, jobboldalt az alkatrész behelyezett állapota látható. Itt hengerfelület érint síkfelületet.

A **szög** kényszer általában az alkatrészek sík felületei között értelmezhető, 2-es rendszámú, alsórendű kényszer (8.6. ábra).



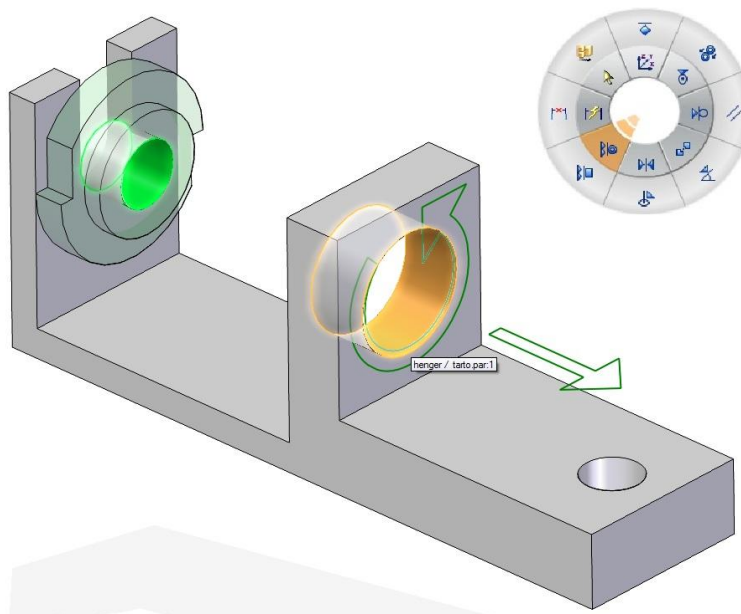
8.6. ábra. Baloldalt a pozicionálási fázis, jobboldalt az alkatrész behelyezett állapota látható. A pozicionáláskor kiválasztott, egymással szöget bezáró síkok a jobboldali ábrán látható- az előbbi két síkra merőleges- síkon méretezhetőek szögérték szerint.

A **párhuzamos** kényszer egyenes szakaszok vagy egyes szakasz és egyenes alkotójú felület között létesíthető, ahol az egyik egyenesre (tengely, alkatrész határoló éle) merőleges síkon bárhol lehet a másik egyenes dőléspontja. Ennek megfelelően ez 2-es rendszámú, alsórendű kényszer (8.7. ábra). Egyes tervezőrendszerek esetében ez a kényszer a behelyezendő és a célalkatrész kiválasztott egyenesét egyúttal azonos egyenesbe kényszeríti, ekkor már felsőrendű, 4-es rendszámú kényszerként kell kezelni.



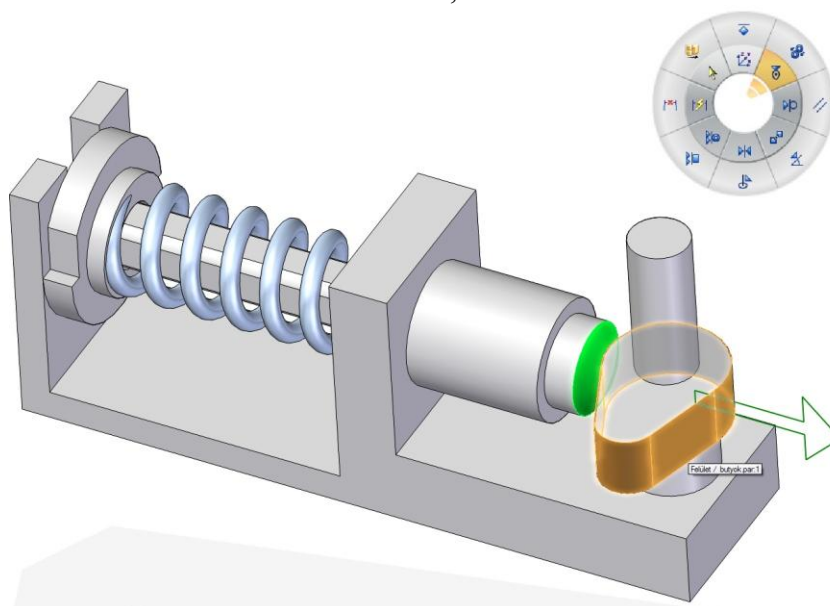
8.7. ábra. Baloldalt a pozicionálási fázis, mint látható a hengeres jellegű rugótengelyhez kell illeszteni a sokszögkeresztmetszetű hasábbal képviselt alkatrészt. Jobboldalt az alkatrész behelyezett állapota látható, nem centrikus, a hasáb alkotó éle párhuzamos a rugótengellyel, és az ezekre merőleges síkban az alkatrész még mozgatható.

A **hengeres illesztés**, bár nevében felületillesztés (koncentrikus hengerfelületek), valójában egy felsőrendű, a tengelyhez, mint vonalhoz való kényszervezést takar. A tengelyek itt a forgásfelületek tengelyvonalai. (Mivel forgásfelületről van szó, nem csupán henger, hanem kúp-felület esetében is működik.) A kényszer 4-es rendszámú (8.8. ábra).



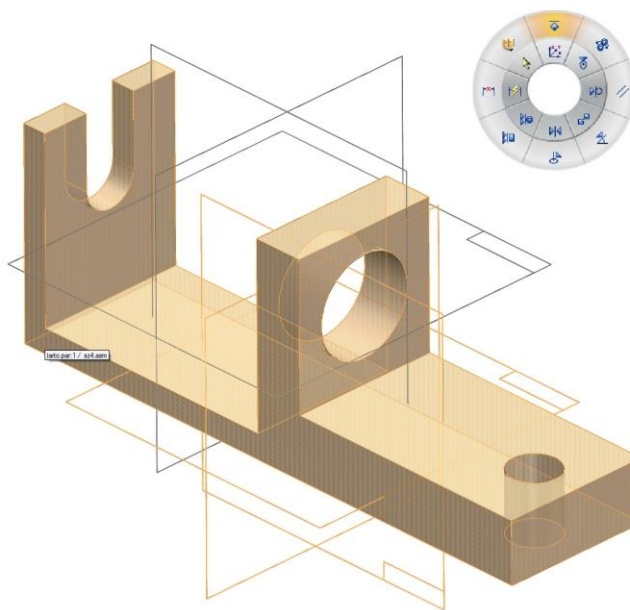
8.8. ábra. Hengeres kényszer, felfogható a párhuzamos kényszer egy olyan speciális esetének, ahol a kiválasztott tengelyek nem csupán párhuzamosak, hanem egybe is esnek.

Elterjedt még a **vezérpálya** kényszer, ez felsőrendű, 5-ös rendszámú (8.9. ábra). Ez a kinematikailag még szabadságfokot hagyó legmagasabb rendű, homogén kényszer, habár eredendő mozgások definiálása esetén használatos, esetenként statikusan is alkalmazható.



8.9. ábra. Klasszikus vezérpálya kényszer, a bűtökprofilos test palástfelülete vezérli a kényszerrel illesztett hengeres csap gömbfelületét. A felületek folyamatos érintőkényszerben vannak az idő változásával.

Totális, teljes határozottságot, adó kényszerek a **földhöz kötés** és a **koordináta-rendszer illesztés**. Értelmszerűen mindkettő rendszáma 6, a koordináta-rendszer illesztés egy megadott lokális koordináta-rendszerhez kényszeríti az alkatrész, a földhöz kötés a globális koordináta-rendszerhez kényszerít (8.10. ábra).

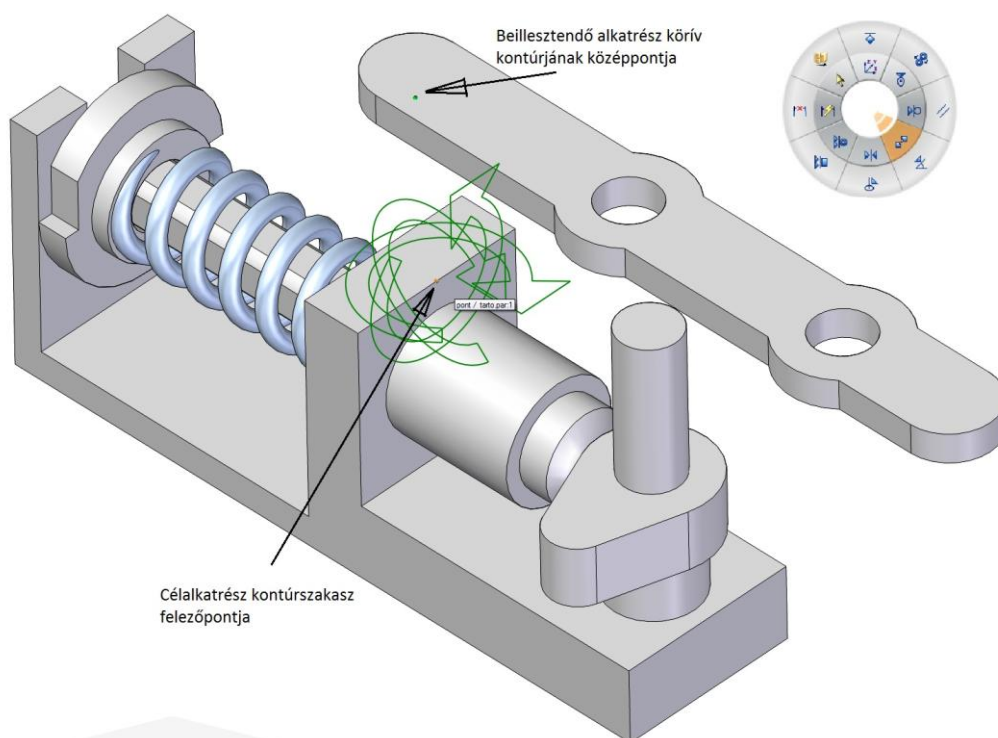


8.10. ábra. Fekete vonallal láthatóak a globális koordinátarendszer – föld – referenciasíkjai. A földhöz kötés az alkatrészt az aktuális állapotában rögzíti ebben a koordinátarendszerben.

8.2.1.2. Leggyakoribb heterogén, passzív kényszerek

Tipikus heterogén kényszer a **kapcsolódás**, a rendszáma is változó attól függően, hogy a kényszerben résztvevő alkatrészeknek milyen típusú sajátosságát szerepeltetjük (8.11. ábra). A lehetséges kapcsolatok;

Résztvevő sajátosságok (pl. megvalósítás)	Rendszám	Rendűség
pont-pont (gömbcsukló)	3	alsó
pont-vonal (gömbcsukló+csúszka)	2	alsó
pont-felület (gömbcsukló+csúszkapár)	1	alsó
vonál-vonal → párhuzamos (csukló+csúszka)	4	felső
vonál-felület → nem értelmezett		



8.11. ábra. Az ábrázolt eset egy pont-pont kapcsolódásra mutat példát. (Az egyszerűbb kezelhetőség miatt itt a beillesztendő alkatrész alsó oldalának síkfelülete már fektetve van a célalkatrész vállának felső síkfelületére, a gyakorlatban ennél a kényszernél ez többségében ilyen sorrendben célszerű.)

A gépészeti gyakorlat egyik legelterjedtebb kényszere a **behelyez**. Ez is heterogén kényszer, nem más mint a hengeres illesztés és a sík fektetés kényszerek együttes alkalmazása, felsőrendű és a rendszáma 5. (A kényszeren belül a fektetés és a hengeres illesztés kommutatív.) Megjegyezendő, hogy a hengere és sík felületek kényszerben való kiválasztása egyébként is a legáltalánosabb, és a különféle tervezőrendszer specifikus gyorsillesztési, alakfelismerésen alapuló és szimmetriakényszerek mind a behelyez kényszer analógiájából kiinduló módszereken alapulnak. Mindezek kialakítását az teszi lehetővé, hogy e két felület összeillesztése az esetek többségében bár geometriailag többféleképp is lehetséges, de gépészeti technológiailag csak egy értelmezhető eredményt ad, a "lebegő" távolságméretezés meg biztosítja a túlhatározottság feloldását.

8.2.2. Kinematikai, aktív kényszerek

Minden szerelésre igaz, hogy statikusan vizsgálva vagy teljesen határozott, tehát alkatrészeinek a szabadságfoka egyenként 0, vagy rendelkezik 0-nál nagyobb szabadságfokkal (tehát alulhatározott) alkatrészekkel. Csak ez utóbbi esetben lehetséges a szabadságfokokkal rendelkező alkatrészek mozgatása, tehát lehetséges az idő függvényében meghatározni az alkatrész pozícióit, definiálhatóak aktív kényszerek. Az alkatrészek mozgásának kétféle oka lehetséges, vagy egy mozgást előidéző kényszer mozgatja közvetlenül, vagy egy másik, mozgó alkatrészszel van kényszerkapcsolatban tehát közvetett-kényszerített mozgást végez.

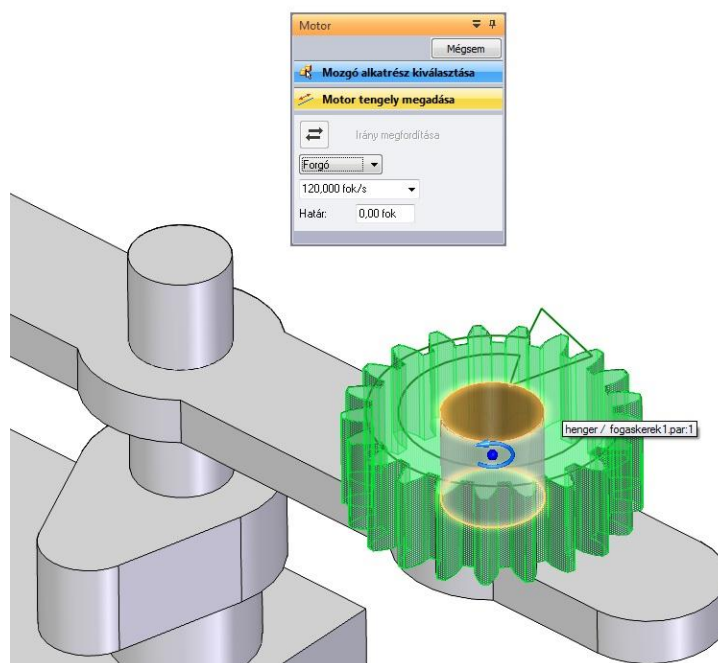
Sok esetben a tervezőrendszerekben a kinematikai elemzés egy önálló funkció, vagy opcionális alrendszer, ahol a kinematikai terminológia szerinti kényszerezéseket lehet definiálni. (Csukló, tengely, gömbcsukló, csúszka stb.) Ezek azonban mindig a már tárgyalt geometriai

kényszerekre épülő, rendszeresen heterogén kényszercsoportok, ahol minimum 1 szabadságfoka marad a kényszerítés után a vizsgált alkatrésznek. A kinematikai vizsgálatok során pont a szereléskor megfogalmazott cél ellentéte a kíváncsi, ugyanis míg az előbbi esetben az alkatrész teljes körű pozicionálására törekszünk, utóbbi esetben a kinematikai kapcsolatok (kényszerek) által korlátozott módon, minél szabadabban mozgatni kívánjuk az alkatrészt. A mozgások során az alkatrészek egymásra hatása az **ütközés**, ebben az esetben tisztán geometriai feltételekkel definiált.

A dinamikai vizsgálatok mindig a már definiált kinematikai kapcsolatokra épülnek. Az alkatrészek dinamikai egymásra hatását **fizikai működés** terminológiával szokás illetni.

8.2.2.1. Direkt aktív (forrás) kényszerek

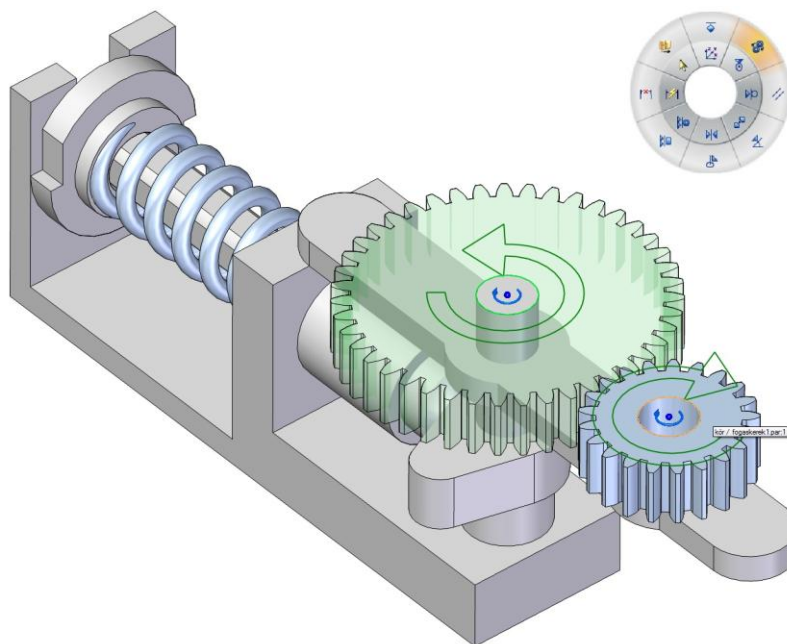
Közvetlenül az alkatrészek mozgatását **motor** kényszerek végzik. Forgó vagy haladó mozgáskényszer köthető az alkatrész egy kiválasztott geometriai sajátosságához, mint tengelyhez (8.12. ábra). Terminológiailag sok esetben nem kényszerként kezeli a motorokat több tervezőrendszer, holott ez a legalapvetőbb kinematikai kényszer.



8.12. ábra. A meghajtó motort egy fogaskerékhez rendeli a kényszer

8.2.2.2. Indirekt aktív (közvetítő) kényszerek

Forgatható alkatrészeket tartalmazó szerelések alapvető, alsórendű kényszere a **hajtás**. Ez egy speciális, a forgómozgás tengelyéhez kötött, felsőrendű kényszer, rendszáma 4. A kényszerített alkatrészek forgástengelyei egymással térbeli szöget zárhatnak be, ez azonban állandó (8.13. ábra).



8.13. ábra. A hajtás kényszermindig forgó alkatrészek között létesíthető, melyek tengelyei kitérők és/vagy szöget bezáróak is lehetnek, (Jelen esetben párhuzamosak.)

Másik jellemző kényszer az esetenként passzívként is használatos **vezérpálya** kényszer, ezt az előző csoportban már tárgyaltuk.

8.2.3. Technológiai kényszerek

A szerelést geometriailag nem befolyásoló, a szerelések nem geometriai adataira is vonatkozhatnak kényszerek, amik részben vagy egészben meghatározzák a szerelés struktúráját. (pl. metrikus menetű csavarra nem tehető colos anya, saválló acélhoz nem hegeszthető szénacél, alumínium öntvénybe nem hajtható facsavar stb.) Ezek a kényszerek a 8.1.3. pontban ismertetett adatcsoportban szerepelnek, mint műveletvezérlési adatok.

8.2.4. Struktúra kényszerek

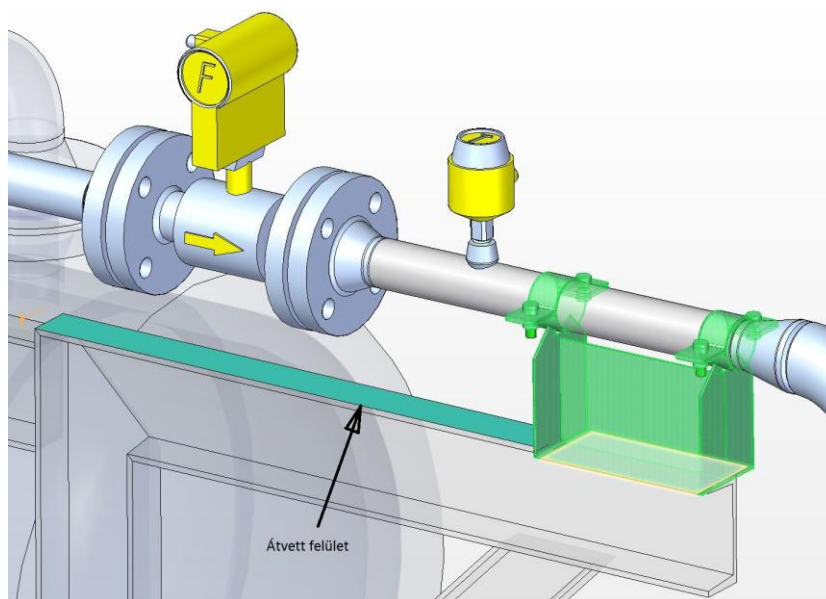
Az elnevezés részben becsapós, mert ugyanazon kényszerekről van szó, amiket eddig is tárgyaltunk, de nem önállóan használhatók, hanem egy-egy szerelési funkcióhoz rendelt, speciális kényszercsoportot fed.

Ezen kényszerféleségek közös jellemzője, hogy jellemzően nem feltétlenül egy alkatrészhez kötöttek, hanem alkatrészek funkcionális csoportjához. A csoport azonban a szerelési pozicionálás szempontjából egy alkatrészként viselkedik.

8.2.4.1. Indirekt alszerelési kényszer

Ha nem alkatrész, hanem az alkatrésszel analóg módon egy szerelést – továbbiakban alszerelést – pozicionálunk be a szerelésbe, az alszerelés mint csoport úgy viselkedik mint egy szokásos térfogati modellel reprezentált alkatrész, a 8.2.1-2.2 megismert kényszerek érvényesíthetők. Az alszerelésen belül a viszonyokat szintén a már ismert kényszerek szabják meg. A szerelési szintek között nem működtethetünk kényszereket, ha mégis ilyen összefüggések érvényesítésére van szükség vagy az adott alkatrészt a szerelési struktúrában át kell mozgatni vagy egy asszociatív sajátosságát segítségével közvetve kényszerezni. Az első esetben

teljesen szokásos kényszerről beszélünk, a második esetben közvetett –indirekt- az alszerelés alkatrészére vonatkozó kényszer. (Maga a kényszer teljesen szokványos, csak indirekt, a z asszociatív másolaton keresztül hat az alkatrésze.) (8.14. ábra)



8.14. ábra. A csőtartó talpa egy másik alszerelésben lévő tartószerkezet U-idomjának síkjához van fektetve. A kényszerezés elvégzéséhez acélfelület átvételre került az alkatrészmodellbe.

8.2.4.2. Konstruktív csoport

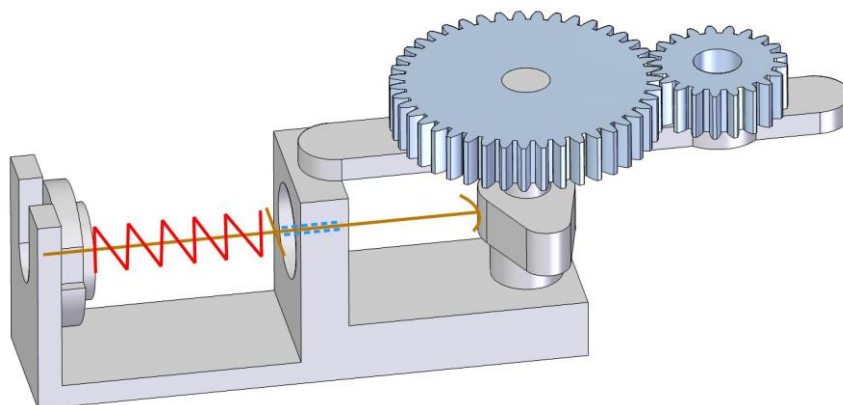
A szerelésben egy kijelölt alkatrészcsoportot önálló egységként kezelhetünk, az alszereléshez hasonlóan, de egyrészt ezek a beillesztés után a szerelés aktuális szintjén alkatrészként épülnek be, másrészt a célalkatrészen alakajátosság műveletet is generálnak. A pozicionáláskor a csoport készítésekor betanított kényszereket érvényesíthetünk. Ezek a kényszerek a szokásos kényszerek, közös jellemzőjük, hogy a konstrukciós csoporthoz kötöttek előre definiálással.

8.2.4.3. Reassembled (újraszertelt) alkatrész

Bármely alkatrész szerelésbe illesztése után a pozicionálását szabályzó kényszerek kapcsolhatók hozzá és ezt az alkatrészt elmentve, újra beépítve a betanított kényszerek automatikusan érvényesülhetnek. (A tervezőrendszerekben használatos szabványos és tipizált alkatrésztárak elemei általában implicit ilyenek.)

8.2.4.4. Virtualizációs kényszer

Sok esetben a tervezés egy adott fázisában a szerelés még csak elvileg összeállítható, ugyanis a szükséges alkatrészek modellje nem áll még rendelkezésre. A teljes szerelés logikailag helyes értelmezhetősége azonban megköveteli, hogy valamiféle adatot szerepeltessünk a modell tervezett pozíciójában. (például egy funkcionális vázlat, lásd 8.15 ábra) A modelltér manifold és reguláris tulajdonságainak biztosítására ezt az adatot úgy kell a szereléshez kapcsolni, hogy a struktúra kapcsolatrendszere ne sérüljön és globálisan teljes maradjon. Ez a csatolást biztosítja a virtuális kényszerezés.



8.15. ábra. A még nem modellezett rugószerelvényt egy tengelyvonalba eső síkban lévő vázlat – mint virtuális komponens - helyettesíti.

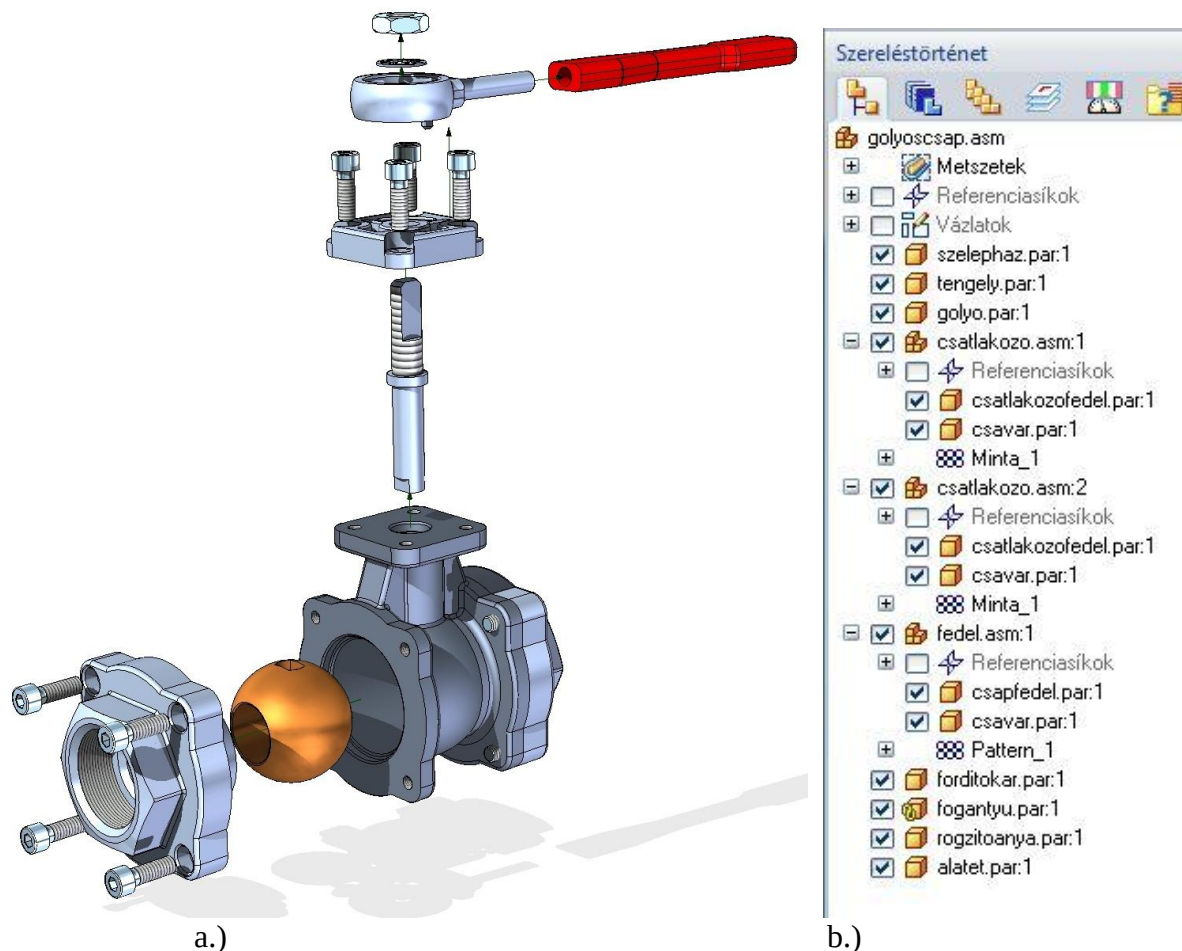
A virtuális, helyettesítő komponenseket általában 2 dimenziós vázlatok, fotók reprezentálják, emiatt általában a tervezőrendszerek a vázlatkészítéshez, 2D-s munkatérhez stb. kötik a pozicionálást.

8.3. Szerelésleírás, műveletek

8.3.1. Szerelési struktúra

A szerelés kialakítása során a szerelési szintek célszerűen követik a tervezendő konstrukció **funkcionális hierarchiáját**. A főösszeállítás tartalmazza a főbb alkotóelemeket, összefoglalóan **komponenseket**, amelyek lehetnek alkatrészek és szerelések egyaránt. Ez utóbbi esetben beszélünk alszerelésről, mely a szerelésből szemlélve az alkatrésszel azonos módon viselkedik, ugyanolyan kényszerek hatnak rá, ugyanazok a műveletek végezhetőek el vele. A szintek tagozódása lefelé – a tisztán alkatrészeket tartalmazó szintig – tetszőleges számú, és az egyes szintek nem jelentenek preferencia kijelölést. (Vagyis egy adott alszerelés egyenrangú egy másik alszereléssel, függetlenül attól, hogy pl. az 3 és 7 szinten vannak, mindaddig amíg nem áll fenn köztük apa-fió kapcsolat.) E tulajdonság következménye, hogy a struktúra szerkeszthető, pl. egy alszerelés elemei átmozgathatók egy feljebb lévő szintre.

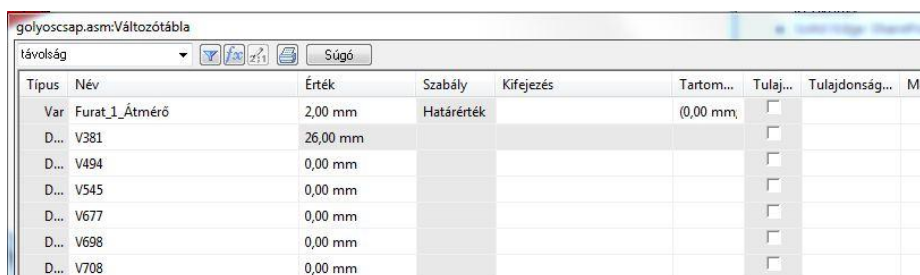
Egy alkatrész robbantott rajza (8.16.ábra) és a hozzá tartozó szereléstörténet jól mutatja a struktúra felépítését. Mint látható a főszerelés globális referenciapozíciójához kötődnek az alszerelések és alkatrészek lokális referenciái, vagyis koordinátarendszerei. Ezek pozíciói a geometriai kényszerek következményei.



8.16. ábra. Az a., képen látható a komplett szerelés robbantott kép, egy golyóscsap, ahol a csatlakozófedelek a rögzítő csavarokkal, valamint a felső tengelyfedél a csavarjaival alszerelvényben helyezkedik el. A b., képen látható a szerelés tervezőrendszerbeli leírása, szereléstörténettel.

A példából is láthatóan a szerelési struktúra kötelezően tartalmazza a szerelés felépítését, a kényszereket (Ezek a megfelelő tételekhez csatolódnak) és nem kötelezően még egyéb elemeket is, mindazon leírásokat és opcionális modelleket amiket az adott tervezőrendszer megvalósít. Ez utóbbiakat összefoglalóan additív entitásoknak nevezzük és a későbbiekben még szó lesz róluk.

A kényszerekhez tartozó változók paramétertáblában (8.17. ábra) kezelhetők, a leírási mód általában megegyezik a parametrikus testmodellezés során alkalmazott alkatrész változó-tábla formátumával. A szerelés során is megkülönböztethetünk parametrikus, direkt és szinkron technológiát, azonban a kényszerekhez tartozó paramétertábla egyaránt jellemző bármely technológiát alkalmazó rendszerre.



Tipus	Név	Érték	Szabály	Kifejezés	Tartom...	Tulaj...	Tulajdonság...	Me
Var	Furat_1_Átmérő	2,00 mm	Határérték		(0,00 mm	☐		
D...	V381	26,00 mm				☐		
D...	V494	0,00 mm				☐		
D...	V545	0,00 mm				☐		
D...	V677	0,00 mm				☐		
D...	V698	0,00 mm				☐		
D...	V708	0,00 mm				☐		

8.17. ábra. A példa golyoscsap paramétertáblájának egy részlete

8.3.2. Szerelési környezetben végzett műveletek

A szerelések legfontosabb és meghatározó művelete maga az összeszerelés, ami a kényszertípusok kiválasztásából, a pozicionálásból és a lehetséges paraméterek megadásából áll. A szerelés további kezelését a módosítási, szerkesztő, additív, vizsgálati és applikációs műveletek jelentik.

8.3.2.1. Módosítási műveletek

A módosításoknak két csoportja lehetséges, a struktúrakezelések és a geometriai módosítások.

A struktúrakezelés a szerelési hierarchiában végzett műveleteket jelenti, pl. alkatrészcsere, feljebb léptetés a szerelési szintben, alszerelés készítése kiválasztott alkatrészcsoporthoz, szerelési csoportkészítés és szerelések közötti alkatrésztranszferek.

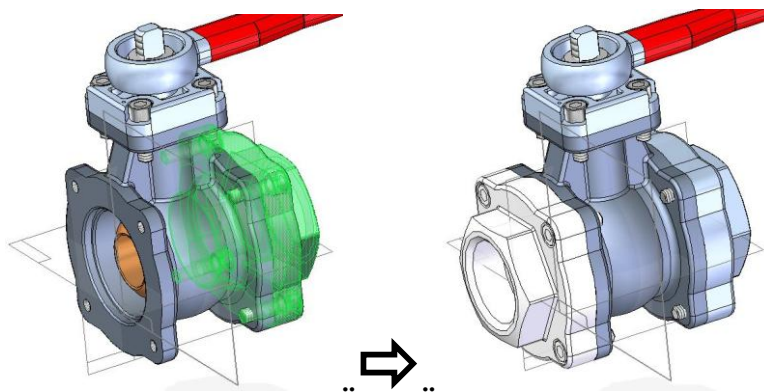
A geometriai módosítások a komponensek átpozicionálását jelentik, ezek geometriai transzformációk, egyenes vonalú mozgatás, forgatás (transzláció, rotáció) és ezek tetszőleges kombinációja.

8.3.2.2. Szerkesztő műveletek

Itt az összeszerelés alaplépéseinek különböző szintű és összetételű összevonásáról van szó. A szerelésben résztvevő komponensek valamilyen – általában geometriai- tulajdonságát kihasználva bizonyos műveletsorokat automatizáltan, csoportosan hajt végre a tervezőrendszer. Tipikus példa erre az alkatrészek tükrözése (8.18. ábra) és mintába (8.19. ábra) kiosztása.



8.18. ábra. Egy alkatrész (csavar) kör, furatmintába kiosztása

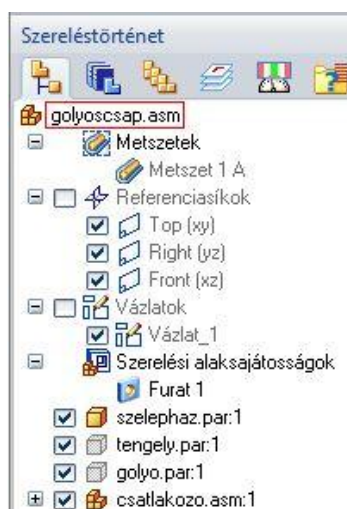


8.19. ábra. Egy alszerelés(csatlakozófedél a rögzítőcsavarjaival) tükrözése

8.3.2.3. Additív műveletek

A 8.3.1. pontban már említett módon a szerelés nem csupán a tervezett alkatrészek és az azokból készült szerelések geometriai modelljét és nem geometriai adatait tartalmazza, hanem ugyanennek az objektumnak további, párhuzamosan létező, modelljei, részletmodelljei is vannak. Ezek lehetnek valódi 3D-s modellek, de 2D-s reprezentációk is.

Ilyenek pl. a szereléshez kapcsolt vázlatok, gyártási, szerelési méretmegadások, szerelési modellnézetek, egyszerűsített modellreprezentáció, csak a szerelésben jelenlévő komponens, alakcsatlakozás. Ezek természetesen részei a szerelési fának (8.20.ábra)



8.20. ábra. A "szelepház" nevű komponens az első tervezett modellkomponens, a felette lévő tételek a referenciasíkok kivételével az additív adatleírások részei.

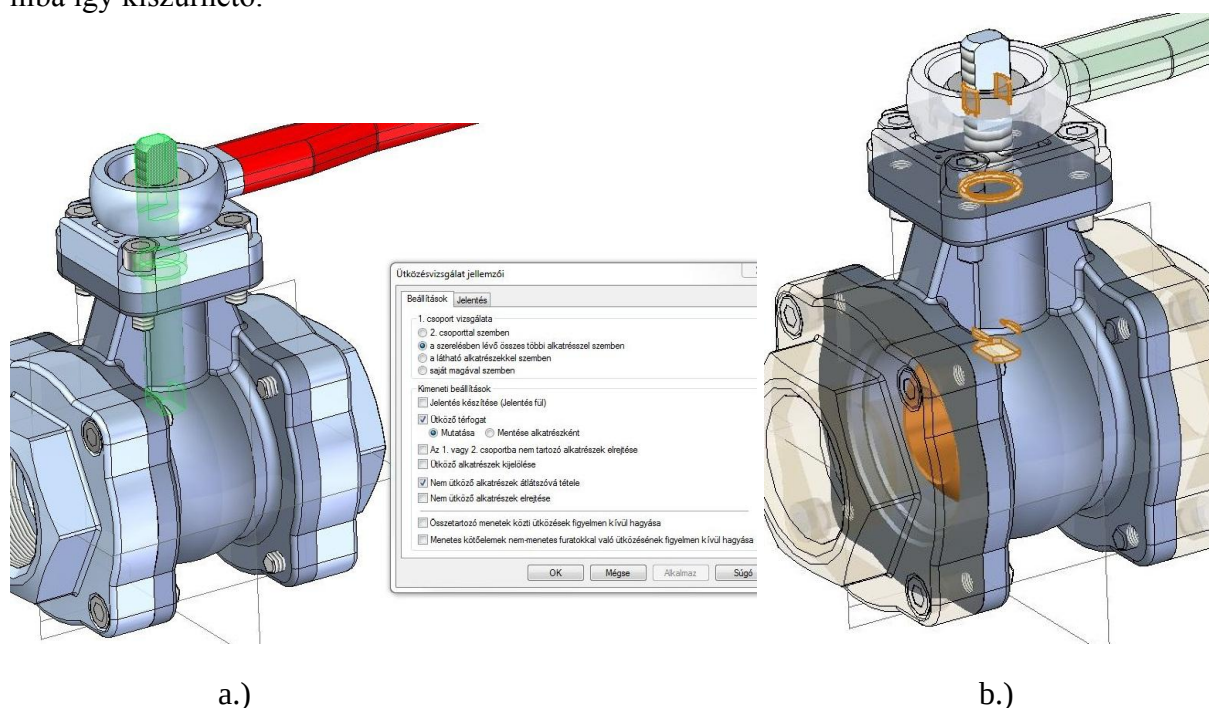
8.3.2.4. Vizsgálati műveletek

A vizsgálati műveletek a szerelés valamilyen szempontból történő elemzését, tulajdonságainak rendezését, átszámítását, célirányos szélsőérték keresését jelenti. A vizsgálati műveletek kétféleképp is osztályozhatók; egyrészt az időbeli lefolyást tekintve **statikus** és **dinamikus**, a kezelt adatfészeket tekintve **geometriai** (szokás emlegetni analitikai-nak), **kinematikai**, **fizikai** és **statisztikai**.

Sok esetben egy vizsgálatfajta esetenként lehet statikus (pl. egy ütközésvizsgálat a szerelés elemzésekor) és máskor dinamikus (pl. ütközésvizsgálat a komponens mozgathatóságakor.) A je-

lenlegi fejlesztési tendenciák szerint már a szerelések létrehozásakor célszerű az alapvető vizsgálatokat automatikusan és valós időben elvégezni, és ezek megfelelő paraméterezésére és kezelésére szolgálnak a **szenzorok** (érzékelők)

A geometriai vizsgálatok közül a legalapvetőbb és a leggyakrabban használt az ütközés-vizsgálat, ez a vizsgált alkatrész vagy szerelés geometriai áthatását -boole-algebrai viszonyát- vizsgálja a célalkatrésszel vagy szereléssel. (Egyúttal történeti magyarázat is az ütközés-vizsgálat általánossá válására, ugyanis úgy is feltehetjük a kérdést; van e közös része A komponensnek B komponenssel. És mint ismeretes a CSG modellek voltak az úttörők a testmodellezésben, ez a kérdés meg már akkor könnyen értelmezhető volt.) Hogy az egyszerű szerelések esetében is hasznos, arra egy példa (8.21. ábra) a már ismert golyóscsap tengelyének egy kis elmozdítása milyen ütközéseket okoz. Egyszerű szemrevételezésnél nem biztos, hogy minden hiba így kiszűrhető.



8.21. ábra. Az a., ábrán látható, hogy a tengelykijelölt ütközésvizsgálatra, az összes többi alkatrésszel szemben, a b., képen pedig az eredmény látható. A nem ütköző alkatrészek átlátszóak, az ütközési térfogat pedig narancsszínnel kiemelt.

Geometriai műveletek körébe tartoznak a különböző mérések, távolságlekérdezések, 2D-s és 3D-s információlekérdezések. Ezek módjai nagyrészt a modellezési technika függvényei, illetve a felhasználói felület kialakításának következményei.

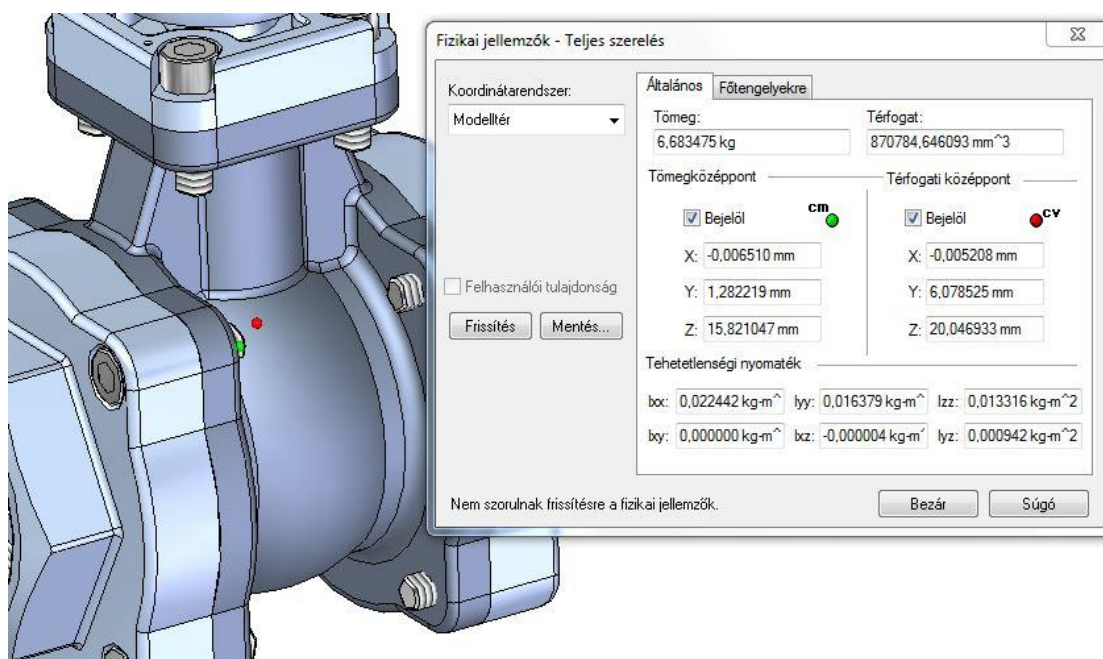
Kinematikai műveletek az alkatrészek mozgásával kapcsolatos elemzések. Itt általában három szintet különböztethetünk meg:

- A komponensek mozgása egy adott szerelési szinten. A mozgások a motor kényszerekkel paraméterezhetők és animációs megoldásokkal lehet a hatásokat elemezni. A mozgások során lehetőség van geometriai és fizikai elemzésre, vagy eleve ennek megfelelő szenzorok alkalmazására.
- A komponenseket több szerelési szinten keresztül kell végrehajtani, ekkor az alszerelések nem viselkedhetnek merev testként, tehát nem normál komponensek. A

modell manifoldivitásának és regularizáltságának megtartására a **beállítható szerelés** fogalmát vezették be, itt valójában a beállított alszerelésnek több belső modellje van, az eljárás a rugalmas alkatrészek kezeléséhez hasonlitos.

- Teljeskörű kinematikai analízis. Ebben az esetben a teljes szerelésnek egy önálló, párhuzamos kényszerkapcsolati fája keletkezik, amiben az összes elem azonos hierarchiába kerül a mozgatási koordinátarendszerben. A vizsgálat ebben a kinematikai fában történik meg és az eredmények visszairódnak a megfelelő modellstruktúrápárba.

Fizikai vizsgálatok a fizikai jellemzőkre vonatkoznak, ilyen statikus adatok láthatóak az alábbi ábrán (8.22. ábra)



8.22. ábra. Mint látható a skalár adatokon túlmenően a geometriához rendelt fizikai jellemzők is rendelkezésre állnak. (pl. tömegközéppont)

Statisztikai adatok a szerelés struktúrára vonatkoznak (8.23. ábra)

Statistika a szerelésről

Szerelés fájl neve: golyoscsap.asm

Összes alkatrész:	22	Összes alszerelés:	4
Különböző alkatrészek:	10	Különböző alszerelések:	3
Egyszerűsített alkatrészek:	0	Egyszerűsített alszerelések:	0
Összes szint:	2	Összes idegen dokumentum:	0
		Dokumentum teljes mérete:	7,78MB

Dokumentum név	Típus	Betöltött...	Fájl méret	Darab
alatet.par	Alkatrész	Inaktív	372,00KB	1
csapfedel.par	Alkatrész	Aktív	1,08MB	1
csatlakozo.asm	Szerelés	Aktív	124,50KB	2
csatlakozo_tkrztt.asm	Szerelés	Aktív	112,50KB	1
csatlakozofedel.par	Alkatrész	Inaktív	791,00KB	2
csavar.par	Alkatrész	Aktív	267,50KB	12
fedel.asm	Szerelés	Aktív	125,00KB	1
foganty.par	Alkatrész	Aktív	491,00KB	1
forditokar.par	Alkatrész	Aktív	658,00KB	1
golyo.par	Alkatrész	Inaktív	243,00KB	1
rogzitoanya.par	Alkatrész	Aktív	299,00KB	1
szelephaz.par	Alkatrész	Aktív	2,91MB	1
tengely.par	Alkatrész	Inaktív	212,00KB	1

8.23. ábra. A fentiekben például szolgáló golyóscsap szerelési statisztikája

8.3.2.5. Applikációs műveletek

A szerelésen belül kialakultak tipikus, felhasználói terület által jól definiált eljárások, ezek a területen érvényesülő szabályok széleskörű alkalmazásával a szerelési folyamatot erőteljesen tudják automatizálni, illetve a makró technikával analóg eljárásokat definiálva a szerelés lépéseit drasztikusan lerövidítik. Ezek egy-egy önálló funkcióként, **applikáció**ként szerepelnek a tervezőrendszerekben és a velük elvégezhető műveletek specializáltak.

8.3.3. Additív entitások

A 8.3.2.3. pontban már szó volt az additív műveletekről, az ott leírt műveleteket az additív entitásokon hajthatjuk végre. Elvileg végtelen számosságú és féleségű additív elem csatolható a geometriai modellhez, a gyakorlatban azonban a következő komponensek a meghatározóan fontosak egy szerelés esetén.

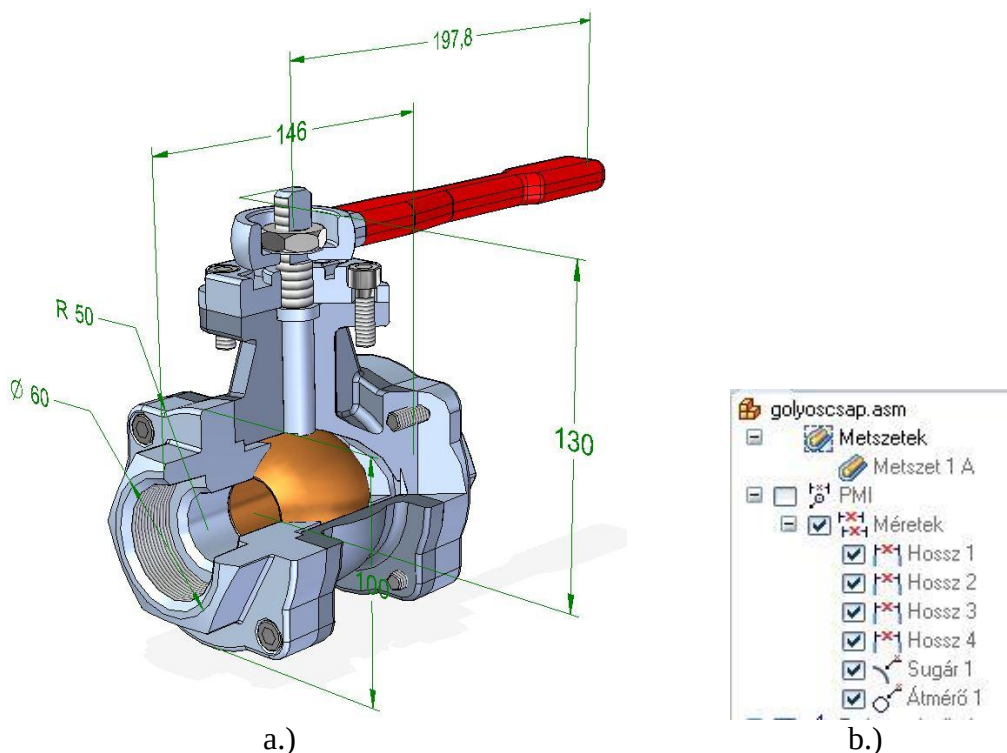
8.3.3.1. Szerelési vázlatok

Az összeszerelés elvégzéséhez, a mozgatások megtervezéséhez, a kényszerkapcsolatok összeláncolásához, az egyes szerelések közötti elemek átvételéhez 2D-s segédletként használhatók vázlatok, amelyek csak az adott szerelési környezetben érvényesíthetők, vagy átmásolhatók másik szerelésekbe. Paraméteres modellezésnél kevésbé, a direkt módszerekben erőteljesebben használatosak.

8.3.3.2. Szerelési-gyártási modellnézetek

A tervezett szerelvény legyártásához szükség lehet magyarázó metszetekre, nézetekre is, amelyet nem a műhelyrajz készítés során kell elkészíteni, mert egyrészt az a kívánatos, ha a modell minden az alkatrészek elkészítéséhez szükséges adatot tartalmaz, másrészt lehet, hogy a gyártó nem is használ műhelyrajzot, hanem a modell alapján készíti az legyártási technológiát és programokat. A modellnézet egy önálló 3D reprezentáció és a hozzá kapcsolt 2D-s nézeti

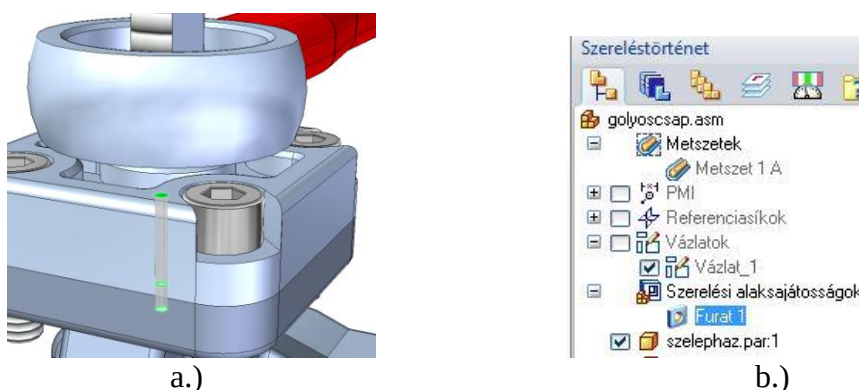
elemek (8.24. ábra). A gyártási modellnézethez a megmunkálási - angol rövidítéssel PMI (Product Manufacturing Information)- adatok kapcsolódnak



8.24. ábra. Az a., ábrán látható egy szerelési 3D-s metszet, a b., ábra a hozzá tartozó szereléstörténeti részletet mutatja

8.3.3.3. Szerelési alaksajátosságok

A szerelés technológiájához tartozhat, hogy olyan alakrész alaksajátosságot létrehozó, vagy módosító műveletet végzünk ami az alkatrész gyártásakor nem elvégezhető, ennél fogva a modelljében sem jelentkezhet. (pl. két alkatrész összefűrése a szerelés folyamán). (8.25. ábra)



8.25. ábra. Az a., képen a fedél és a szelepház szerelési összefűrásának kijelölése látható, a b., ábra a hozzá tartozó szereléstörténeti részletet mutatja

Szerelési alaksajátosságok általában az alkatrész modellezésnél is használatos kivágások, forgás kivágások és lokális anyageltávolító műveletek, tehát az ún. regularizált testalkotó eljárások és azok közül is az anyagot eltávolító eljárások. Általában nem használhatók a nem ka-

nonikus alakban leírható függvényekkel vezérelt testmódosító eljárások (pl. szabadfelületek kiterjesztése). Másrészt van egy tipikus, új komponens generáló alaksajátosság művelet, ami csak szerelésekben értelmezhető, a hegesztés. A hegesztési modellezés anyagot ad hozzá a szereléshez, kvázi új komponenssel bővíti a szerelést. A manifoldivitás megtartása érdekében itt is az additív entitáskezelés jelenti a megoldást. (Sok esetben a hegesztési modellezést egy önálló hegesztési környezetben kezelik, de a kialakult gyakorlatnak a normál szerelési környezetben alkalmazott additív komponens megalkotása jobban megfelel.)

8.3.3.4. Egyszerűsített modell

A nagyméretű, sok elemszámú szerelések kezelésénél gyakori probléma a méretek miatti lassú modellkezelés, nehézkes megjelenítés, nagy számítástechnikai teljesítményigény. A teljes szerelés konstrukciójának vizsgálatakor pedig nincs is szükség az alkatrészek összes apró részletének kezelésére, sok olyan elemet tartalmazhat a modell ami a szerelés közben valójában nem hordoz hasznos információt. A probléma kezelésére sokféle módszer alakult ki, pl;

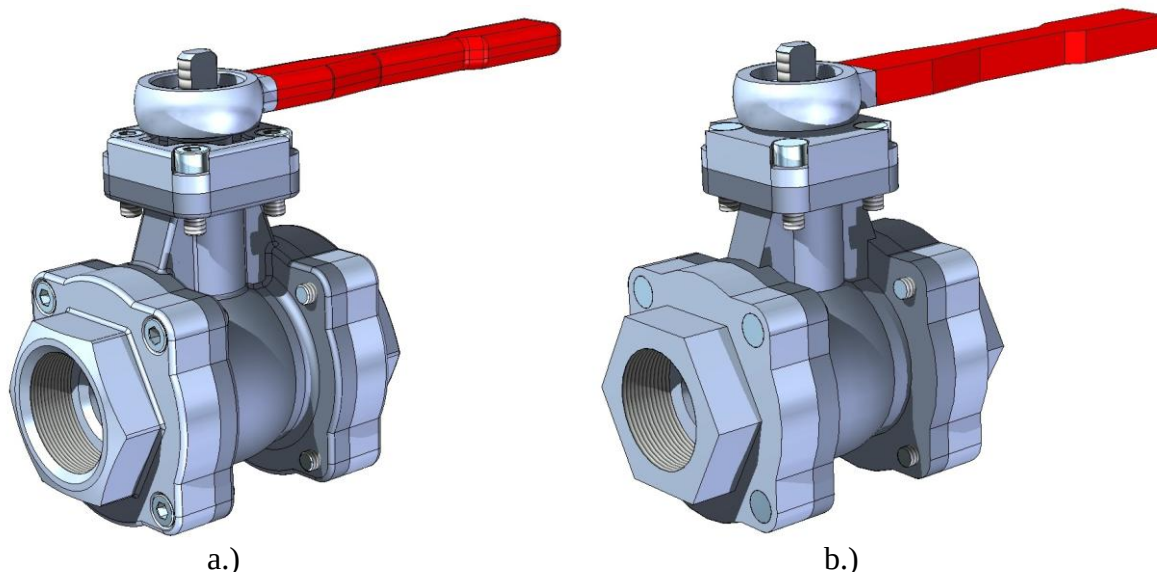
- megkülönböztethetők aktív és inaktív komponensek, ahol az inaktívok adatainak egy nagy része nem vesz részt a számításokban, vagy be sem töltődik a modellkezeléshez a számítógép memóriába,
- vagy régiókra lehet bontani a szerelési munkateret és mindig csak az aktuális régióban lévő komponensek vesznek részt a számításokban,
- vagy a szerelésfában csak az aktuális logikai ágat kezeli a rendszer stb.

Sajnos mindegyik módszer esetében előfordulhatnak olyan struktúrák, melyek esetében a módszerek nem segítenek, mert megfogalmazható egy-egy olyan probléma ami túlmutat a felállított axiómákkal definiált rendszeren (Cauchy-csoport teória)

Korrekt megoldást az adja, ha az eredeti, **tervezett** vagy **originál** modellel párhuzamosan létezik egy célszerűen egyszerűsített modell is. Az egyszerűsítés nem a kapcsolatokra, és kényszerekre hat, hanem a komponensek maguk léteznek egy egyszerűsített formában. (Tehát léteznek egyszerűsített alkatrészek és egyszerűsített szerelések.) Az alkatrészek egyszerűsített reprezentációja az alkatrész modellezésnél ismertetett, itt csak a az egyszerűsített szerelést tárgyaljuk.

A szerelés egyszerűsítése a benne lévő komponensek törlésével történik. A törlés egy kiválasztás alapján történik méret, típus vagy felhasználói definíció alapján. A szerelés regularitásának megőrzése érdekében olyan alkatrészek nem törölhetők amelyek az adott szerelés felsőbb szintű szerelésbe illesztéséhez egy kényszer részvevői.

Az egyszerűsített szerelésábrázolás funkcionálisan egyenértékű a tervezett szereléssel (8.26. ábra)



8.26. ábra. Az a.) képen a tervezett a b.) képen az egyszerűsített szerelési reprezentáció

8.4. Modellalkotási módszerek hatása a szerelésre

A szerelésben szereplő komponensek bár különbözőek (alkatrész, alszerelés és additív entitás) végső soron mind a testmodellező által készített alkatrészmodellek. Így kezelhetőségük any-nyiban függ a modellezési eljárástól, amennyire az megszabja a szerelési kényszerekben használatos elemek kiválaszthatóságát és paraméterezhetőségét.

8.4.1. CSG szerelési modell

Ma már a hagyományos értelmezésben nem használatos módszer, a szereléseket mint alkatrész-halmazt kezeli, és tisztán a boole műveletekkel kapcsolja egymáshoz az alkatrészeket.

8.4.2. Parametrikus, vagy hagyományos szerelés

A szerelvények konstrukcióját követi az eddig leírtaknak megfelelően, az összeszerelési műveletek során a kényszerek paraméterezése a modell változók paraméterezésével ekvivalens módon történik. Ebből eredően szerelési történetben ábrázolt a hierarchia, és a szerelés módosítása mindig a szereléstörténet újraszámítását vonja maga után a konkrét módosítástól kezdve az aktuális állapotig. Ebből eredően bármely paraméter amit felhasználtunk a szerelés felépítésekor módosítható, de a szerelési kényszerek korlátozzák a műveletek végrehajtását (ki-kapcsolhatóak, de ez felhasználói beavatkozásra történik), a szerelési történet végigszámítása hosszadalmas lehet és gondot okozhat a modell-történettel nem rendelkező (pl. idegen rendszerből kapott) alkatrészek módosítása.

A szerelésen belül az alkatrészek kapcsolatrendszere olyan hierarchikus fát alkot, amelyben a nem apa-fia kapcsolatban álló, másik alszerelésben lévő alkatrészekről **átvet, csatolt** adatok miatt hálós struktúra is kialakult. A csatolások számának növekedésével a számítási idő permutatív módon nő, a kezelési lehetőségek azonban szinte korlátlanok. A rendszer **időben abszolút** vagyis a szerelésmodell bármely előző fázisa kezelhető, újraépíthető.

A gyakorlati tapasztalatok alapján az prognosztizálható, hogy a feladatok 50-70 %-ában ezzel a módszerrel kezelhető a legjobban az adott tervezési feladat.

8.4.3. Direkt, vagy explicit szerelés

A nagy elemszámok kezelésére kialakított módszer, lényege, hogy nincs tekintettel a szerelés kialakulásának folyamatára, hanem minden lépésben csak az aktuális helyzetet tekinti mérvadónak. Bár a hierarchikus fa megvan – hisz ott vannak a megfelelő szinteken a komponensek –, de a szerelésen végzett műveletek során csak a hálós alkatrész kapcsolati mátrixot használja. Ebből eredően a szerelés módosítása gyors, a változtatás által nem érintett régiók nem is kerülnek újraszámításra, de természetesen nem is paraméterezhetünk át régebben megadott változókat. A módszer alkalmazásával gyorsan és könnyedén hajthatók végre geometriai pozícióváltások, a kényszerek automatikusan felülíródnak és az idegen alkatrészek implicit ugyanúgy kezelhetők mint a saját modellezésűek.

A hálós alkatrész kapcsolati struktúra a túl sok csatolás miatt leronthatja a teljesítményt és a kezelési lehetőségek más tervezői hozzáállást kívánnak, ugyanis a rendszer *időben relatív*, az előző tervfázisok elvesznek, visszalépni mindig csak egy lépést lehet.

A gyakorlati ismeretek szerint várhatóan a tervezési feladatok 30-50 %-a esetén ez a módszer a jobb választás. (Az egyre nagyobb modellek elterjedésével várható, hogy a jelenlegi ~30% nőhetne akár ~50% közelébe. Hogy ez mégsem a direkt modellezők terjedését eredményezi a 8.4.4.pontban leírtak okozzák.)

8.4.4. Szinkron, vagy hibrid szerelés

A parametrikus és a direkt módszer előnyeit egyesíti a szinkron technológia, melynek a lényege az, hogy mindkét modellépítési módszert egyidőben használni képes. Kezdeti formájában a két modell prioritási sorrendben van egymáshoz képest és a modellkonvertálás csak egyszer végrehajtható. (pl. hagyományos modellezéssel indul a tervezés és szinkronnal folytatódik, de visszatérés már nem lehetséges). A valódi szinkron technológiában – mint ahogy azt a neve is mutatja – oda-vissza lehetséges a tervezési módszer választása, mindig az éppen aktuális feladatnak megfelelően. Természetesen egy szinkron szerelésben vegyesen lehetnek parametrikus és direkt módon készült alkatrészek, tehát hibrid a modell, és a módosítások során mindkét módszer adatleírása kialakul mindkét alkatrész modelljére. (Kvázi a módosítások hatására az alkatrészmmodellek is hibriddé válnak.)

Természetes, hogy a duplikált modellstruktúra miatt a számítási időigény nagyobb mint a tisztán direkt modell esetében, de kisebb a parametrikusnál és rendelkezik ez utóbbi összes lehetőségével.

A tervezés kezdetén a parametrikus vagy a direkt eljárás kiválasztásával egy irreverzibilis folyamat veszi kezdetét, amennyiben a választott módon kell végig kidolgozni a szerelvény felépítését, akkor is ha időközben a tervező rájön, hogy más megközelítéseket kellett volna használni. A szinkron technológia lehetővé teszi, hogy a tervezési folyamatot menet közben is optimalizálhassuk az időközben felmerült új igények, vagy aktuálisan felfedett problémák szerint.

8.5. Alkatrészekelés a szerelésen belül

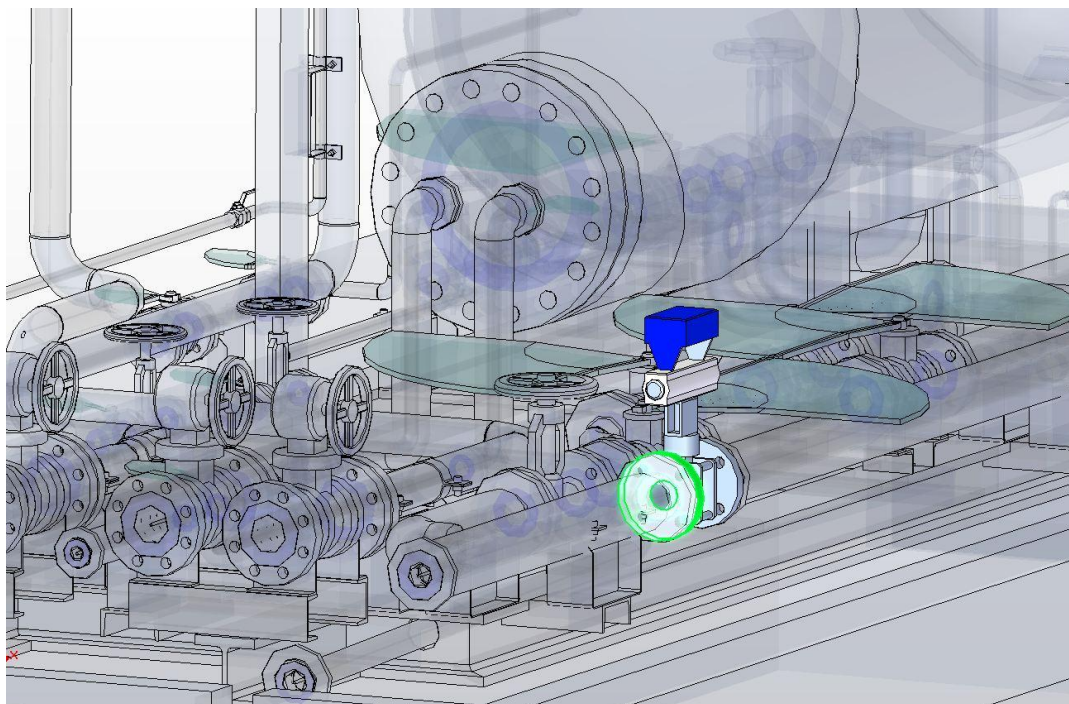
Hagyományosan a szerelést meglévő alkatrészekből lehet összeállítani. Természetesen az alkatrész módosulása esetén az a hivatkozott modell megváltozásaként jelentkezik a szerelésben, és ha más alkatrészekkel is csatolásban áll a módosult alkatrészmmodellel ezen csatolások frissítése szükséges.

Ez a metodika a hagyományos *alulról –felfelé tervezés*. Sok esetben azonban egy már meglévő környezetbe kell illeszteni a tervezendő alkatrészt és nem hatékony módszer a meglévő környezet peremfeltételeit kimásolni az alkatrész tervezési környezetbe és ott megépíteni

az alkatrészmodell és annak elkészültével azt a szerelésbe illeszteni. A probléma kiküszöbölését a **felülről-lefelé tervezés** adja, vagyis az alkatrész modelljét a szerelésen belül hozzuk létre. A módszerhez több segéd eljárás jött létre, ezek közül a szerelésen belüli modell létrehozás és a virtuális komponensalkotás a legfontosabb, de valójában ide tartozik a szerelési alaksajátosságok alkalmazásánál már tárgyalt anyaghozzáadással járó alaksajátosság készítés, nevezetesen a hegesztési varrat modellezése is.

8.5.1. Szerelésen belüli modellalkotás

A szerelésbe a komponenseket nem meglévő fájlokból beemeljük, hanem a szerelés munkatéréhez kötve az alkatrész modellezési környezetet alkalmazva definiálható egy lokális, alkatész munkatér és ebben az alkatrész modellezésénél használatos műveletekkel felépíthető a modell. Lényeges különbség azonban, hogy a modellalkotás geometriai input elemei itt nem kötelezően önállóan és függetlenül definiált vonal, vagy felületelemek, hanem ezek egy része vagy egésze a szerelésben már meglévő komponensekből átvehető. A módszer a **szerelésen belüli szerkesztés**, az elemek átvétele a **csatlakozás**. Különösen a funkcionálisan meghatározó kapcsolódásokkal rendelkező alkatrészek esetében jól használható ez a módszer (8.27. ábra)



8.27. ábra. Csővezetékbe kerül beépítésre egyedi kialakítású szabályószelep.
A meglévő karimához történő csatlakozófelület kihúzása látható.

Természetesen nem csak alkatrész, hanem szerelés is létrehozható szerelésen belül, vagyis a szerelést alkotó két fő komponens bármelyike, azonos módon.

8.5.2. Virtuális komponensek alkotása

A 8.2.4.4 pontban már tárgyaltuk a virtuális komponensek kényszerét, amivel ilyen elem a szereléshez köthető. Valójában e felülről-lefelé tervezés metodikáját támogató, több lépésből álló módszerről van szó. A folyamat a következő;

- Virtuális komponensek definiálása. A szerelési struktúrában geometriai modellel és fizikai jellemzőkkel sem rendelkező elemet kell a hierarchia fába beilleszteni.
- Meglévő dokumentumok csatolása a virtuális fába. A virtuális komponens lehet virtuális szerelés is, de ekkor előfordulhat hogy ennek a még geometriailag nem létező szerelésnek már van létező alkatrész eleme.
- 2D-s geometria hozzárendelése a virtuális komponensekhez. A virtuális szerelés kezeléséhez, a funkció felismeréséhez, a tervezési feladat megértéséhez vázlatok, leírások, fotók adhatnak támpontot, egy-egy virtuális alkatrészt egy-egy ilyen 2D-s vázlat tud reprezentálni.
- Virtuális komponensek pozicionálása. A már tárgyalt virtuális komponenskényszerrel egy adott síkon elhelyezhetők a 2D-s vázlatok a szerelési modellben és ezáltal vizuálisan is értelmezhetővé válik a szerelés felépítése, illetve a geometria megszabja a tervezendő 3D-s modell helyét.
- Virtuális komponensek érvényesítése. (publikálás) A virtuális elemeket is tartalmazó modellt megjeleníthetővé kell tenni a különböző tervezési környezetekben és funkciókban, pl a műhelyrajzon.
- A valódi alkatrészmodell elkészülte után a virtuális komponenst a valódi komponensre kell lecserélni, ez a hivatkozás alapján automatikusan történik, ha létrejön a valódi modell.

9. KINEMATIKA VIZSGÁLATOK CAD KÖRNYEZETBEN

Szerző:
Kátai László

TARTALOMJEGYZÉK

1.	MECHANIZMUSOK ALAPJAI	177
1.1.	Alapfogalmak bevezetése	177
1.2.	Kinematikai párok fajtái, osztályozásuk	178
1.3.	Kinematikai vázlat	180
1.4.	Mechanizmus szabadságfokának értelmezése	181
2.	3D MODELLÉPÍTÉS KINEMATIKAI VIZSGÁLATHOZ.....	183
2.1.	A 3D modellalkotás kritériumai.....	183
2.1.1.	Egyszerűsített modellek	183
2.1.2.	3D CAD modellek importálása	184
2.2.	A kinematikai párok definiálása	185
2.2.1.	Speciális kapcsolatok	186
2.3.	Működési jellemzők definiálása	187
2.4.	Eredmények megjelenítése	188
3.	ESETTANULMÁNY	189
3.1.	Forgattyús mechanizmus elemzése.....	189
3.2.	Kiegyenlítő tengelykapcsoló elemzése	193
4.	IRODALOM	196

1. MECHANIZMUSOK ALAPJAI

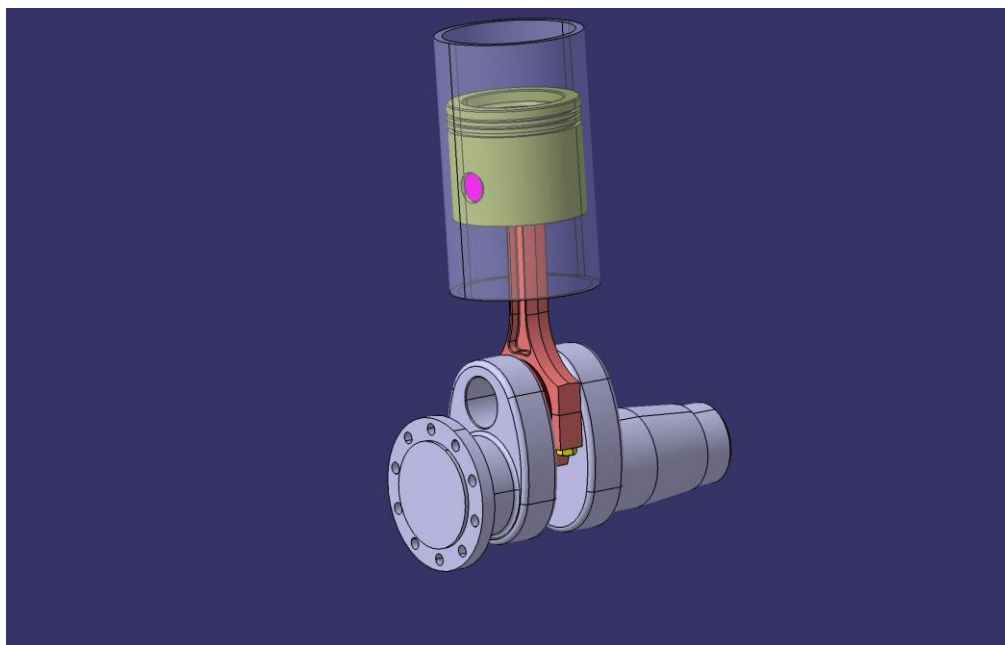
A gépészeti gyakorlatban a mozgást előállító energiaforrás általában forgómozgás formájában szolgáltatja a kinematikai energiát. Ilyenek pl. a belsőégésű motorok, a villanymotorok, vagy – bizonyos mezőgazdasági munkagépeken - a járókerék hajtások is. Ezt a forgómozgást kell a munkavégző gépegységhez továbbítani, ahol igen sok esetben már nem forgómozgásra, hanem pl. egyenesvonalú, alternáló, lengő, stb. mozgásra van szükségünk. Ezt a speciális feladatot, azaz fordulatszám változtatást, mozgásjellemző átalakítást, nyomatékkapcsolat illesztést végzik el a mozgást közvetítő gépelemek. Ilyen mozgás átszarmaztatásra illetve átalakításra alkalmas berendezések a különböző **mechanizmusok**.

1.1. Alapfogalmak bevezetése

Mechanizmus: olyan mesterségesen kialakított testek rendszere, amely egy vagy több testnek egy másik test (vagy testek) által előírt mozgását biztosítja.

A mechanizmust alkotó, egymáshoz viszonyítva elmozdíthatóan összekapcsolt merev testeket **tagoknak** nevezzük. A mechanizmust alkotó tagok között mindig van egy (és csakis egy) kitüntetett szerepű tag, amelyhez képest a többi tag mozgását vizsgáljuk és ezt **állványnak** nevezzük és mozdulatlanak tekintjük. A gépeknél rendszerint a gépkeret, alváz, gépalap, stb. képezi az állványt.

Minden mechanizmusban van egy vagy több olyan tag, amelynek mozgási törvényszerűsége adott és a többi tagot mozgatja. Ezt a tagot vezető vagy **hajtó tag**nak, az általa mozgásra kényszerített tagokat pedig **hajtott** vagy vezetett **tag**oknak nevezzük.



9.1. ábra. Forgattyús mechanizmus szerkezeti felépítése

A mechanizmus tagjai egymáshoz ún. kinematikai párokon keresztül kapcsolódnak. A kinematikai párok biztosítják a mechanizmus tagjainak egymáshoz viszonyított elmozdulását. A

síkban mozgó mechanizmusok leggyakoribb kinematikai párjai a csap és csapágy, illetve az egyenesbe vezető kulisszakő és vezetőke.

A kinematikai párok útján összekapcsolt tagok kinematikai láncot alkotnak. A mérnöki gyakorlatban alkalmazott mechanizmusok zárt kinematikai láncot alkotnak, azaz a mechanizmus első és utolsó tagja összekapcsolódik. Ez rendszerint az állványon keresztül történik meg.

Összegezve tehát a mechanizmus egy mozdulatlan taggal rendelkező zárt kinematikai lánc, amelyben a hajtó tag (tagok) adott (állványhoz viszonyított) mozgásakor a hajtott tagok – az adott célnak megfelelő – egyértelműen definiálható mozgást végeznek.

1.2. Kinematikai párok fajtái, osztályozásuk

A kinematikai párok, vagyis a mechanizmusok kapcsolódási lehetőségei sokfélék lehetnek. Két tag mozgékony kapcsolatában a kinematikai párok különböző kötöttségi feltételeket valósítanak meg.

A kinematikai pár kötöttségének számán azt értjük, hogy a mechanizmus két tagjának kapcsolódása hány szabad mozgási lehetőséget szüntet meg a két tag egymáshoz viszonyított mozgásában. A kinematikai párok egy, de legfeljebb öt kötöttséget valósíthatnak meg. Mivel a térben egy merev testnek hat mozgási lehetősége van – a teret definiáló három koordináta tengely mentén történő elmozdulás, valamint ugyanezen koordináta tengelyek körül történő elfordulás –, ami egyben azt is jelenti, hogy a merev test szabadságfoka a térben hattal egyenlő. Egyértelműen belátható, hogy nulla kötöttség esetén a két tag (test) nem kapcsolódik, hat kötöttség esetén viszont a két tag egymáshoz képest nem mozdulhat el. (Fontos megjegyezni, hogy valós szerkezeti kialakításoknál az egymáshoz mereven rögzített elemeket a mechanizmusban egy tagként kell kezelni).

A kinematikai párok által megvalósított kötöttségek számát úgy határozhatjuk meg, hogy megvizsgáljuk a kapcsolódás mely koordináta tengely irányába gátolja meg a haladó mozgást, illetve mely tengely körül akadályozza meg a forgó mozgást.

A kinematikai párokat a könnyebb vizsgálat kedvéért szabadságfokuk, megvalósított kötöttségük és a kinematikai elemek érintkezése alapján szokásos osztályozni. Szabadságfokuk szerint egy-, két-, három-, négy-, és ötszabadságfokú kinematikai párokat különböztetünk meg. Megvalósított kötöttségük szerint az előbbieknél megfelelő kinematikai párokat az V., IV., III., II., I. osztályba soroljuk.

A kinematikai elemek érintkezésének jellegétől függően a kinematikai párok alsó- és felsőrendű kinematikai párokra oszlanak.

Alsórendű kinematika párokhoz azok tartoznak, amelyek kinematikai elemei kölcsönösen felfekvő felületek, vagy felület részek.

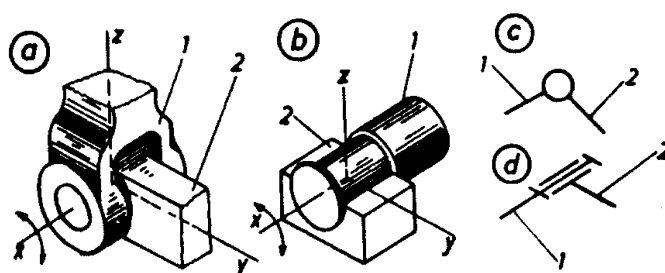
Felsőrendű kinematikai pároknak azokat nevezzük, amelyek elemei pont vagy vonal mentén érintkeznek.

A legelterjedtebben alkalmazott kinematikai párok a következők (szerkezeti kialakításukat, valamint a vázlatos ábrázolási módot a 9.2. ábra szemlélteti):

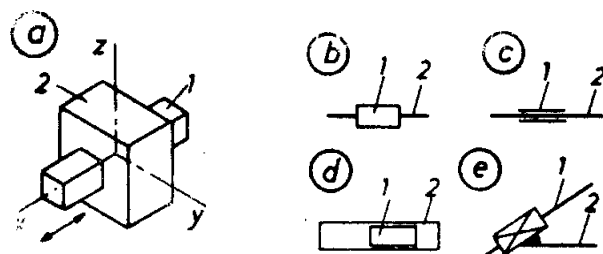
- csukló (a) (egyszabadságfokú, alsórendű kinematikai pár), amely egy tengely körül történő elfordulást tesz lehetővé.
- egyenesbevezető (b) (egyszabadságfokú, alsórendű kinematikai pár), amely egy tengely mentén történő elmozdulást tesz lehetővé.
- csavarmenetes kapcsolatú kinematikai pár (c) (egyszabadságfokú, alsórendű kinematikai pár), amely elfordulás esetén adott elmozdulást biztosít. Mivel az elfordulás és az

elmozdulás között meghatározott összefüggés áll fenn, ezért minősül egyszabadságfokú kinematikai párnak.

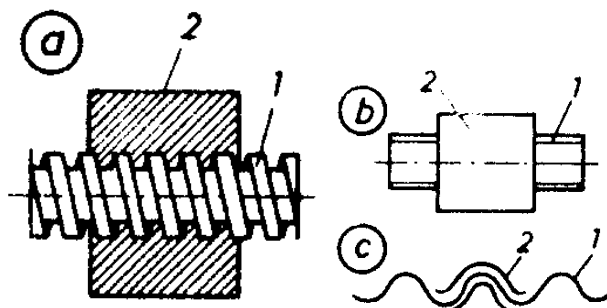
- gömbcsukló (d) – (háromszabadságfokú, alsórendű kinematikai pár), amely három tengely körül történő elfordulást biztosít.
- fogaskerékpár (e) – (kétszabadságfokú, felsőrendű kinematikai pár). A gördülés csúszással párosul, ezért tartozik a IV. osztályba két szabadságfokú kinematikai párként.



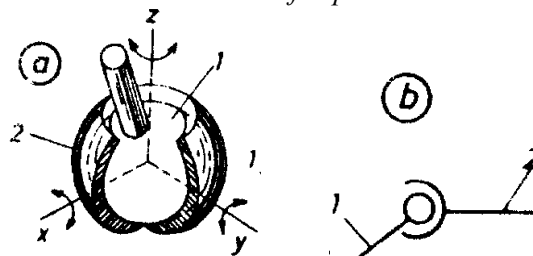
csukló szerkezeti felépítése és vázlata



egyenesbevezető szerkezeti felépítése és vázlata



csavarmenet szerkezeti felépítése és vázlata



gömbcsukló szerkezeti felépítése és vázlata

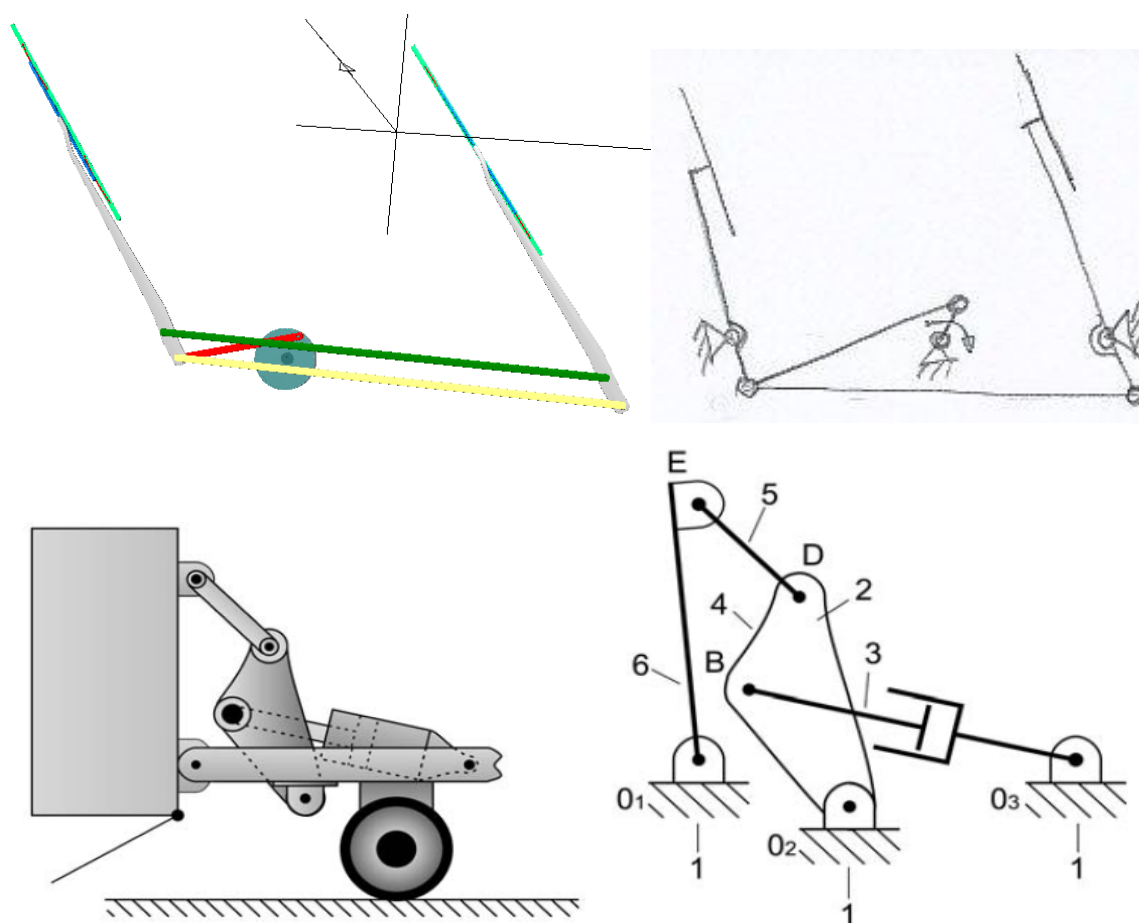
9.2. ábra. Néhány jellemző kinematikai pár felépítése és jelölése

1.3. Kinematikai vázlat

A mechanizmus működésének és működési jellemzőinek könnyebb értelmezhetősége és elemzése céljából a kinematikai párokat és a mechanizmus tagjait jelképesen ábrázoljuk. Egyes kinematikai párok jelképes ábrázolása az előző fejezetben bemutatásra került. A mechanizmus tagjait a valóságban különböző alakúak. Mivel a mechanizmus tagjait merevnek tételezzük fel, azaz egy adott tag bármely két pontjának távolsága a működés (mozgás és terhelés alatt) során állandó marad, ezért a tagot egyszerűen egyenes vonallal ábrázoljuk, amelyet bonyolultabb esetben háromszöggé, négyszöggé, stb. egészíthetünk ki.

A mechanizmus jelképes rajzát **kinematikai vázlat**nak nevezzük. A kinematikai vázlat teljes képet ad a mechanizmus szerkezeti felépítéséről és egyértelműen meghatározza annak kinematikai tulajdonságait. A kinematikai vázlat tulajdonképpen a **mechanizmus mérethelyes vonalas rajza**, amely tartalmazza a tagok és a kinematikai párok egységes, egyértelmű jelölését. A kinematikai vázlaton az állványt vonalazással jelöljük. Fontos megjegyezni, hogy bár az állvány jelölése a kinematikai vázlaton több helyen, látszólag egymástól függetlenül megjelenik, az állvány a valóságban egy egységet képez, így a kinematikai vázlaton is egyetlen tagként szabad kezelni, függetlenül attól, hogy a rajzon hány helyen jelöltük.

Az alábbi ábra néhány egyszerű mechanizmus esetén szemlélteti a szerkezeti kialakítást, és az annak megfelelő kinematikai vázlatot.



9.3. ábra. Mechanizmusok szerkezeti felépítése és kinematikai vázlata

1.4. Mechanizmus szabadságfokának értelmezése

Egy térben elmozduló test mozgását 6 paraméterrel tudjuk egyértelműen definiálni. Ezek a teret jellemző három koordinátatengely mentén történő elmozdulás, illetve a tengelyek körül történő elfordulás lehetnek. Amennyiben síkbeli mozgásról van szó, a mozgáslehetőség leírása 3 jellemzőre korlátozódik. Ezek a derékszögű koordináta-rendszer két tengelye mentén történő elmozdulás, valamint a vizsgált síkra merőleges tengely körüli elfordulás. Mivel a mechanizmusok egy jelentős része síkbeli mechanizmusként értelmezhető, így a továbbiakban ezeknek a vizsgálatával foglalkozunk.

A fentiekben említett mozgáslehetőségekből (szabadságfok) néhánytól a tagok egymáshoz kapcsolásával megfosztjuk a mechanizmus alkotóelemeit. A tagokat összekapcsoló kinematikai párok – kialakításuktól függően – bizonyos mozgáslehetőséget nem tesznek lehetővé, ún. kötöttséget visznek a rendszerbe, azaz csökkentik az egyes tagok szabadságfokát. Ebből következően a mechanizmus egészére (síkbeli esetre) a szabadságfok a következőképpen értelmezhető.

Meghatározzuk a mechanizmust alkotó tagok számát. Itt fontos megjegyezni, hogy a mechanizmusnak mindig része egy rögzített elem (állvány), amihez képest a többi tag elmozdulhat. Az állvány funkciójánál fogva 0 szabadságfokú, és egy adott mechanizmusban csak egy állvány értelmezhető. A gondolatmenetnek megfelelően a mechanizmust alkotó tagok számából – amelybe az állványt is beleértjük – levonunk egyet. Így az alábbi összefüggés első tagja azt adja meg, hogy a tagok „önállóan” hány mozgáslehetőséggel rendelkeznek. Ebből kell levonnunk azoknak a kötöttségeknek a számát, amelyet a kinematikai párok okoznak. Síkbeli mechanizmus esetén vagy 2 kötöttségű, azaz 1 szabadságfokú, vagy 1 kötöttségű, azaz 2 szabadságfokú kinematikai párokat alkalmazhatunk. Ennek megfelelően minden 2 kötöttségű (1 szabadságfokú) kinematikai pár darabszámát kettes szorzóval vesszük figyelembe, hiszen egy-egy ilyen elem két szabadságfoktól fosztja meg a szerkezetünket. Az 1 kötöttségű (2 szabadságfokú) kinematikai párokat darabszámuknak megfelelően vesszük figyelembe, mivel itt egy elem egy kötöttséget jelent a mechanizmusban. A fenti gondolatmenetnek megfelelően egy síkbeli mechanizmus szabadságfokainak száma:

$$s = 3(n-1) - 2 \cdot p_2 - p_1$$

ahol,

n – a mechanizmust alkotó tagok darabszáma,

p_2 – a 2 kötöttségű (1 szabadságfokú) kinematikai párok darabszáma,

p_1 – az 1 kötöttségű (2 szabadságfokú) kinematikai párok darabszáma.

A fenti összefüggést Kutzbach kritériumnak nevezzük. Ha a szabadságfok száma $s > 0$, akkor a mechanizmus „ s ” szabadságfokkal rendelkezik. Amennyiben $s = 1$, a mechanizmus egy beemeneti paraméterrel (hajtással) egyértelműen mozgatható, $s = 2$ esetén, pedig a mozgathatósághoz két különböző hajtó paraméterre van szükség.



9.4. ábra. Néhány jellemző kinematikai pár felépítése és jelölése

Egy korábbi szabadságfok kritérium, amelyet Grüblerről neveztek el, olyan 1 szabadságfokú mechanizmusokra alkalmazható, amelyek csak egy szabadságfokú kinematikai párokat tartalmaznak. Az adott feltételek mellett ($p_1=0$, $s=1$) a Kutzbach kritérium egyenlete az alábbi alakban írható fel:

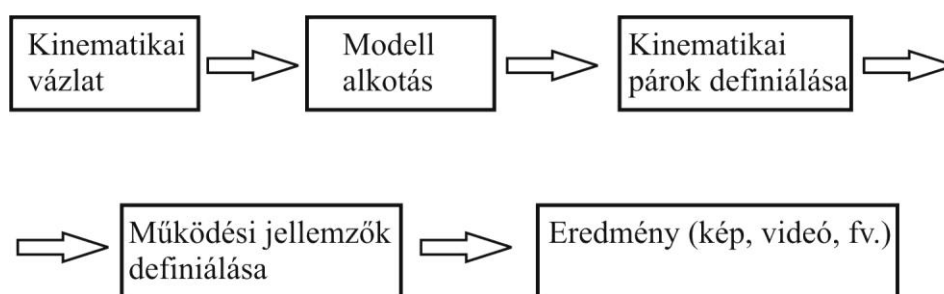
$$3n - 2p_2 - 4 = 0.$$

Az egyenletből egyértelműen látszik, hogy az 1 szabadságfokú kinematikai párból álló mechanizmusok szabadságfoka csak akkor lehet 1, ha páros számú tagból állnak. Ez az egyszerű alapelv, megkönnyíti a tervezést.

2. 3D MODELLÉPÍTÉS KINEMATIKAI VIZSGÁLATHOZ

A mechanizmusok mozgásjellemzőinek meghatározása sok esetben rendkívül időigényes számítási, vagy szerkesztési folyamat eredménye. A megoldási folyamatot gyorsítja, valamint különböző szerkezeti megoldások gyors és hatékony összehasonlítását is lehetővé teszi, ha a kinematikai analízis elvégzéséhez számítógépes (3D) modellt készítünk. A modellalkotási folyamat pontos kivitelezéséhez azonban elengedhetetlen a tagok közötti kapcsolat pontos ismerete és ennek tudatában a modellépítési lépések sorba vétele.

2.1. A 3D modellalkotás kritériumai A kinematikai analízishez készített számítógépes szimuláció az alábbi folyamatábrával jellemezhető.



9.5. ábra. A számítógépes kinematikai szimuláció folyamatábrája

A modellalkotás első lépése a megtervezett mechanizmus kinematikai vázlatának elkészítése. Ez az egyszerűsített vázlat egyértelműen megadja, hogy a szerkezet hány tagból áll, milyenek a tagok közötti kapcsolatok, valamint az alapeometriai viszonyok.

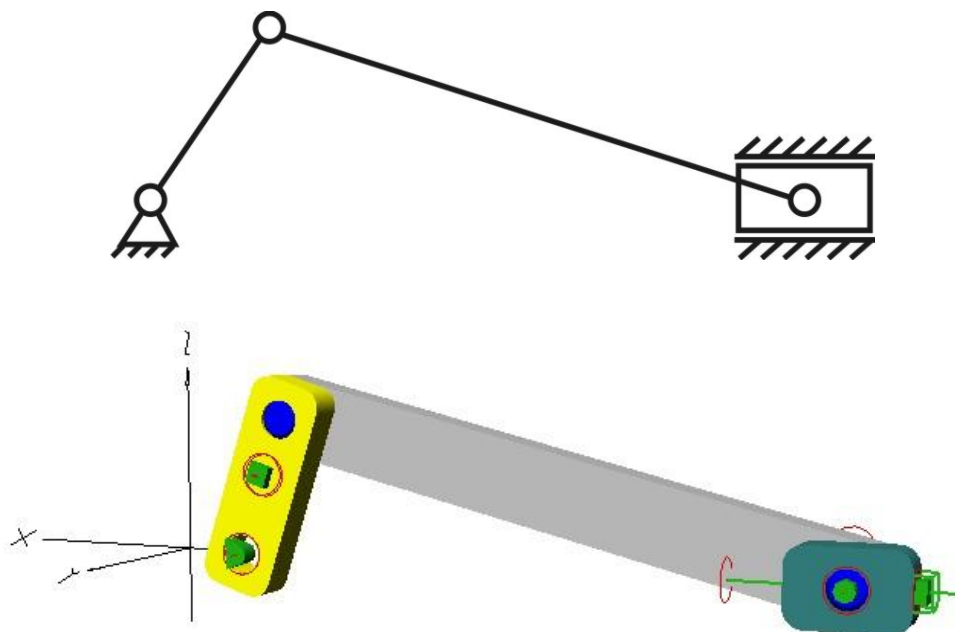
2.1.1. Egyszerűsített modellek

A mozgásviszonyok elemzése során - amennyiben nem feladatunk a mechanizmus tagjainak szilárdságtani vizsgálata - egyszerűbb és a működés szempontjából könnyebben áttekinthető modellt is készíthetünk, amelynek tagjai alapeometriai elemekből (hasáb, henger) építhetünk fel. Ezeket a „primitív” testeket a kinematikai szimulációs szoftverek is támogatják beépített elemként alkalmazhatók.

A kinematikai vonalas vázlatnak megfelelően építhetjük fel a modellünket, azonban a kinematikai párok definiálására, elhelyezésére különösen nagy gondot kell fordítanunk, hiszen a tagok geometriája pozíciójukat nem határozza meg.

A kinematikai párok helyzetét vagy az abszolút koordináta-rendszerben, vagy az adott tag (alkatrész) saját (relatív) koordináta rendszerében definiálhatjuk egy ún. segéd koordináta-rendszer megadásával. Ezekhez a segéd koordináta rendszerekhez rendelhetők a kinematikai párok.

Az alábbi ábra egy forgattyús hajtómű kinematikai vázlatát és az annak megfelelően felépített egyszerűsített 3D modellt szemlélteti.



9.6. ábra. Forgattyús hajtómű kinematikai vázlata és egyszerűsített 3D modellje

2.1.2. 3D CAD modellek importálása

Amennyiben a kinematikai szimuláció során a valós geometriai felépítéssel szeretnénk a mechanizmust vizsgálni, a konstrukciót elkészíthetjük valamely CAD program segítségével. A szerkezet összeszerelését is a CAD programban végezzük el, az egyes tagok pontos pozicionálásával. Fontos megjegyezni, hogy a kinematikai működés – valamint az egyéb analízisek szempontjából nem releváns elemeket – hagyjuk el a szerkezetünkről, mert a mozgás szimulációt a nagy alkatrész szám megnehezítheti, vagy bizonyos esetekben meg is hiúsíthatja.

Fontos további szempont, hogy az egyes kinematikai párokban alkalmazott valós szerkezeti kialakításokhoz tartozó elemek – csapok, csapágys, egyéb kötőelemek – a modellben nem kell, hogy szerepeljenek, ezek jellemzői (teherbírás, súrlódási tulajdonságok, stb.) a kinematikai pár definiálásával megadhatók.

Pontos előzetes felmérést igényel, hogy a 3D modell milyen fájl formátumban illeszthető be az analízis szoftverbe, és milyen mértékegység rendszert kell definiálni.

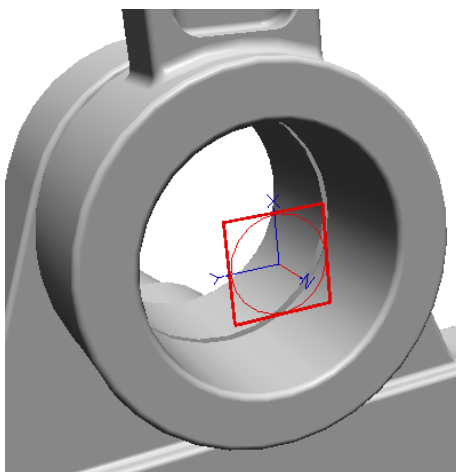
A valósághű CAD modellek lehetővé teszik a szilárdsági tulajdonságok vizsgálatát is – az eset többségében – mozgás közben is. Ezzel igen sok és bonyolult analitikus számításoktól mentesülhetünk.



9.7. ábra. CAD modellből felépített forgattyús hajtómű

2.2. A kinematikai párok definiálása A kinematikai párok alaptípusai az analízis szoftverekben beépítve megtalálhatók. A megfelelően elkészített kinematikai vázlat egyértelműen szemlélteti az adott mechanizmusban alkalmazandó kinematikai párokat.

A kinematikai elemek helyzetének meghatározásában segítségünkre lehetnek az egyes alkatrészek alaksajátosságai (pl. furat, hengeresség, felület, él, stb.). Bizonyos szoftvereknél maga az alaksajátosság jellemzői adják meg a kinematikai elemek helyét, más esetekben viszont az alaksajátosságnak megfelelő helyen felvett koordináta pontok (segéd koordináta rendszer) alapján adható meg a tagok közötti érintkezés (kinematikai elem) pontos helye. A furatközéppont megadását szemlélteti az alábbi ábra.



9.8. ábra. Furatközéppontban segéd koordináta rendszer megadása csuklóponthoz

A kinematikai párok definiálásánál nem szabad elfeledkeznünk arról sem, hogy nem csak az elmozduló tagok közötti kapcsolatot kell megadnunk, hanem a megfelelő helyen (helyeken) a mozgó tagok, valamint az állvány közötti kinematikai párokat is definiálni kell. Az állvány értelmezése szintén eltérő lehet különböző szoftvereknél. Bizonyos esetekben külön tagként meg kell rajzolnunk (modellalkotás) és definiálnunk kell a funkcióját, más esetben a háttér (background) tölti be az állvány szerepét, így az ehhez rögzített alkatrész lehet az állvány, vagy a megfelelő kinematikai páron keresztül a mozgást végző tag közvetlenül kapcsolható a háttérhez.

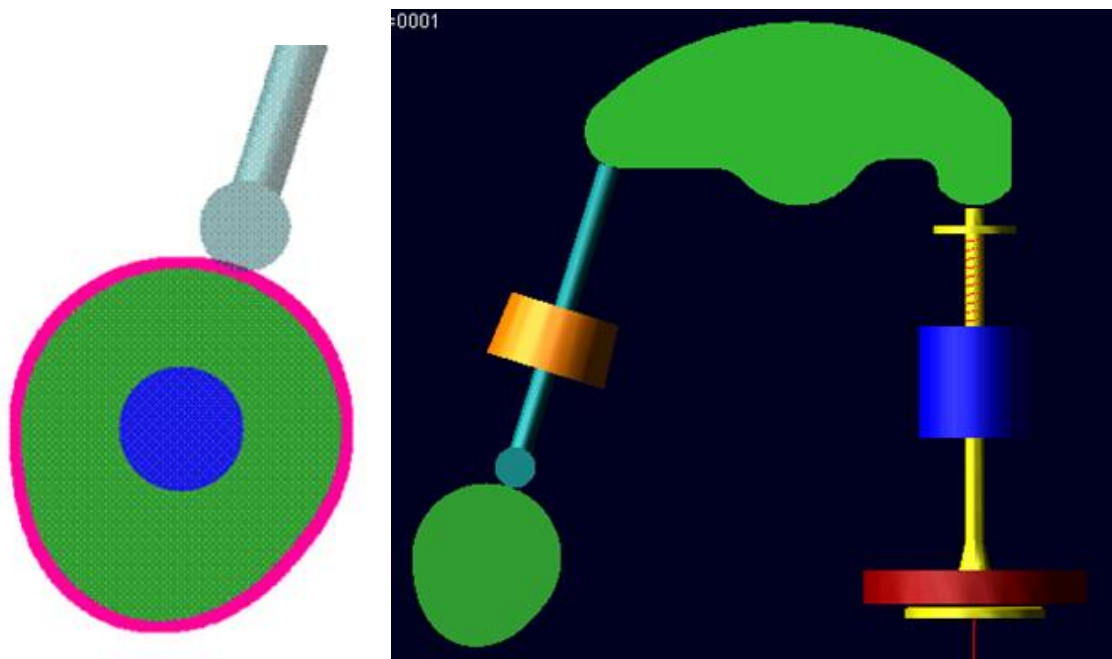
Bizonyos esetekben a tagok közötti kapcsolat olyan sajátosságokkal bír, amely a szoftver biztosította kinematikai párok segítségével nem definiálható megfelelően (pl. egy elmozduló rudazat egy másik elemmel érintkezésbe lépve ad át mozgást). Ilyen esetben az érintett tagok között ún. ütközést adhatunk meg, így a felület geometriája határozza meg a kapcsolat jellegét.

A kinematikai párok esetében speciális kritériumokat is megadhatunk, ilyenek lehetnek pl. a mozgás geometriai korlátai (pl. elfordulás szöge, elmozdulás mértéke), a teherbírás. Ez utóbbi természetesen már egy további kinetikai vizsgálat lehetőségét hordozza magában.

2.2.1. Speciális kapcsolatok

A mechanizmus tagjainak kapcsolataiban a leggyakrabban előforduló - általánosnak nevezhető - kinematikai párokhoz képest (csukló, egyenesbevezető, gömbcsukló, stb.) előfordulhatnak speciális kapcsolatok. Ilyenek lehetnek pl. egy adott vezérgörbe mentén történő elmozdulás, egymáson legördülő felületek (csúszásmentesen, vagy csúszással), vagy egyéb kényszerkapcsolatok. Ezekben az esetekben az adott 3D geometriához rendelhetünk görbéket (szplájnokat), amelyekhez rendelhető az adott kinematikai párra jellemző működés. Ezek alkalmazása a modell működése szempontjából általában megbízhatóbb és a háttér számítási igénye is lényegesen kevesebb, mint a valós geometriai felületek „ütköztetése”.

Ilyen megoldással találkozhatunk pl. vezérlőbütykös mechanizmusok esetében is.

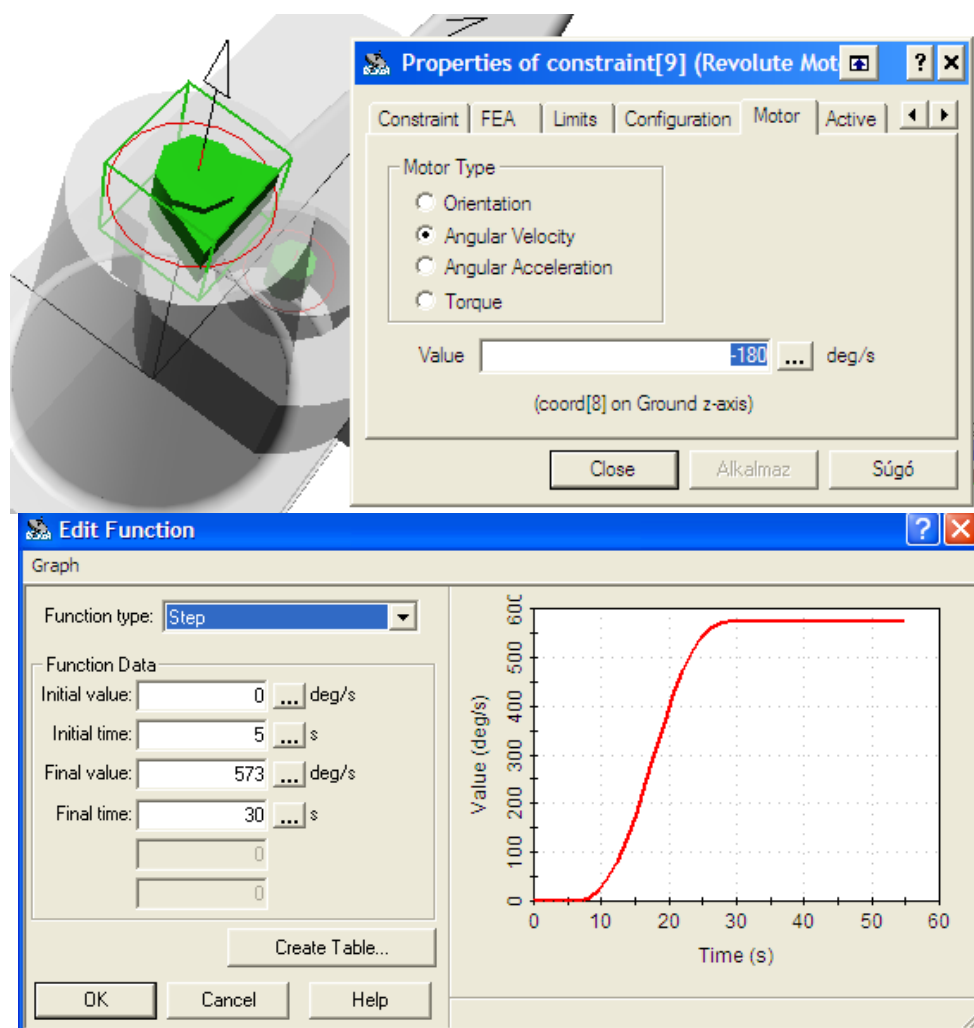


9.9. ábra. Felületek közötti kapcsolat definiálása

Bizonyos esetekben nem merev kapcsolatok is megadhatók (rugó, kötél), illetve hajtás kapcsolatok is definiálhatók (fogaskerék, szíjhajtás). Ezekben az esetekben azonban csak az alap mozgástani jellemzőkhöz tartozó paramétereket lehet definiálni, függetlenül a valós (3D modell) geometriától.

2.3. Működési jellemzők definiálása Az előző lépéseknek megfelelően felépített modell akkor lesz működőképes, ha a bemeneti (hajtó) paramétereket is meghatározzuk. Amennyiben a tervezés fázisában már meghatároztuk a szabadságfokok számát, akkor tudjuk, hogy hány meghajtási jellemzőt – és mely tagnál – kell megadnunk. A mechanizmusok többségét valamilyen forgó mozgást végző hajtó tag mozgatja, így ezekben az esetekben a meghajtás jellemzője szögsebesség, vagy fordulatszám lehet. Természetesen elképzelhető az is, hogy nem állandó értékről van szó, hanem valamilyen működési rezsimit szeretnénk szimulálni (felgyorsítás, megállás, stb.).

Hajtási paraméter minden esetben valamilyen kinematikai párhoz rendelhető, vagyis pl. forgó mozgással járó meghajtás (motor) csuklóhoz, míg lineáris mozgás (munkahenger) egyenesbevezetőhöz rendelhető.



9.10. ábra. Hajtási paraméter beállítási lehetőségek

2.4. Eredmények megjelenítéseA modellépítési folyamat vége, amikor a működő modellünk valamilyen kinematikai jellemzőjét szeretnénk megjeleníteni, mint vizsgálati eredményt. Ez lehet pályagörbe, sebesség vagy éppen gyorsulás érték, illetve függvény. Bizonyos esetekben magát a szerkezetet is szeretnénk működés közben szemléltetni, azaz a mozgás szimulációról animációt (videót) készíthetünk.

A függvényeket a szimuláció közben elvégzett „mérések” alapján kaphatunk, azaz definiálnunk kell, hogy mely alkatrész (tag) mely pontjában milyen jellemző paramétereit kívánjuk mérési eredményként rögzíteni.

A modellalkotási folyamat végén a működőképes modellünk az alábbi alapfeltételeknek kell, hogy eleget tegyen.

A szimulálható modell kritériumai:

- a tagok közötti kinematikai párok egyértelmű definiálása,
- az állvány (rögzített tag) meghatározása,
- bemeneti (hajtó) paraméter(ek) definiálása.

3. ESETTANULMÁNY

Egy esettanulmányon keresztül szemléltethető a számítógépes mechanizmus analízis folyamata.

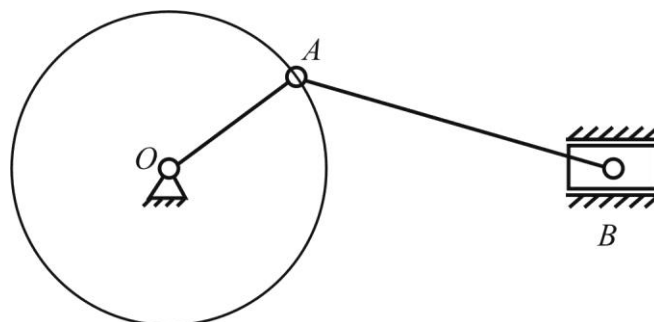
3.1. Forgattyús mechanizmus elemzése

Az esettanulmány során egy belsőégésű motorokban alkalmazott forgattyús mechanizmus kinematikai elemzését végezzük el. A dugattyú mozgásjellemzőit vizsgáljuk, meghatározzuk az elmozdulás, sebesség, valamint a gyorsulás jellemzőket a hajtókar szögelfordulás függvényeként

Az első lépés a kinematikai vázlat elkészítése.

– Kinematika vázlat

A kinematikai vázlat segítségével tudjuk megtervezni a forgattyús mechanizmus alapgeometriáját, és pontosan jelöljük, hogy milyen kinematikai párok kapcsolják össze az egyes tagokat (9.11. ábra).



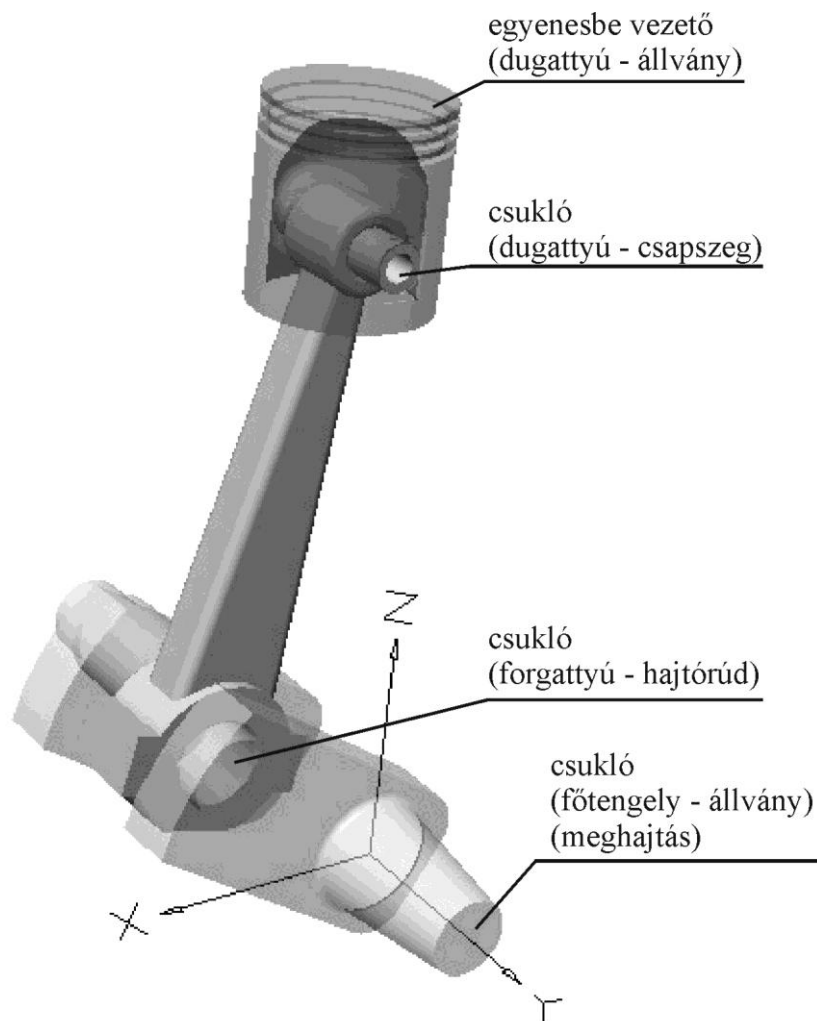
9.11. ábra. A vizsgált forgattyús hajtómű kinematikai vázlata

– Modellalkotás

A kinematikai vázlaton megadott alapgeometriának megfelelően 3D modellező szoftver segítségével elkészítjük az egyes tagok testmodelljeit. A szerkezet összeállítását is a modellező szoftver segítségével tesszük meg, így az egyes alkatrészek egymáshoz viszonyított pozíciója már beállított lesz, a kinematikai analízis szoftverrel a kinematikai párokat kell definiálni, pozicionálást nem kell végezni. Most is célszerű azt az elvet alkalmazni, hogy csak azokat az alkatrészeket építsük be a modellünkbe, amelyek a kinematikai viselkedés elemzéséhez feltétlenül szükségesek. A kiegészítő alkatrészek (pl. dugattyú csapszeg) elhagyható, hiszen a szimuláció annál kevesebb számítási igénnyel jár, és gyorsabban futtatható.

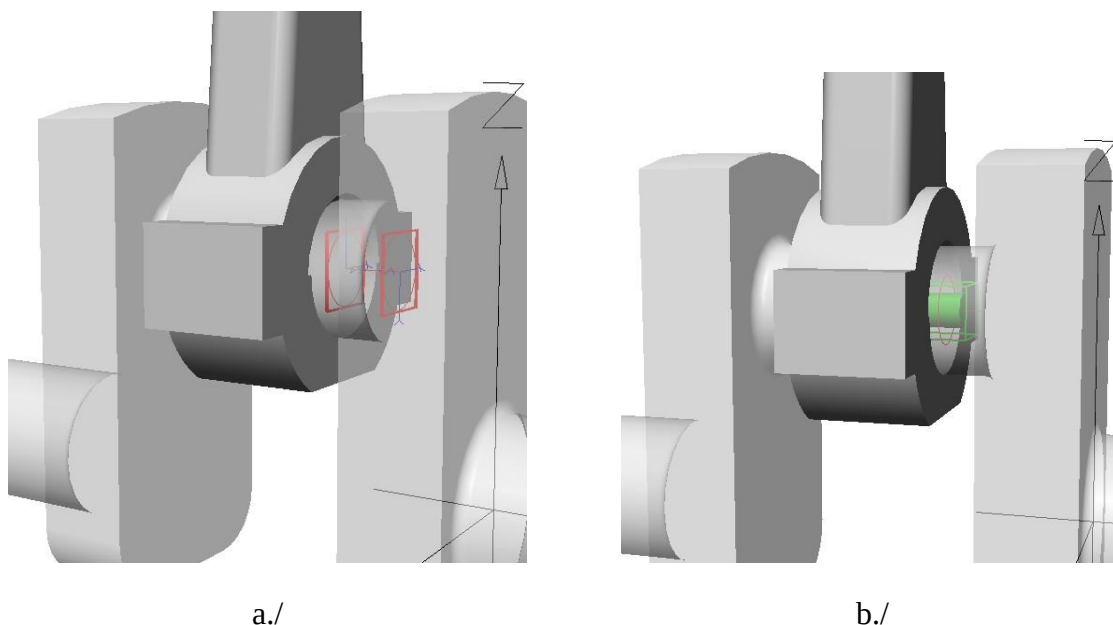
– Kinematikai párok definiálása

Fontos megjegyezni, hogy az állvány szerepét betöltő csapágyazás és henger (henger persely) a modellépítésnél elhagyható, a megfelelő alkatrészek közvetlenül kapcsolhatók a háttérhez. Ezekben az esetekben a háttérben mint állványon, valamint a hozzákapcsolódó alkatrészen definiált koordináta pontok összekapcsolása segítségével készíthetők el a kinematikai párok. Az összeállított szerkezet 3D modelljét szemlélteti az 9.12. ábra, jelölve az alkalmazandó kinematikai párok helyét is.



9.12. ábra. A forgattyús mechanizmus modellje a kinematikai párok jelölésével

A forgattyús kar és a hajtókar, csuklóval kapcsolódik egymáshoz. Minkét tagon az alaksajátosság segítségével pozícionáljuk a koordináta pontokat – körkörös alak középpontja. A koordináta pontokat nem feltétlenül szükséges az alkatrészek illesztési síkjában definiálni, hiszen a megfelelően összeszerelt testmodell szerkezeteken az alkatrészek helybenhagyásával a koordináta pontok automatikusan az érintkező felületekre kerülnek a kinematikai pár definiálásakor. Az 9.13. ábra „a” részén láthatjuk a koordináta pontokat a kinematikai pár létrehozása előtt, „b” részén pedig a csukló definiálása után.



9.13. ábra. A csukló definiálásának folyamata

A dugattyú egyenesbe vezetését közvetlenül a háttérhez kapcsolva adjuk meg, ahogy ezt az alfejezet elején már jeleztük. Az egyenesbe vezetés helyét kijelölő koordináta pontot a dugattyú felületén bárhol megadhatjuk, az a fontos szempont, hogy a megvezetés irányára merőleges felületelem legyen (9.14. ábra).



9.14. ábra. Az egyenesbe vezető definiálása

– Működési jellemző megadása

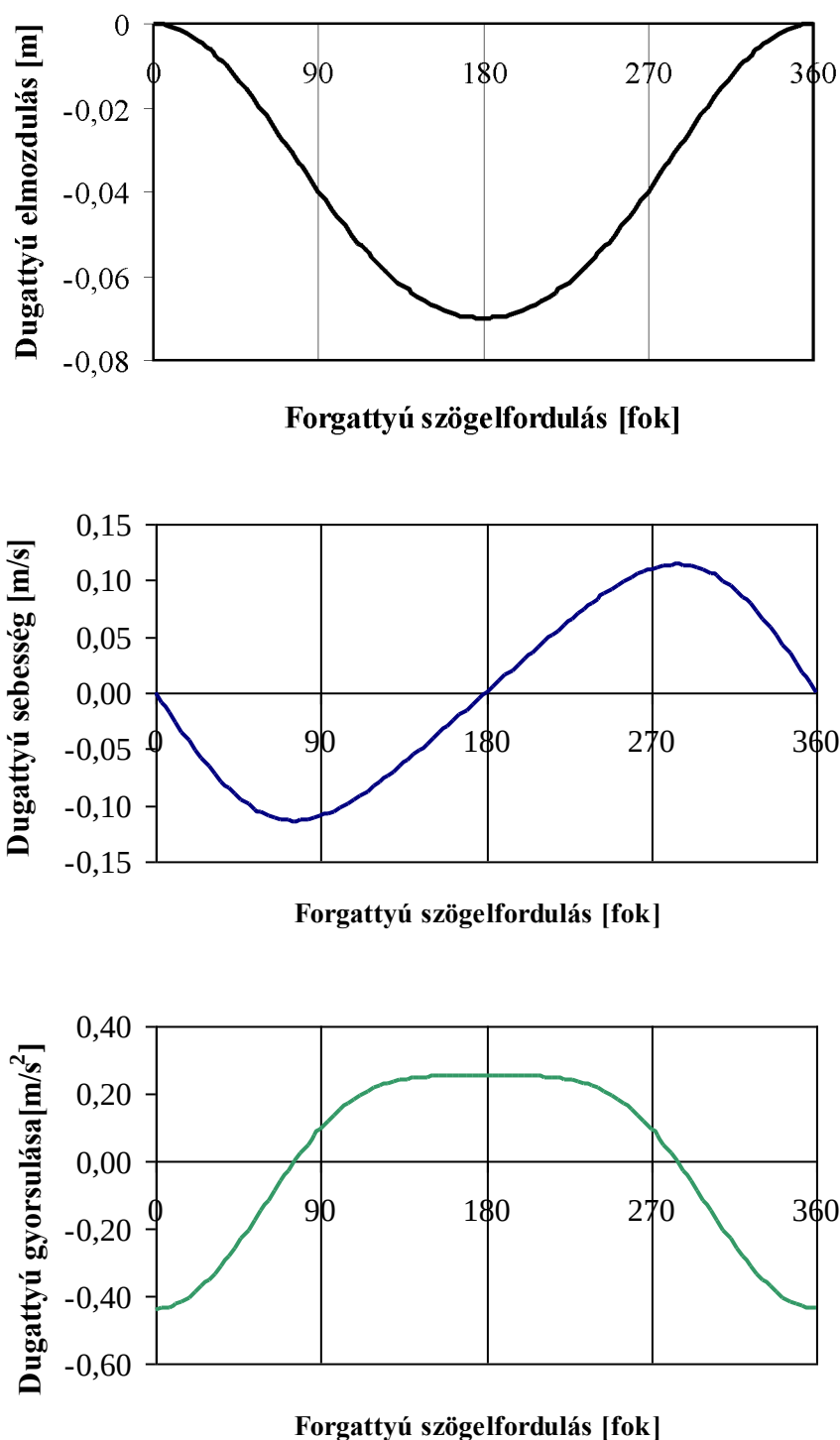
Működési jellemzőként a hajtókar szögsebességét definiáljuk, a főtengely és az állvány közötti csuklós kinematikai párnál. Jelen esetben egy állandó (üzemi) fordulatszámot adunk input adatként.

– Eredmények megjelenítése

A mechanizmus szimulációja során három működési jellemzőt vizsgálunk:

- a. – a dugattyú elmozdulás függvényének a meghatározása egy hajtórúd körülfordulás alatt.
- b. – a dugattyú sebességfüggvényének felvétele (egy teljes hajtórúd körülfordulás függvényében).
- c. – a dugattyú gyorsulásfüggvényét (egy teljes hajtórúd körülfordulás függvényében).

A szimuláció lefuttatását követően az eredmények a megfelelő táblázatos formában exportálhatók, és a függvényképek ábrázolhatók.



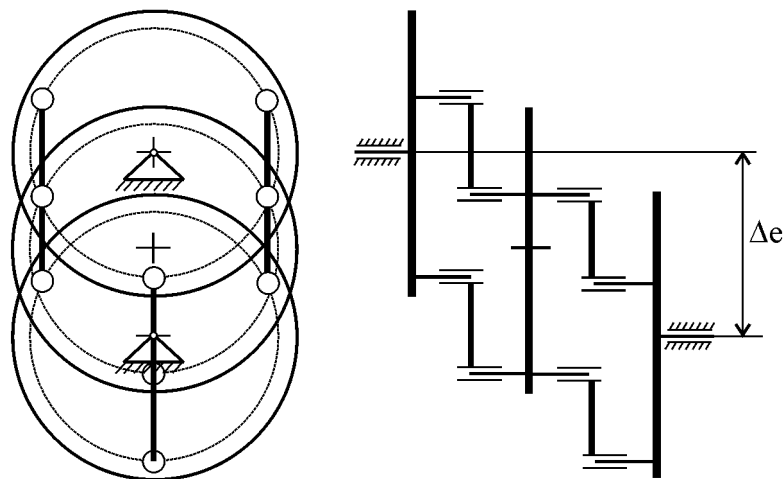
9.15. ábra. A dugattyú mozgásfüggvényei (foronómiai görbék)
(a vizsgálat a felső holtponthoz tartozó helyzetből indul)

3.2. Kiegyenlítő tengelykapcsoló elemzése

A második esettanulmány során egy radiális kiegyenlítő tengelykapcsoló (Schmidt tengelykapcsoló) működési vizsgálatát végezzük el.

– Kinematika vázlat

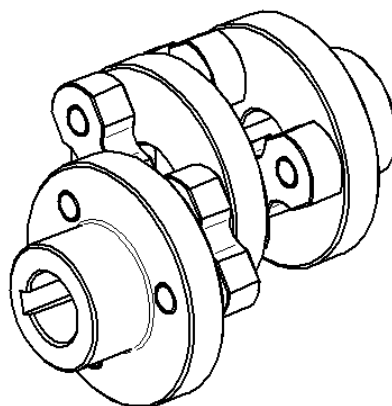
A tengelykapcsoló egy többcsuklós mechanizmusként értelmezhető, amelynek az alapegységeit a csuklókon keresztül rögzített karok kötik össze. Az alapelemek a hajtó-, hajtott-, valamint köztárcsa, amelyeket az előzőekben említett karok (alkatrészenként 3 db) kötik össze. A szerkezet kinematikai vázlatát a 9.16. ábra szemlélteti.



9.16. ábra. A tengelykapcsoló kinematikai vázlata

– Modellalkotás

A kinematikai vázlat alapján az alapgeometria ismeretében készíthetők el az egyes alkatrészek, és az összeszerelt modell, valamely 3D modellező szoftver segítségével. Ezt a geometriai tervezési modellt mutatja a 9.17. ábra.



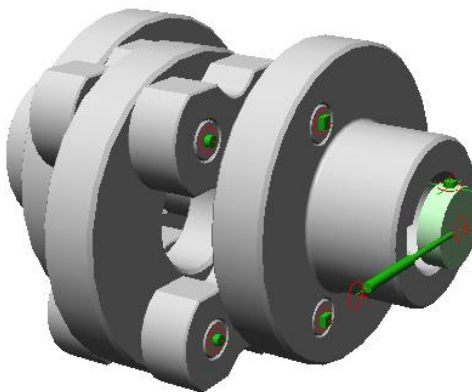
9.17. ábra. A tengelykapcsoló geometriai tervezési modellje

– Kinematikai párok definiálása

Az adott szerkezet a kinematikai vázlat jelölései szerint kinematikai párként kizárólag csuklókat tartalmaz. A modell egyszerű kezelhetősége érdekében a kiegészítő elemeket (csapok biztosításai, tengely, tengelykötés, stb.) nem célszerű a modellbe beépíteni, mivel az alapműkö-

dési jellemzőket (mozgásviszonyok) nem befolyásolják, és a modellt lényegesen könnyebb kezelni, ha kevesebb elemből épül fel, valamint a szimuláció futtatása is gyorsabb.

A tengely, illetve annak megtámasztását – amely az állvány szerepét tölti be - a kinematikai modellező szoftverben a háttérrel (background) tudjuk definiálni. A hajtott tengely radiális pozíciójának állítását egy lineáris mozgatással tudjuk biztosítani.

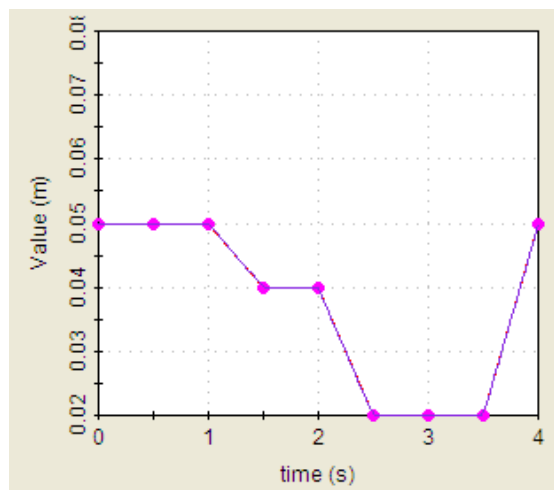


9.18. ábra. A tengelykapcsoló szimulálható 3D modellje

– Működési jellemzők megadása

Mivel a tengelykapcsoló kihajtó tengelyének radiális elmozgását szeretnénk vizsgálni működés közben, ezért egy ún. tesztprogramot állíthatunk össze, amely magában foglalja a meghajtó fordulatszámot, a terhelő nyomatékot, valamint a radiális elmozdulás definiálását. A terhelés beállítása egyúttal lehetőséget ad arra is, hogy kinematikai elemzést és végelelemes szilárdsági ellenőrzést is végrehajthassunk.

Az alábbi ábra a radiális elmozdulás beállítási függvényét szemlélteti.



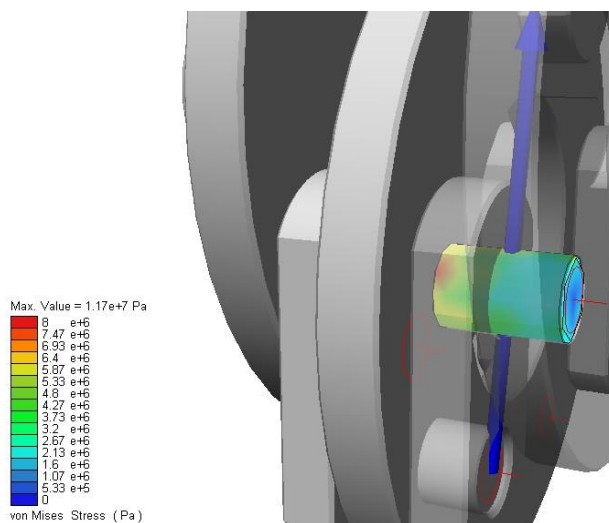
9.19. ábra. A hajtott tengely radiális mozgása a vizsgálati idő függvényében

– Eredmények megjelenítése

A tengelykapcsoló szimulációja során az alábbi vizsgálatokat végeztük:

- a működőképesség vizsgálata a radiális állítási tartományban.
- a hajtott tengely szögsebességének vizsgálata.
- az összekötő karok terhelésének vizsgálata.
- rögzítő csapok szilárdsági analízise.

A fenti eredmények közül a rögzítő csap végeselemes ellenőrzését szemlélteti az alábbi ábra.



9.20. ábra. Az összekötő karok rögzítő csapjainak végeselemes analízise

A mozgás szimuláció lehetővé teszi működés közben a folyamatos végeselemes analízist.

4. IRODALOM

- [1] **KÁTAI L.:** Kinematical Analysis of Mechanisms. egyetemi jegyzet, Gödöllő: SZIE Gépészmérnöki Kar, Mechanikai és Géptani Intézet 2006. 30 p.
- [2] J.E. Shigley – J.J. Uicker: Theory of Machines and Mechanisms, McGraw-Hill, Inc. New York 1995. ISBN 0-07-056930-4
- [3] O. Vinogradov: Fundamentals of Kinematics and Dynamics of Machines and Mechanisms; CRC Press, New York, 2000. ISBN 0-8493-0257-9

10. MŰSZAKI RAJZKÉSZÍTÉS ALAPJAI

**Szerző:
Mikó Balázs**

A modern számítógéppel segített tervező rendszerekben termék, illetve a szerelvény egy virtuális térben jön létre különféle modellezési építőelemek felhasználásával, azonban a műszaki kommunikáció hagyományos médiumának a műszaki rajz tekinthető. CAD rendszerek elengedhetetlen része a 3 dimenziós modell síkba vetítésével műszaki rajzot generáló modul. Bár a nézetek automatikusan generálhatók, a műszaki rajzkészítés szabályait ismernünk kell. A fejezet nem kívánja teljes részletességgel bemutatni a műszaki rajzkészítés minden előírását, pusztán egy rövid összefoglalót ad a legfontosabb előírásokról, irányelvekről és szabályokról. További részleteket a hivatkozott szakirodalom, illetve a képzésben előírt géprajz tankönyvek és jegyzetek tartalmazzák.

Egy gépészeti alkatrészt számos formában ábrázolhatunk. A legegyszerűbb az élőszóban vagy írásban történő alkatrész ábrázolás, mely egyszerű ugyan, de csak korlátozottan alkalmas pontos leírásra. Leginkább egyszerű alkatrészek, illetve szabványos alkatrészek esetén használjuk, pl. $\emptyset 10 \times 30$ -as illesztőszeg DIN 7 szerint.

Bonyolultabb szerkezetek illetve alkatrészek szabadkézi vázlat formájában ábrázolhatók. A képi ábrázolás több információt hordoz, a hozzá kapcsolódó szöveges kiegészítések pedig segítik a tervező gondolatainak jobb megértését. Leonardo da Vinci művészi igényességgel készítette el műszaki konstrukcióinak dokumentációját. Szabadkézi vázlatok elsősorban koncepciók felvázolására alkalmas, a méretek arányos ábrázolása nagy gyakorlatot igényel.

A gépészet területén a műszaki rajz a legelterjedtebb ábrázolási forma, melynek szabályait szabványok rögzítik. A műszaki rajz alapvetően egymásra merőleges vetületekben ábrázolja a konstrukciót, ezt egészítik ki nagyítások, kiemelések, a vetületeken adhatók meg a méretek, méter-, alak- és helyzetűrések, felületi érdesség és egyéb paraméterek.

A modern számítógéppel segített tervező rendszerekben (CAD rendszerekben) a termék, illetve a szerelvény egy virtuális térben jön létre különféle modellezési építőelemek felhasználásával, azonban a műszaki kommunikáció hagyományos médiumának ebben az esetben is a műszaki rajz tekinthető. CAD rendszerek elengedhetetlen része a 3 dimenziós modell síkba vetítésével műszaki rajzot generáló modul. Bár a nézetek automatikusan generálhatók, a műszaki rajzkészítés szabályait ismernünk kell.

10.1. Rajzkészítés CAD rendszerekben

A 3 dimenziós parametrikus testmodellező CAD rendszerek műszaki rajzkészítő modulja tartalmaz minden olyan eszközt, mely lehetővé teszi a különböző szabványok szerinti műszaki rajz elkészítését. A rendszerek biztosítanak minden olyan funkciót, mely a fejezetben ismertett ábrázolási, méretmegadási és egyéb lehetőségeket lefedik.

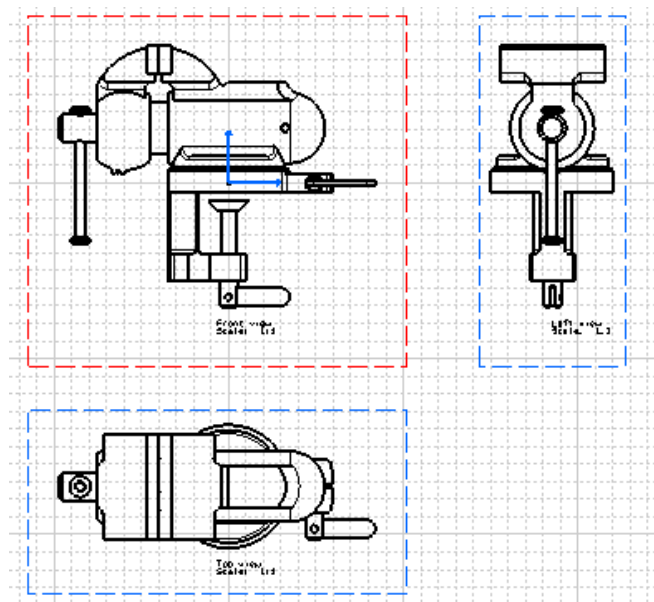
CAD rendszerekben a rajzkészítés a 3D modell alapján készül. A rajzon szereplő méreteket a 3D modell határozza meg, tehát a méret változtatásához a modellt kell változtatni. Néhány CAD rendszer biztosítja az oda-vissza kapcsolatot a modell és a rajz között, vagyis a rajzi méret megváltoztatása visszahat a 3D modellre és változik a rajz is.

A rajzkészítés előkészítéseként általában a 3D modellen ki kell jelölni a fő nézeteket. CAD rendszertől függően a 3D modellen lehet megadni a metszetek metszősíkját is. Fontos előkészítő feladat a modell paraméter táblájának kitöltése, amely a modell adatait tartalmazza: rajzszám, tételszám, név, méret, anyag, és egyéb szabadon definiálható illetve rendszerből adódó adat (pl. fájl neve, mérete, mentés dátuma stb.).

A CAD rendszerek rajzkészítő moduljai számtalan automatizmust tartalmaz, melyek célja a nem kreatív tevékenységek csökkentése, a parametrikusság és az asszociativitás minél szélesebb körű kiterjesztése.

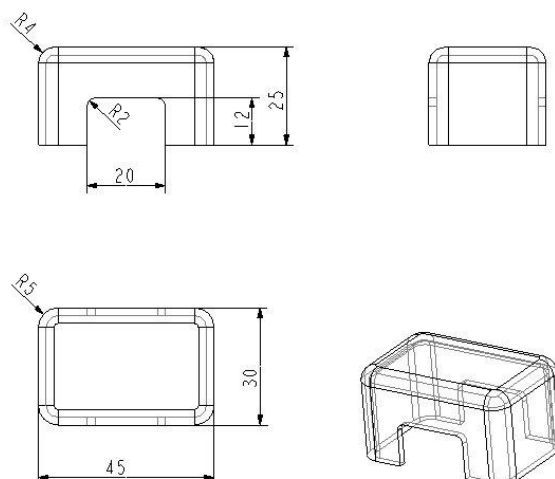
CAD rendszerek a rajzkészítés számos lépését egyszerűsítik:

- A nézetek, metszetek automatikusan generálhatók a 3D modell alapján, tehát ábrázolási hibák nem jelenhetnek meg a rajzon, nincsenek hiányzó élek, nézetvonalak, a vetített nézetek megfelelő helyre kerülnek (10.1. ábra).



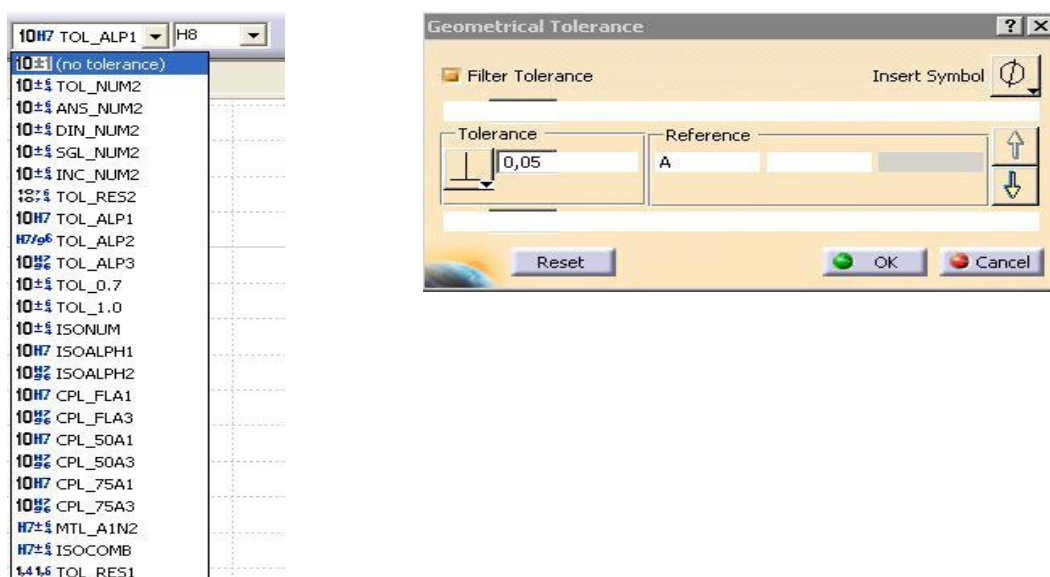
10.1. ábra. Automatikusan generált nézetek

- A rajzterület mérete rajzkészítés közben is változtatható. Ennek előnye nyilvánvaló, elég nehéz felmérni a rajzkészítés elején, hogy mekkora rajzterületre lesz szükség, illetve, hogy hova helyezzük el a főnézetet illetve a többi nézetet. Ezek könnyen módosíthatók, áthelyezhetők.
- Rajz sablonok alkalmazása. Egy modell létrehozásának kezdetekor hozzá rendelhetünk egy rajz sablont, mely tartalmazza a nézetek helyét, szövegmezőt, az állandó rajzi elemeket, így a modellezési folyamattal párhuzamosan készül a rajz is, tulajdonképpen automatikusan. Természetesen egy komplett rajz nem készülhet el tervezői beavatkozás nélkül, de a rajzkészítésre fordított idő csökkenhet. Ez különösen jellegre azonos alkatrészek tervezése esetén lehet jelentős segítség.
- Axonometrikus nézet készítése. Mivel axonometrikus kép elkészítése nagyságrendekkel egyszerűbb, mint hagyományos rajzolás esetén, így a jobb megértés érdekében szélszerű elhelyezni a rajzon. Az axonometrikus nézet könnyebben áttekinthetőbbé teszi a konstrukciót (10.2. ábra).



10.2. ábra. Három nézeti ábrázolás axonometrikus nézettel kiegészítve

- Az egyes nézeteken automatikus méretháló létrehozást alkalmazhatunk, ha a modellezés során a vázlat szerkesztés méreteit szeretnénk alkalmazni. Tehát nem kell újra megadnunk a méretháló elemeit, viszont a modellezés során úgy kell felépítenünk a modellt, úgy kell megválasztani a modellezési során alkalmazott bázisokat, hogy azok megfeleljenek a rajzi ábrázolás céljának.
- A méretháló automatikusan rendezhető megadott távolságra lévő segédvonalakhoz, ami az esztétikus méretháló kialakítását segíti.
- Tűrésezett méretekhez határeltérések kapcsolása és automatikus megjelenítése. ISO tűrések számértékének automatikus számításának lehetőségét szintén a legtöbb CAD rendszer tartalmazza. Ez nagy segítség a tűréstáblák összeállításánál, viszont itt is előre kell dolgozni a modellezés során, célszerű már a modellezett méreteket tűréssel ellátni.

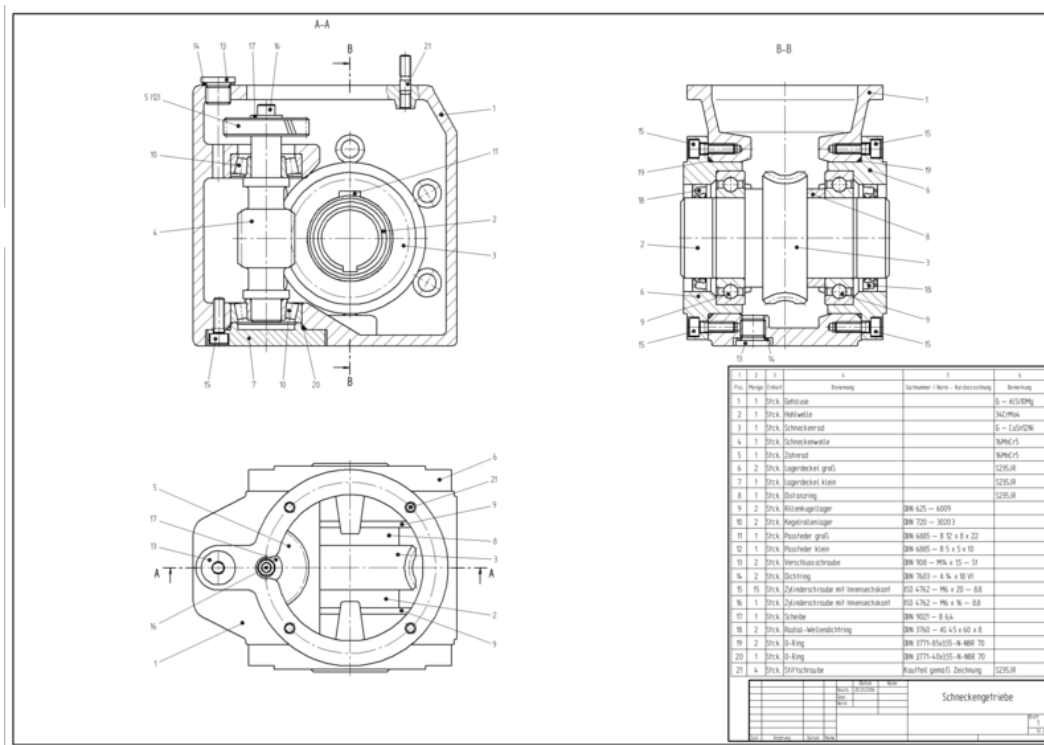


10.3. ábra. Tűrések megadása CATIA V5 CAD rendszerben

- Minden rajzon feliratmezőt kell elhelyezni a rajzlap jobb alsó sarkában. A feliratmező tartalmazza az alkatrész illetve szerelvény minden adatát. A feliratmezővel kapcsolatos előírásokat az *EN ISO 7200* szabvány rögzíti (3. *Melléklet*). CAD rendszerek lehetőséget adnak olyan szövegmező alkalmazására, mely a 3D modell paramétereivel van összekötve, így az adatok kitöltése automatikus. A redundancia mentes adatmegadás a hatékony információ áramlás egyik alapfeltétele. A funkció biztosítja, hogy a rajzokon, darabjegyzékeken azonos adatok szerepeljenek. Bizonyos paramétereket származtathatunk magából a modelltől is, mint például a befoglaló méretek vagy az alkatrész tömege, amely növeli az adatpontosságot, valamint csökkenti a nem kreatív tevékenységek arányát.
- Furattáblák automatikus készítése sok furattal ellátott alkatrészek gyártását könnyíti meg. A furattábla az alkatrész adott felületén, tehát egy felfogásból megmunkálható furatok átmérő értékét és középpontjainak koordinátáit tartalmazza, a könnyebb gyártás érdekében átmérő értékenként csoportosítva.
- Az összeállítási rajz az alkatrészekből felépített termék felépítését, az elemek kapcsolatát és a szerelvény csatlakozásait bemutató rajztípus (10.1. ábra). Az összeállítási rajzon adjuk meg a szerelés és az ellenőrzés számára szükséges helyzeti adatokat, a hegesztett, forrasztott kötések adatait, az illeszkedési előírásokat, a szerelés után megmunkálendő felületek adatait. Szükség esetén további adatok, információk is megadhatók, mint például a működésre vonatkozó adatok, a kapcsolódó alkatrészek kontúrjai (vékony folytonos vonallal) stb. Az összeállítási rajz az alkatrészrajzokhoz hasonlóan a 3D modell alapján generálható.
- Összeállításoknál robbantott ábra automatikusan generálható. A robbantott ábra (esetleg axonometrikus ábrázolásban) segíti a szerkezet felépítésének megértését, a konstrukció áttekinthetőségét, a szerelési folyamat tervezését.
- Az összeállítási rajzon az alkatrészeket és a szerelt egységeket tételszámozzuk. A tétel-szám helyett használható rajzszám, azonosító termékjel vagy azonosító betű is. A tétel-számot vagy más jelölést vékony vonalú mutató vonalon helyezzük el az alkatrész legjellemzőbb vetületén. A tételszámokat az áttekinthetőség érdekében függőleges oszlopba vagy vízszintes sorba rendezzük. Összeállítási rajzok tételszámozása automatikusan megoldható CAD rendszerekben. A CAD rendszer automatikusan elhelyezi a tételszámokat, mutató vonalakkal jelöli az alkatrészeket, képes automatikusan rendezni a tételszámokat, melyek stílusa szintén beállítható.
- A darabjegyzék a szerelt egység alkotórészeinek fajtáját és mennyiségét összegző dokumentum. A darabjegyzék készülhet önálló A4 méretű lapon vagy az összeállítási rajzon, annak részeként. A darabjegyzéket táblázatos formában készül, általában a következő oszlopokkal:
 - tételszám,
 - megjelölés (rajzszám),
 - megnevezés,
 - mennyiség,
 - tömeg,
 - mező (hol helyezkedik el az alkatrész az összeállításon),
 - megjegyzés.

A pontos felépítést a vállalati előírások tartalmazzák, ez a CAD rendszerekben sablonként definiálható. A darabjegyzék fejléce tradicionálisan a táblázat alján helyezkedik el, az alkatrészek növekvő tételszám szerint lentől felfelé következnek. A kis tételszámú alkatrészek általában a szerelvény fődarabjai. Bonyolult szerelvény esetén a darabjegyzéket célszerű csoportosítani alszerelvényenként, alkatrész típusonként (tengelyszimmetrikus, lemezszerű, szabványos stb), anyagonként vagy egyéb szempont szerint. Darabjegyzék automatikusan generálható CAD rendszerekben, így minden alkatrész szerepelni fog a darabjegyzékben. Amennyiben kitöltöttük az alkatrészek paraméter listáját a pontos név, méret, anyag, tömeg stb. adat lesz látható, a darabszámokat a program összegzi.

- A változáskövetés automatikus megjelenítése a rajzon a projektvezetés munkáját segíti, mivel kiderül belőle, hogy mikor, ki, milyen változtatást végzett a konstrukción.

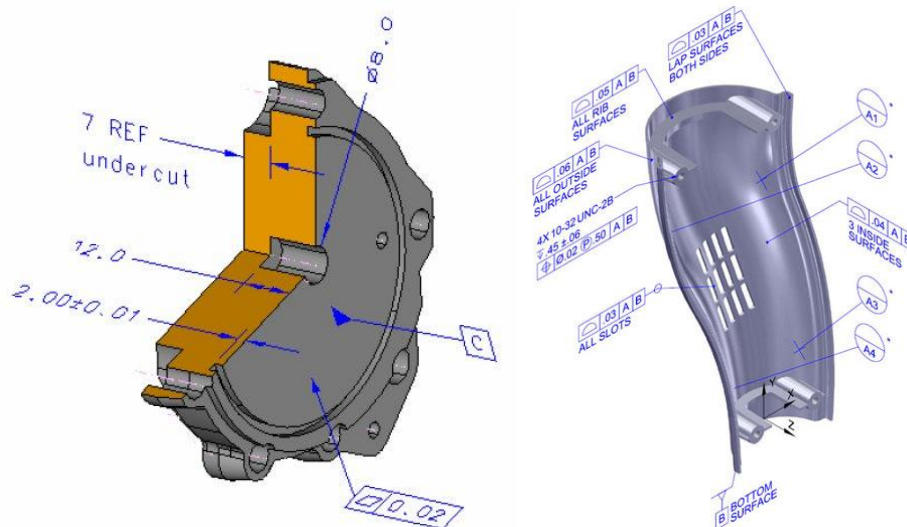


10.4. ábra. Összeállítási rajz darabjegyzékkel

A CAD technológia fejlődésével megjelent az igény (pl. a Toyota részéről) a rajz nélküli dokumentálásra. A hosszú évek alatt kialakult ábrázolási és méretmegadási irányelveket az ASME¹ Y14.5-2009 ajánlás tartalmazza, mely számos CAD rendszerben elérhető (10.5. ábra).

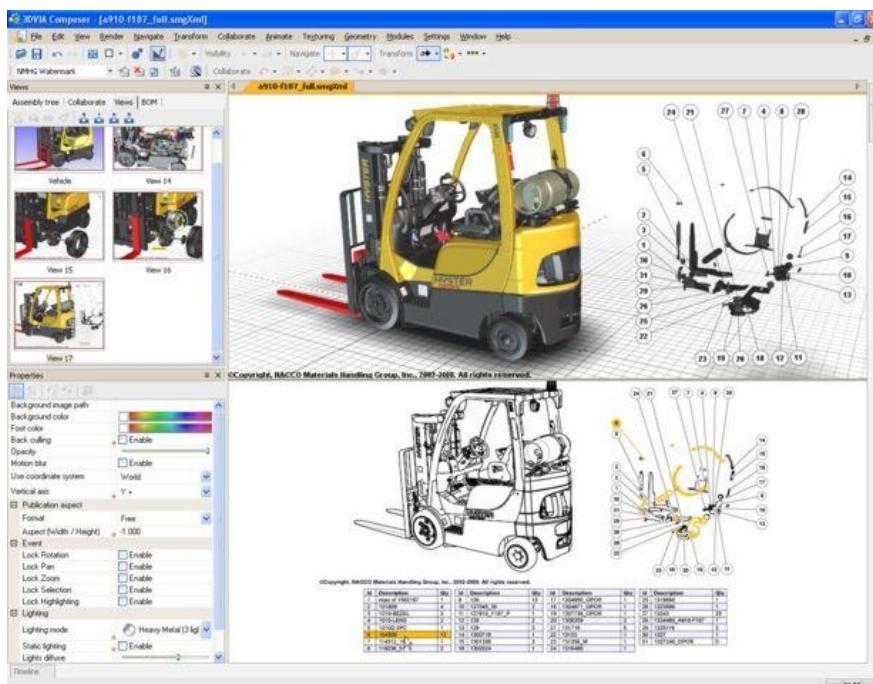
A módszer elsősorban méretszegény, alapvetően 3D-s felületekből álló alkatrészek esetén használható hatékonyan. Mint látható, az egyes méretek, tűrések és egyéb rajzi jelek térben jelennek meg, a metszetek láthatósága ki-be kapcsolható, a modell forgathatósága és nagyíthatósága miatt a nézetek és kinagyítások nem értelmezhetők, azonban előre definiált nézetek létrehozhatók.

¹ ASME – American Society of Mechanical Engineers – Amerikai Gépészmérnök Egyesület



10.5. ábra. 3D-s „rajz”

A műszaki kommunikáció sajátos, egyre fontosabb formája a nem műszaki szakemberek között megvalósuló információ csere. Ilyenkor a CAD adatok az információ csere alapjai, azonban a CAD rendszereknél egyszerűbben kezelhető eszközökre van szükség. A létező rendszerek (pl. 3DVia Composer, 10.6. ábra) a CAD adatok dinamikus, asszociatív megjelenítésére alkalmas, különböző nézetek, metszetek állíthatók be, kitakarhatók illetve kiemelhetők részek, beméretezhetők az elemek. Többféle megjelenítési mód alkalmazható, készíthető darabjegyzék, valamint a nézetek dinamikusak, forgathatók, nagyíthatók, a képeken mérések végezhetők illetve kommentek fűzhetők hozzá. Bár a CAD adatokat használjuk a prezentáció készítéséhez, azok mégsem kerülnek átadásra, így az adatbiztonság nagymértékű, a geometria nem másolható le.



10.6. ábra. 3DVia Composer

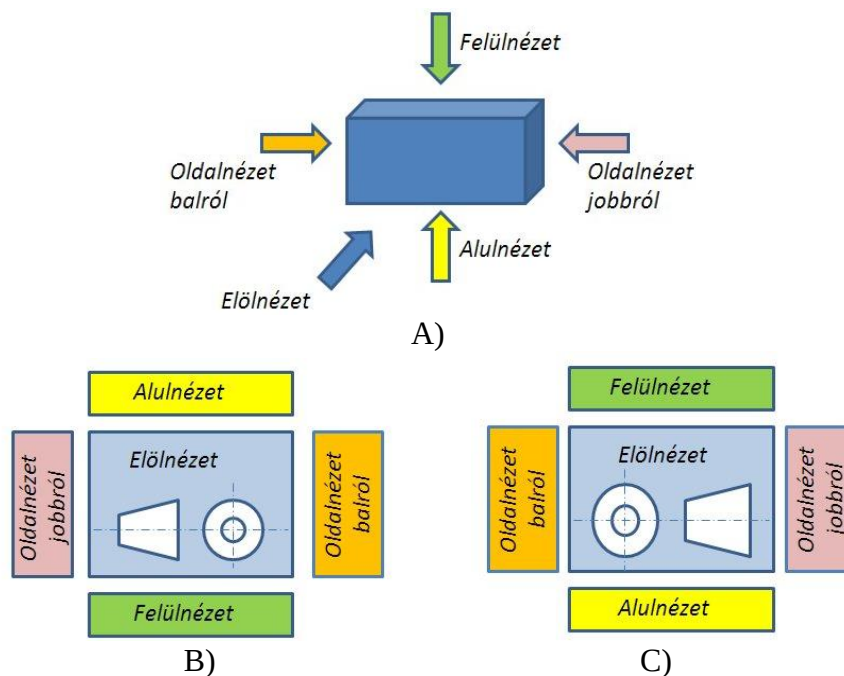
10.2. A gépészeti alkatrészek ábrázolása

Gépészeti alkatrészek műszaki ábrázolásának szabályait számos szabvány rögzíti, melyeket CAD rendszer alkalmazása esetén is be kell tartanunk. Mivel ezen szabványok földrajzi területenként eltérőek, a megfelelő szoftveres beállításokról a telepítés során kell gondoskodnunk. A CAD rendszerek szinte bármilyen rajzi megjelenítés beállítását lehetővé teszik.

A műszaki rajz szabványos készméretű átlátszó, áttetsző vagy nem átlátszó anyagon készülhet, ami lehet pausz, papír vagy egyéb anyag. A szabványos méretű rajzlapok méretei az MSZ ISO 5457 szabvány tartalmazza. E szabványos méretű lapok rövidebb oldala többszörözhető, az A4 méretű lapot álló, a többi álló és fekvő elrendezésben is használhatjuk.

A rajzon különböző vastagságú és típusú vonalakat alkalmazhatunk (MSZ ISO 128). Folytonos vastag vonallal jelöljük a látható éleket és körvonalakat. Folytonos vékony vonallal ábrázoljuk a métervonalakat, méretsegédvonalakat, sraffozást, menetmagot és különböző mutató vonalakat. Eltört vagy megszakított nézeteket és metszeteket vékony szabadkézi vagy törésvonallal jelölünk. Szaggatott vastag vonal jelöli a felületkezelés kontúrját. A nem látható éleket és körvonalakat szaggatott vékony vonal jelöli. Vékony pontvonal a középvonalakat, szimmetria vonalakat, furatköröket és osztóköröket jelöli. Metszősíkok megadására szolgál a vastag pontvonal. A vonalvastagság szabványos értékei: 0.7 / 0.35, 0.5 / 0.25 illetve 0.35 / 0.18.

Az alkatrészt egymásra merőleges nézetekben ábrázoljuk. A rajz központjában az előlnézet helyezkedik el, melyhez képest helyezük el a többi nézetet. A nézetek helye függ a vetítési rendtől. Az 1. vagy európai vetítési rend esetén (10.7. ábra B)) az egyes nézetek a vetítés irányában helyezkednek el, míg a 3. vagy amerikai vetítés esetén a nézeti irányban helyezkednek el (10.7. ábra C)).



10.7. ábra. Műszaki rajz vetítési rendszerei

Egy műszaki rajzon a minimálisan szükséges számú nézettel célszerű ábrázolni az objektumot, az előlnézet a fő nézet legyen, ez hordozza a legtöbb információt. A rajzlap méretét

úgy kell megválasztani, hogy a terület ki legyen használva, de ne legyen zsúfolt. A méterarány megválasztásánál ügyelni kell a láthatóságra és a rajzlap méretére.

Amennyiben az ábrázolt nézet nem a vetítésnek megfelelő helyen kerül ábrázolásra (pl. ferde nézet), a vetítési irányt nyíllal és betűvel jelöljük.

Metszetnek nevezzük a tárgy egy képzelt síkkal elmetszett részének szabályos, merőleges vetületét, amelyen egyaránt látható a metszősíkban lévő és a metszősík mögötti tárgy rész is. Csak a metszősíkban lévő tárgy rész kirajzolása a **szelvény**. A metszősíkot úgy kell elhelyezni, hogy a nézeten nem ábrázolható belső részeket mutassa meg. Az egy síkkal történő egyszerű metszet mellett alkalmazhatunk összetett metszeteket:

- befordított metszet metszősíkjai 90° -nál nagyobb szögben metszik egymást,
- lépcsőmetszet metszősíkjai párhuzamosak,
- befordított lépcsőmetszet esetén a metszősíkok sugár irányúak.

A metszősík nyomvonalának végét vastag vonallal, a vetítés irányát mutató nyíllal és azonosító betűvel jelöljük. Összetett metszetek esetén a metszősíkot pontvonallal, a töréspontokat vastag vonallal jelöljük, ha több metszősík szerepet egy nézeten, a töréspontokat a metszet betűjelével azonosítjuk.

A szelvény ábrázolása megadható:

- befordított szelvényként a nézetbe rajzolva,
- a nézet megszakításában ábrázolva,
- a helyét meghatározó középvonalon,
- a rajzlap más helyén,
- a metszősíkok sorrendjében,
- a tárgy rész határáig rajzolva, részszelvényként.

Részmetszetnek nevezzük a metszősíkban ábrázolt tárgy rész nem teljes kirajzolását, a nem kirajzolt részt elhagyhatjuk, vagy nézetben ábrázoljuk (kitörés). A részmetszetet szabadkézi vonallal vagy törésvonallal határoljuk. Tengelyszimmetrikus alkatrészek tipikus ábrázolási módja a *félnézet-félmetszet* ábrázolás, amikor a nézet – metszet határa a tengelyvonal.

A metszetben ábrázolt tárgyakat általános metszeti jelöléssel, vékony folytonos vonalkázással (sraffozás) látjuk el, mely 45° -os szöget zár be a rajzlap szélével. Amennyiben a vonalkázás párhuzamos lenne az ábrázolt tárgy kontúrjával, a 30° és 60° is megengedett. Egy elem metszetén a vonalkázás iránya és sűrűsége mindig azonos. A vonalkázás sűrűségének megválasztása az ábra méretétől, jellegétől és az esetleges kapcsolódó alkatrészeketől függ. Csatlakozó alkatrészek esetén az irány, a sűrűség illetve az eltolás jelzi, hogy másik alkatrész kapcsolódik. 2 mm-nél keskenyebb szelvényű alkatrészeket nem sraffozunk, hanem feketítjük, ha több ilyen feketített alkatrész kapcsolódik, az egybefolyás elkerülése érdekében kissé széthúzzuk az alkatrészeket.

A vonalkázás mintázatával utalhatunk az alkatrész anyagára:

- fém, fémötvözetek: 45° -os folytonos vonal,
- műanyag, gumi: egymást keresztező 45° -os folytonos vonal,
- üveg, plexi és más átlátszó anyag: 45° -os rövid vonalszakasz, két oldalán párhuzamos, rövidebb vonalak,
- folyadék: vízszintes szaggatott vonal, föntről lefelé növekszik a vonalsűrűség,
- fa: a fa erezetét utánzó mintázat,
- szemcsés anyag: véletlenszerűen elhelyezett pontok.

Amennyiben a rajz méretaránya nem teszi lehetővé a kis méretű részek ábrázolását és a rajz méretaránya sem növelhető, az ábrázolni kívánt rész kinagyítható. A nagyított részt körbe kell jelölni, betűvel azonosítani és külön területen a betűjel és a méretarány feltüntetésével ábrázolható.

10.3. Méretmegadás

A méretmegadás a méretvonalak, méretsegédvonalak és méretszámok felírásából áll. Az ábrázolt objektum méretét és alakját mindig a méretszámok határozzák meg, függetlenül a rajz méretarányától.

Gépipari műszaki rajzon a hosszméreteket milliméterben adjuk meg a mértékegység megadása nélkül. Szögméreteket fokban, percben és másodpercben adjuk meg a mértékegységgel együtt, a fok és perc csak egész szám lehet, a másodperc tizedes tört is, a 0° is kiírandó ($0^\circ 40' 3,2''$).

A tárgy ábrázolása során minden méret csak egyszer adható meg, ha valamilyen okból az adott méretet más nézetben is meg kívánjuk adni, az kerek zárójelbe kell tenni, mint tájékoztató méret. Ugyancsak tájékoztató méretként, zárójelben adunk meg olyan méreteket, melyek más méretekből kiszámíthatók. Tájékoztató méret nem használható fel gyártáshoz, ellenőrzéshez, szereléshez, és nem tűrésezhető. Amennyiben egy méretet a későbbi hivatkozás miatt jelölni szeretnénk, mutató vonalon elhelyezett belüvel tehetjük meg (pl. „D méret festés előtt ellenőrizendő”).

A **méretvonal** vékony folytonos vonalú egyenes vagy körív. A méretvonal elhelyezhető

- a kontúrvonalak között,
- a közép-, osztó-, a tengely- vagy szimmetriavonalak között,
- méretsegédvonalak között, vagy
- vegyesen az előbb felsorolt vonalak között.

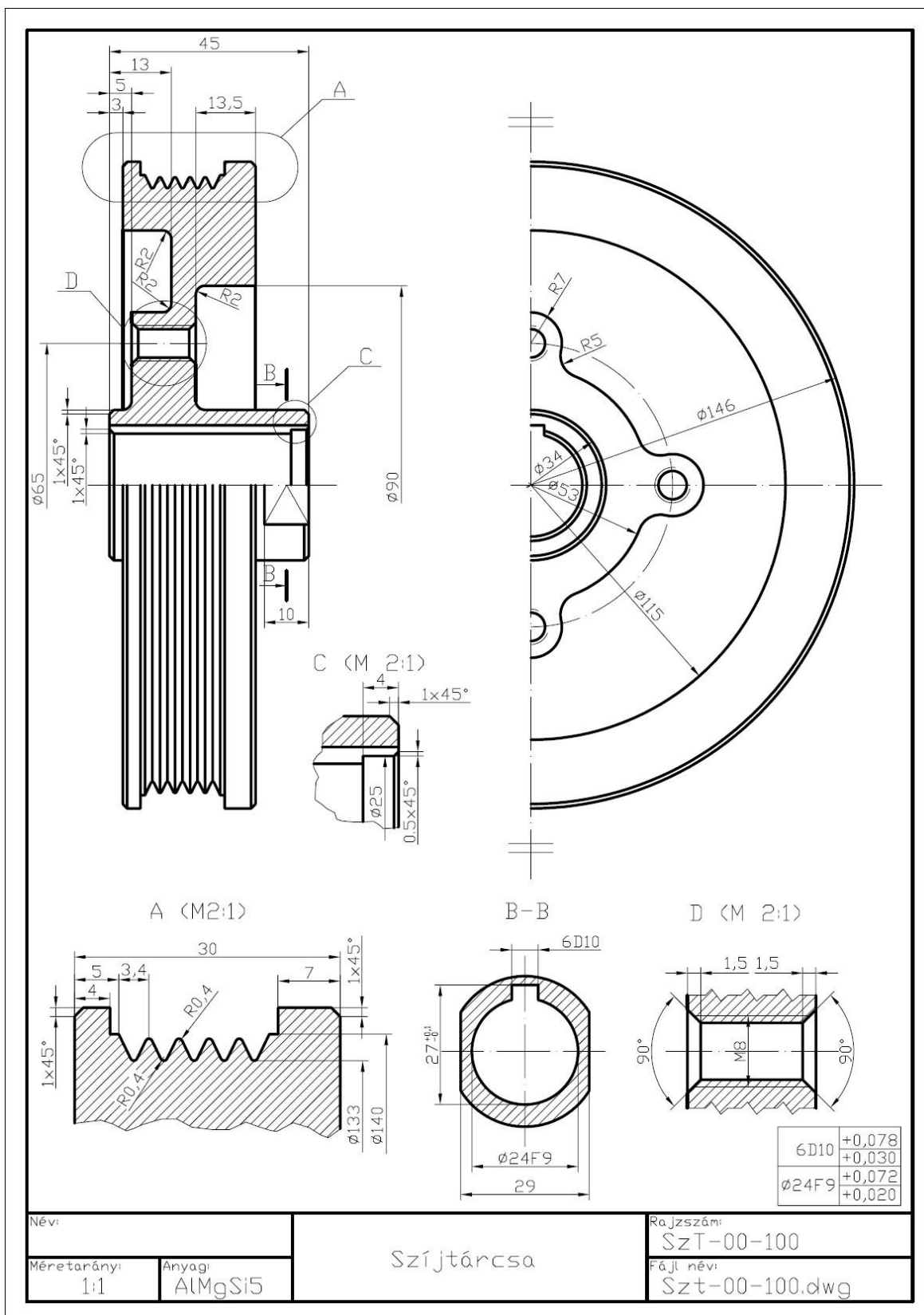
Egyenes szakasz méretvonala a méret irányával párhuzamos. Több egyenes szakasz méretvonalát úgy kell elhelyezni, hogy egymástól legalább 7 mm-re legyenek, a kontúrhoz legközelebbi pedig legalább 10 mm-re, a méretvonalat más vonal általában nem keresztezheti, méretvonal más vonallal nem eshet egybe. Bizonyos esetekben a méretvonal nem rajzolható ki teljesen:

- kör átmérőjének megadásakor, ha csak a felét rajzoljuk meg,
- szimmetrikus tárgy félnézet-félmetszetén,
- fél vetületen,
- a rajzon nem ábrázolt bázistól megadott méret esetén.

A méretvonalat 2.5 mm hosszú, $15-20^\circ$ -os nyilakkal kell határolni, más megoldás nem megengedett (pl. 45° -os ferde vonal). Mérethatároló nyilat nem keresztezheti semmi, szükség esetén az alatta futó kontúrvonalat is meg kell szakítani. Ez az elv több CAD rendszerben nem valósítható meg, ekkor a méretvonalak megfelelő elhelyezésével kell megoldani az egyértelmű értelmezhetőséget. Ha a méretvonal hossza nem elegendő a méretnyílak kirajzolásához, a méretvonalat meg kell hosszabbítani, és a nyilakat kívül elhelyezni.

Méretláncban megadott kis méretek esetén, ahol a méretnyílnak nincs hely, pont rajzolható mérethatárolóként (pont mérete: $\phi 1$ mm) vagy elhagyható a mérethatároló.

Vonalkázott rész felett lehetőleg ne adjunk meg méretet. Töréssel ábrázolt hosszú alkatrész esetén a méretvonal folytonos. Körív hosszának megadása koncentrikus körívvel történik. Szaggatott vonallal ábrázolt nem látható él méretmegadása nem lehetséges, metszetet, rész-metszetet kell rajzolni.



10.8. ábra. Szíjtárcsa műhelyrajza

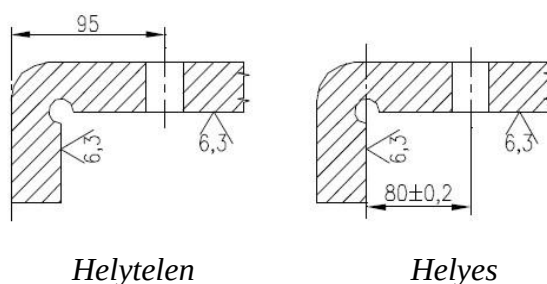
A **méretsegédvonal** olyan vékony folytonos egyenes vagy körív, amely a méretvonalon 2-4 mm-re túlnyúlik és a méret kivetítésére használjuk, ha a méret megadásához a méretvonal közvetlenül nem helyezhető el. a méretsegédvonal általában merőleges a méretvonalra, de ferde kivetítés esetén nem. Hegyesszögű ívhossz megadásakor a méretsegédvonalak a szögfelezővel párhuzamosak, szög megadásakor a méretsegédvonalak sugár irányúak, a szögszárak folytatásai. Méretsegédvonalak szükség esetén más vonalakat keresztezhetnek, azonban érdemes ügyelni az átlátható méretmegadásra.

A **méretszámot** a méretvonal közepe fölött, azzal párhuzamosan helyezzük el, ez alól kivétel a koncentrikus kör belsejébe írt méretszám, amit nem középen helyezzük el. A méretszám mérete általában 3.5 mm. Méretszámot megadhatunk méretvonal meghosszabbításán, vagy mutatóvonalon is. Ha a méretvonalak szimmetrikusan helyezkednek el egymás alatt, a méretszámokat célszerű jobbra-balra kissé eltolni. Metszet vonalkázását a méretszám felett meg kell szakítani. Sugár megadása esetén R , átmérő esetén $\varnothing$, négyzet esetén $\square$ jelölést alkalmazunk.

Ha az önálló méretek egymáshoz csatlakoznak, soros méretláncról, ha legalább egy közös felületre vonatkoznak, párhuzamos méretláncról beszélünk. Ezen soros és párhuzamos, valamint az egyéb elemi méretek alkotják a mérethálózatot. A mérethálózat felépítése általában derékszögű, vagyis a méretvonalak többsége vízszintes illetve függőleges, ritkán előfordul a polár-koordinátás méretmegadás is, amennyiben az alkatrész jellege megköveteli. A mérethálózat kialakításának célja az alkatrész felületeinek helyzetének és alakjának meghatározása a gyártás és a szerelés részére. A mérethálózatot célszerűen megválasztott bázisfelületekre kell építeni. Ilyen bázis lehet a működés szempontjából fontos határvonal, tengelyvonal, felfekvő sík nyomvonala stb. A bázisfelületeket úgy kell kiválasztani, hogy azoktól az alkatrész geometriai elemeinek méretét és helyzetét könnyen és egyértelműen meg lehessen adni, a gyártási és szerelési bázisfelületekkel egybeessen.

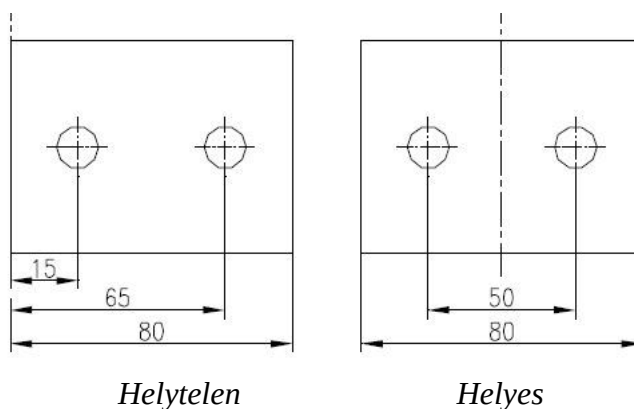
Az alkatrész főirányaihoz képest ferdén álló részeket olyan bázistól kell méretezni, amihez képest a méretvonalak párhuzamosak illetve merőlegesek. Ha egy elem méretei több vetületen is megadhatók, akkor az elem méreteit arra a vetületre kell összegyűjteni, ahol a legtöbb méret megadható. Félnézet-félmetszet ábrázolás esetén a külső geometria méreteit a nézet, a belső geometria méreteit a metszet oldalon jelöljük. Egymáshoz csatlakozó alkatrészek csatlakozó felületeit azonos bázistól, azonos struktúrában kell megadni.

A következő részben a mérethálózat kialakítására látunk helytelen és helyes példákat, melyek rávilágítanak a mérethálózat helyes kialakításának szükségességére és főbb irányelveire [3]. Megmunkálatlan felület méretezési alapfelület céljára alkalmatlan. Ha a 80-as méret (10.9. ábra) tűrésezett, úgy helytelen a megmunkálatlan felületet méretezési alapfelületül választani.



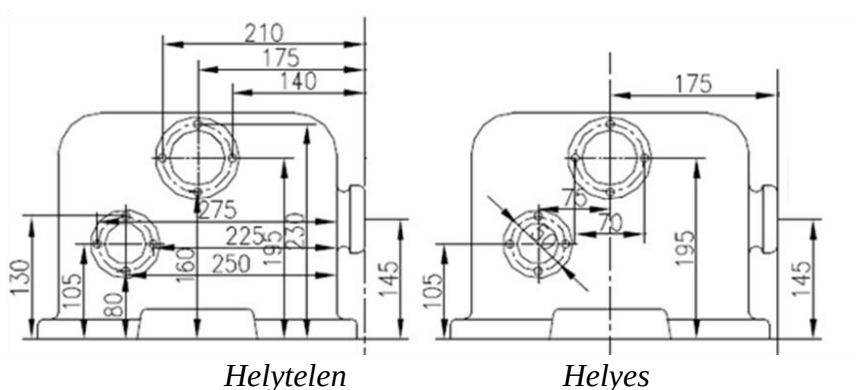
10.9. ábra. Méretezési bázis helytelen és helyes megválasztása

Ha a furatok helyzetének szimmetrikusnak kell lenni, úgy nem a munkadarab élétől kell kiindulni, hanem középtengelyt rajzolva, ennek megfelelően írjuk be a méreteket (10.10. ábra). Ha ugyanis a 80-as méret nagyon pontatlan, akkor a furatok középtávolsága egyenlő.



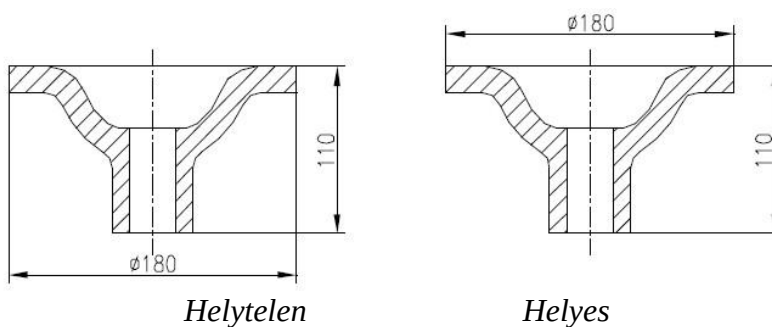
10.10. ábra. Szimmetrikus méretmegadás

A csatlakozócsonkok mindegyike egy önálló csatlakozórendszert alkot (10.11. ábra), ezek furattávolsággal stb. nem egymáshoz, hanem csak egymás között illeszkednek.



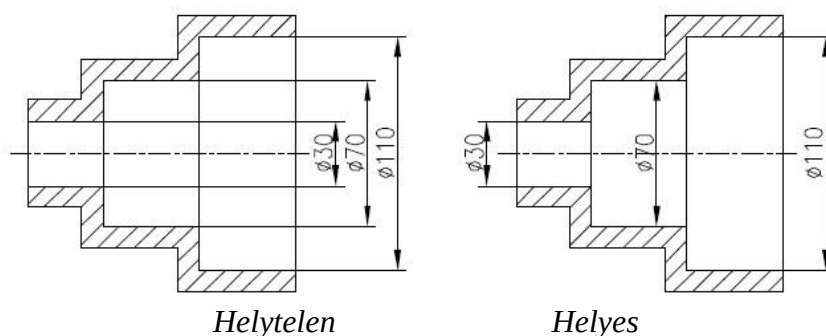
10.11. ábra

A méretsegédvonalak legyenek minél rövidebbek, a méretvonal kerüljön a méret közelébe. Minden méret ott tüntetendő fel a rajzon, ahol hosszú méretsegédvonal nélkül lehetőleg a méretezendő felülethez közel, jól láthatóan beírható (10.12. ábra).



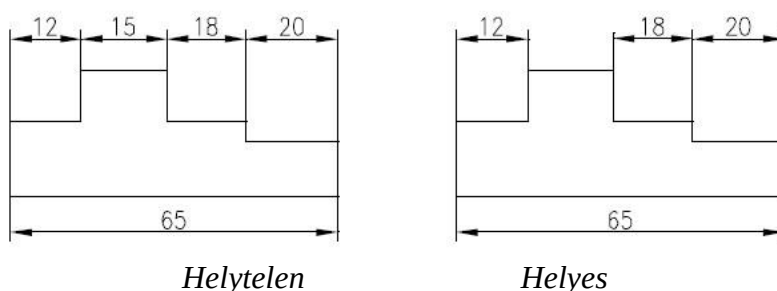
10.12. ábra

Hosszú méret segédvonalakat igénylő, sok egymás alatt fekvő méret elkerülendő (10.13. ábra), viszont a nézetben lévő méretek is lehetnek zavaróak.



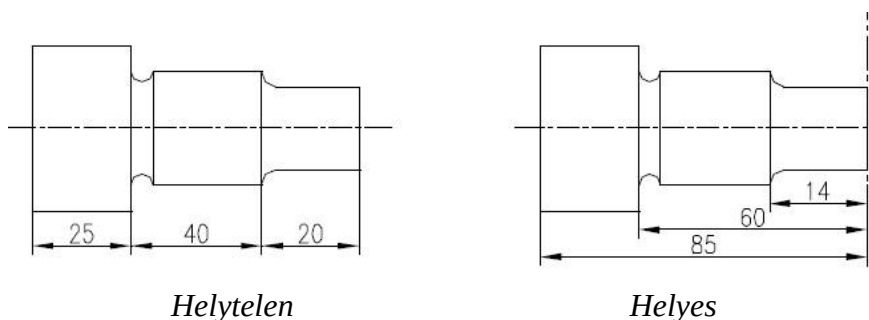
10.13. ábra

Láncot alkotó méretmegjelölések lehetőleg korlátozandók, mert a tűrések összegeződhetnek, és így egyik méret a másik számára helytelen vonatkoztatási alapot alkot (10.14. ábra). Célszerű egy bázisról méretezni az alkatrészt, illetve kerülni a redundáns méretmegadást.



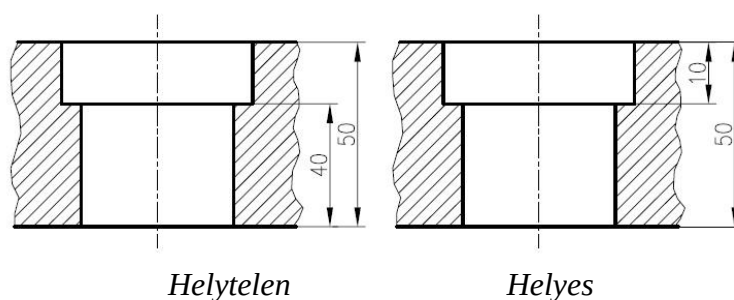
10.14. ábra Méretlánc megadása

Ha a kis tengelyt rúdból munkálják ki (10.15. ábra), akkor előbb a 60-as hosszt és utána a 20-as hosszt esztergálják, végül pedig a darabot a 85-ös méretre szúrják le. Ennek megfelelően a jobboldali felületet választják méretezési alapvonalként és a méreteket ebből kiindulva vezetjük rá a rajzra. Ez a méretmegadás van összhangban a gyártással.



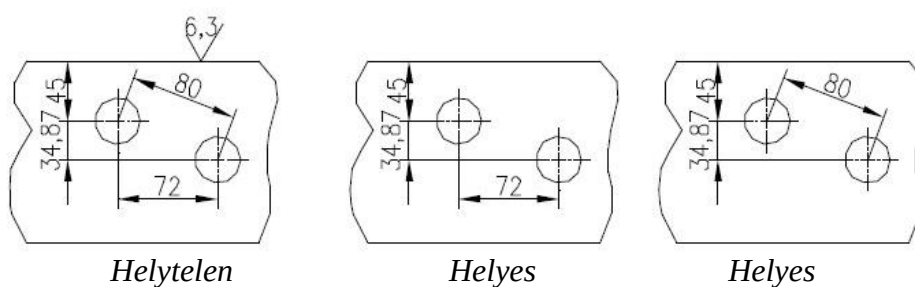
10.15. ábra Tengely jellegű alkatrész méretmegadása

A furatot előbb fúrják, azután süllyesztik, tehát a süllyesztési mélység jelölendő, amelyet a gépen is be lehet állítani (10.16. ábra). Nemcsak gyártási, de mérési szempontból is ez a helyes méretmegadás.



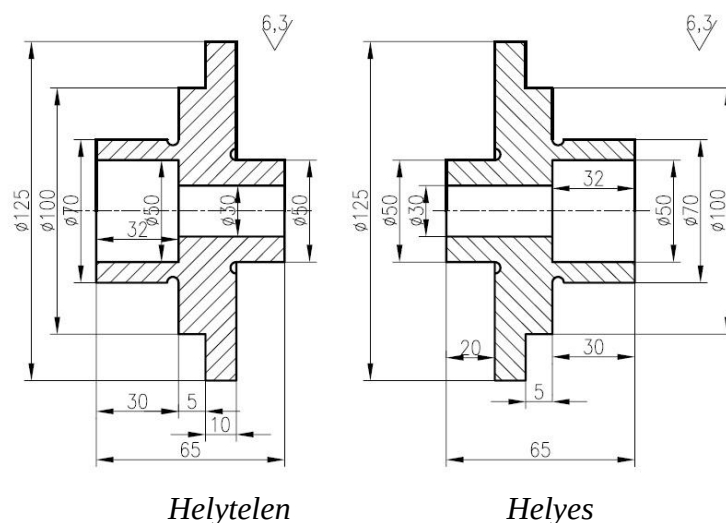
10.16. ábra Süllyesztett furat méretmegadása

Furatoknak egymásközi helyzetével kapcsolatban három méret nem tartható be (10.17. ábra). Az egyik megoldás szerint – baloldalon – csak a vízszintes és a függőleges távolságokat adják meg (különösen akkor, ha a műhelyben a fúrás koordináta-mozgású asztallal ellátott fúrógépen végzik, mint pl. a helyzetfúrógép a készülékgyártásnál), vagy a másik megoldás szerint – jobboldalon – csak két méretet, amelyek a helyzet meghatározására elegendők. Ha azonban valamilyen oknál fogva három méretet kell megadni, úgy az egyik méretet tájékoztató méretnek kell minősíteni.



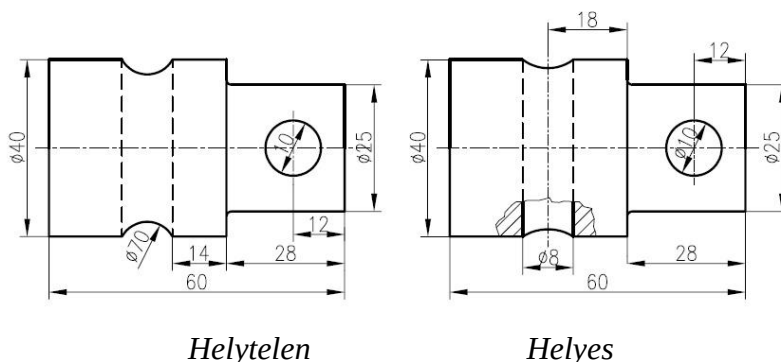
10.17. ábra

A munkadarabot két felfogásra kell esztergán megmunkálni; az első felfogásnál kívülről fogják meg, a másodiknál pedig belülről egy tüskére. Ajánlatos a méreteknél olyan értelmű szétválasztása, hogy az első és a második felfogásra vonatkozó méretek elkülönítve jelentkezzenek (10.18. ábra).



10.18. ábra

Ha a munkadarabon különböző munkákat végeznek el, mint 10.19. ábra esetében az esztergálás és a fúrás, akkor a vonatkozó méretmegjelöléseket is el kell osztani. Ezáltal a rajz az esztergályos és a fúrós számára áttekinthetőbbé válik.



10.19. ábra

10.4. Méret-, alak- és helyzettűrések

A gyártás során pontos méret előállítása nem lehetséges. Bár az egyes gyártási eljárások pontossága jelentősen eltér egymástól, még a legpontosabb eljárással is csak bizonyos hibával tudjuk legyártani. A megengedett hiba a tűrés, amely vonatkozhat méretre, geometriai alakra és helyzetre.

A **mérettűrést** többféle képen adhatjuk meg.

Amennyiben nem adunk meg a méretszám után tűrést, szöveges információként adhatjuk meg. Ez kétféle módon történhet. Vagy a hossz és szögméretek általános tűrései című, MSZ ISO 2768 számú szabványra hivatkozunk, vagy külön szövegben adjuk meg a tűrések értékeit. A szabvány finom (f), közepes (m), durva (c) és nagyon durva (v) tűrésosztályokat különböztet meg, valamint a méreteket, lekerekítési sugarakat illetve szögméreteket mérettartományokba sorolja. A rajzon a következő képen hivatkozhatunk: „Tűrésezetlen méretek tűrései MSZ ISO 2768-m szerint”. Egy 90mm-es méret esetén ennek értéke $\pm 0,3$ mm. A szabvány szerzői jogi okok miatt nem közölhető, megtalálható a [4] irodalomban.

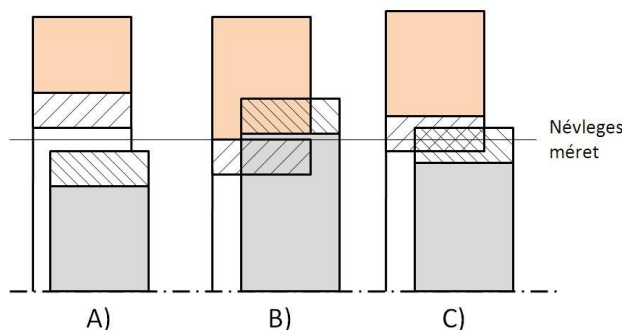
A másik szöveges megadási mód a szövegmező részeként, általában táblázatos formában rögzíti az egyes méretek tűréseit.

Tűrést megadhatunk az *alsó és felső határeltérés* számszerű megadásával is. Ebben az esetben a határeltérések lehetnek szimmetrikusak (pl. $90 \pm 0,2$) illetve aszimmetrikusak (pl. $90 + 0,2 / - 0,1$). Gyártási szempontból a szimmetrikus tűréseket részesítjük előnyben. Ehhez hasonló módon megadhatjuk a méretet a két *határmérettel* is (pl. $89,8 - 90,2$).

A tűrés megadható szabványos illesztési rendszerben (MSZ EN 20 286, ISO 286). Ebben az esetben a névleges méret mellett egy betű és egy szám jelöli a tűrés értékét. A betű futatok esetén *a* és *zc* közötti kis betű, külső méret (csap) esetén pedig nagy betű. A betű adja meg a névleges mérethez képest a tűrésmező elhelyezkedését, a szimmetrikus tűrésmezőt a *j / J* betű jelzi. A tűrésmező szélességét a betű utáni szám adja, amely 01, 0, 1, 2, ... 17 érték lehet. Minél nagyobb a szám, annál szélesebb a tűrésmező. Például 90k6 egy nem kör keresztmetszetű külső méret, melynek tűrése $90 + 0,025 / + 0,003$.

Csatlakozó alkatrészek illeszkedő méreteinek tűrés megadása egységes *illesztési rendszerben* kezelhetjük, ahol egy közös alpméretű mérethez tartozó tűrések határozzák meg a játék vagy a túlfedés értékét. Játék esetén a furat mérete mindig nagyobb a csap méreténél, fedés esetén a csap mérete nagyobb a furat méreténél. Laza illesztés esetén az alkatrészek játékkal

illeszkednek, vagyis a furat tűrésmezője teljes egészében a csap tűrésmezője felett vagy azt érintve helyezkedik el. Szilárd illesztés esetén az alkatrészek csak fedéssel illeszkednek, tehát a csap tűrésmezője helyezkedik el a furat tűrésmezője felett vagy éppen csak érinti azt. Átmeneti illesztés esetén az alkatrészek illeszkedhetnek játékkal és fedéssel is a gyártás függvényében (10.20. ábra).



10.20. ábra A) Laza illesztés, B) Szilárd illesztés, C) Átmeneti illesztés

A megfelelő illesztés alap-furatrendszerben és alap-csaprendszerben adhatjuk meg. Első esetben egy fix tűrésű furathoz különböző csaptűréseket választva hozhatjuk létre a megfelelő játékot illetve fedést. Alap-csaprendszerben értelemszerűen fordítva történik. Az illesztés jellegét és mértékét a tervező a szerkezet funkciójának illetve a gyártási technológiának megfelelően határozza meg. A szabvány illetve mérnöki kézikönyvek tartalmaznak ajánlásokat az illesztés megválasztására. Például:

H7/h6 – Laza illesztés – Jó kenés esetén kézzel még éppen összehozható – Pontos központosítások, feltételesen eltolható darabok – Példák: sebességváltók váltókerekei a tengelyen; körmös kapcsolók; csapágyperselyek és vezetőperselyek külső átmérőinek és befogó furatainak az illesztése; indexcsapok és perselyük; marók illesztése marótengelyen.

Alaktűrésnek nevezzük a valóságos felület vagy profil alakjának legnagyobb megengedett eltérését a névleges felület vagy profil alakjától. Másként fogalmazva a valóságos felület egyes pontjainak a névleges felülettel párhuzamos olyan elméleti felület – a test anyagán kívül elhelyezkedve – a valóságos felülettel csak egy pontban érintkezik.

Az alaktűrés fajtái:

- egytengelyűség tűrés,
- síklapúság tűrés,
- köralak tűrés,
- hengeresség tűrés,
- hossz-szelvény profiltűrés.

A **helyzettűrés** az alkatrész valamely elemének rajzon meghatározott névleges helyzetétől megengedett legnagyobb eltérése. A helyzettűrést általában valamilyen bázishoz viszonyítjuk. A helyzettűrés előírásakor a vizsgálandó elem alaktűrését figyelmen kívül hagyjuk. A helyzetűrés-mező a síknak vagy a térnek azon része, amelyben a vizsgálandó elemnek el kell helyezkednie.

A helyzettűrések fajtái:

- párhuzamosság tűrés,
- merőlegesség tűrés,
- hajlásszög tűrés,
- egytengelyűség tűrés,
- szimmetria tűrés,
- pozíció tűrés,
- tengelymetsződés tűrés.

Az **összetett alak- és helyzettűrés** jellemzője, hogy az előírt tűréstérben a vizsgálandó elem minden pontjának el kell helyezkednie a vonatkoztatási hossz határain belül. Ebből következően a vizsgálandó elem alaktűrését is figyelembe kell venni.

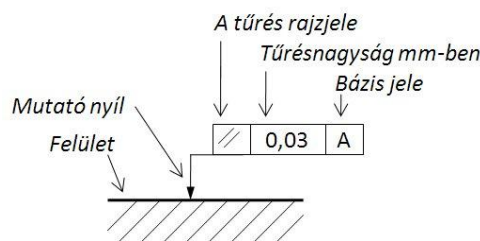
Az összetett alaktűrések fajtái:

- radiális ütés tűrés,
- homlokütés tűrés,
- adott irányú ütés tűrése,
- teljes radiális ütés tűrése,
- teljes homlokütés tűrése,
- adott profil alaktűrése,
- adott felület alaktűrése,
- kombinált tűrések.

Ezek értelmezését és rajzjeleit a *1. Mellékelt* tartalmazza.

Az alak és helyzettűrés a rajzon megadható függő tűrésként és nem függő tűrésként. **Függő tűrés** olyan változó tűrés, amely az adott alkatrész ráfekvő vizsgált elemének tényleges mérete és a legnagyobb anyagterjedelemnek megfelelő méret (a csapok felső és a furatok alsó határmérete) különbségének megfelelő értékkel az előírtat túllépheti. A függő tűrés jele körbe foglalt nagy M betű. **Nem függő tűrés** megadása esetén a tűrés értéke a rajz alapján készítendő összes alkatrésze állandó, és független a vizsgálandó elem tényleges méretétől. A nem függő tűrések alkalmazása a gyakoribb.

Az alak és helyzettűrést tűréskeretben adjuk meg (10.21. ábra) (MSZ ISO 1101), amennyiben bázis megadása nem szükséges, a harmadik mezőt elhagyjuk. A tűréskeretet lehetőleg vízszintesen helyezzük el, és azt semmilyen vonal nem keresztezheti. A tűréskeretet egyenes vagy tört, nyílbán végződő kötővonallal kapcsoljuk a kontúrvonalhoz, közép- vagy tengelyvonalhoz, méretsegédvonalhoz vagy egyéb jelölő vonalhoz.



10.21. ábra Alak és helyzettűrés megadása

Alak- és helyzettűrést abban az esetben adunk meg, ha az a konstrukció működése szempontjából elengedhetetlen. Figyelnünk kell a mérettűrésekkel való összhangra (pl. köralak tűrés nem lehet nagyobb, mint az adott átmérő mérettűrése). Szintén megfontolandó, hogy az előírás hogyan, milyen eszközökkel ellenőrizhető. Az alak és helyzettűrés általános értékeit az MSZ ISO 2768 szabvány tartalmazza, megadni csak ennél szigorúbb értékeket érdemes.

10.5. Felületi minőség jelölése

A felületi minőség a tényleges felület minőségére utaló fizikai és geometriai jellemzők összessége. A felületminőség előírása a felület egyes jellemzőinek vagy összességüknek meghatározását illetve a megengedett eltérés megadását jelenti.

A felületminőséget meghatározó tényezők:

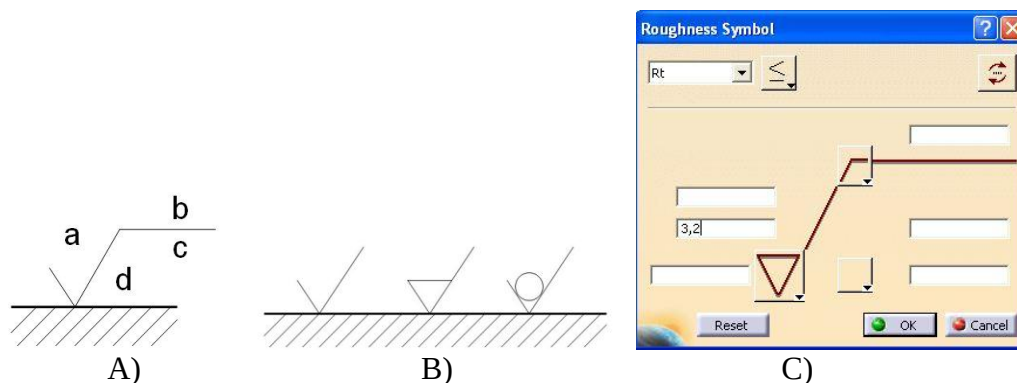
- a felületi egyenetlenségek,
- a felület mechanikus kialakítása,
- a felület bevonása.

A felületi egyenetlenség a felület hullámosságából és az érdességből áll.

Az érdesség a munkadarab valóságos felületének viszonylag kis térfelületű, különféle jellegzetes mintázatot mutató ismétlődő egyenetlensége. A felületi érdesség kialakulása igen összetett. Forgácsolás során a szerszám anyaga, geometriája, a munkadarab és a szerszám mozgása, a különböző véletlenszerű zavaró hatások együttesen határozzák meg. Öntési technológiák esetén a szerszám felülete másolódik át az alkatrészre, így alapvetően ez határozza meg a felület minőségét, míg képlékeny alakítás során az anyag minőség és a súrlódási viszonyok eredménye a felületi érdesség. A különböző gyártási eljárásokra jellemző felületi érdesség értékeit az 2. *Melléklet* tartalmazza.

A leggyakoribb érdességi jellemző az *átlagos érdesség*, melynek jele R_a . Az átlagos érdesség a valóságos profil pontjainak a középvonaltól abszolút értékben mért átlagos távolsága az alaphosszon. Az *egyenetlenség-magasság* (jele: R_z) az alaphosszon belül az észlelt profil öt legmagasabb és öt legmélyebb pontjának távolságából számított átlag. Az R_y *maximális egyenetlenség* a legmagasabb és a legmélyebb pont közötti távolság. Ezen kívül számos 2D-s és még összetettebb 3D-s felületminősítő paraméterek léteznek, de a műszaki rajzokon e három a leggyakrabban szereplő mérőszám. A felületi érdesség mértékegysége μm , lehetséges értékeit az MSZ ISO 1302 szabvány rögzíti.

Felületi érdességet azon felületekre adunk meg, ahol funkcionális szempontból ez szükséges és a gyártási eljárásra jellemző érdesség nem elegendő. Az érdességet az MSZ ISO 1302 szabvány alapján a 10.22. ábra szerinti érdességi jellel adjuk meg, ahol az *a* mezőbe írjuk az érdességi jellemző betűjelét és számértékét, a *b* helyen adhatjuk meg a megmunkálási és ellenőrzési utasítást, a *c* helyen adhatjuk meg az alaphossz értékét, a *d* helyen adható meg a felületi egyenetlenség irányát. Az érdességi mérőszám jelét is meg kell adni a mérőszámmal együtt. A megadott számérték maximális értéket jelent, tűrés nem megadható, minimális érték viszont feltüntethető szintén az *a* mezőben. Megmunkálási utasítás a *b* mezőben akkor írható elő, ha az érdesség másként nem biztosítható. A 10.22. ábra mutatja az érdességi alapjel, az anyagleválasztással megmunkált felület és az anyagleválasztással nem megmunkálható felület érdességi jelét. Az egész alkatrészre vonatkozó érdesség érték a rajzterület jobb felső sarkában adható meg.



10.22. ábra A) Érdességi jel; B) Érdességi rajzjel változatok, C) Felületi érdesség megadása CAD rendszerben (CATIA v5)

A *d* mezőn megadható barázda irány jelölése a következő:

- = a kijelölt felület kontúrvonalával párhuzamos,
- $\perp$ a kijelölt felület kontúrvonalára merőleges,
- X a kijelölt felület kontúrvonalára ferde, egymásra merőleges,
- M meghatározott irány nélküli,
- C a felület középpontjához képest megközelítőleg kör alakú,
- R a felület középpontjához képest megközelítőleg sugár irányú,
- P nem barázdált, pontszerű bemélyedésekből áll (pl. szikraforgácsolt).

A **felületi hullámosság** az alakhiba és az érdesség között elhelyezkedő egyenetlenség, azaz olyan ismétlődő egyenetlenség, amely az alakhibánál finomabb, de az érdességnél finomabb térközű, a névleges felületre merőleges térközű. A felület hullámosságát a műszaki rajzon a hullámosság alapjelével, a hullámosság magasság számértékével és szükség esetén egyéb adattal írjuk elő.

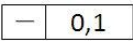
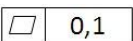
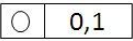
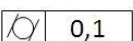
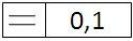
Galvanikus és egyéb kémiai bevonatokat az érdességi jel *b* mezőjén adhatunk meg szövegesen MSZ 693 szerint. Hengeres felületek mechanikus úton történő **recézése** mutató nyílon adható meg. A recézés típusa a recézés alakjelével és osztás értékével adható meg [4].

10.6. Irodalom

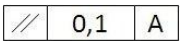
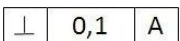
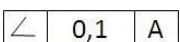
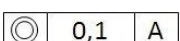
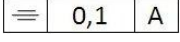
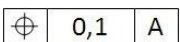
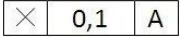
- [1] Oldal György: Gépipari műszaki rajz; Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1984.
- [2] Házkötő István: Műszaki 2D-s ábrázolás; Műegyetemi Kiadó, 2008.
- [3] H. Rögnitz: Célszerű szerkesztés a gépiparban Nehézipari Könyvkiadó Budapest, 1953.
- [4] Frischherz – W. Dax – K. Gundelfinger – W. Häffner – H. Itschner – G. Kotsch – M. Staniczek: Fémtechnológiai táblázatok; B+V Lap- és könyvkiadó Budapest 1997.

1. Melléklet – Alak- és helyzettűrések értelmezése és rajzjelei

Alaktűrések

egyenesség tűrés	 0,1	Síkban értelmezve: a valós profillal egy pontban érintkező ráfekvő egyenes és a valós profil közötti legnagyobb megengedett távolság. Térben értelmezve: annak a hengernek az átmérője, melyből a valós profil nem lép ki.
síklapúság tűrés	 0,1	A ráfekvő sík és a valós felület legnagyobb távolsága.
köralak tűrés	 0,1	A ráfekvő kör és a valós profil pontjai között megengedett legnagyobb távolság.
hengeresség tűrés	 0,1	A ráfekvő henger és a valós felület pontjai között megengedett legnagyobb távolság.
hossz-szelvény profiltűrés	 0,1	A ráfekvő profil és a valós profil közti legnagyobb távolság. Közelítőleg megegyezik a hengeresség tűrés tengelymetszetével.

Helyzettűrések

párhuzamosság tűrés	 0,1 A	A bázis geometriai elemmel (sík, tengely) párhuzamos két geometriai elem közti távolság, melyek közé esik a valós geometriai elem.
merőlegesség tűrés	 0,1 A	A bázis geometriai elemre (sík, tengely) merőleges két egymással párhuzamos geometriai elem közti távolság, melyek közé esik a valós geometriai elem.
hajlásszög tűrés	 0,1 A	A vonatkoztatási geometriai elemmel adott szöget bezáró két párhuzamos, a valós geometriai elemet közrefogó geometriai elem (egyenes vagy sík) közötti távolság.
egytengelyűség tűrés	 0,1 A	A vizsgált forgásfelület tengelye és a bázisfelület tengelye között megengedett legnagyobb távolság. Értelmezhető átmérőként és sugárként is.
szimmetria tűrés	 0,1 A	A vizsgált geometriai elem szimmetria tengelye és a bázisfelület szimmetria tengelye között megengedett legnagyobb távolság.
pozíció tűrés	 0,1 A	A geometriai elem valós helyzete és a névleges helyzete közti megengedett legnagyobb távolság.
tengelymetsződés tűrés	 0,1 A	A névlegesen metsződő tengelyek között megengedett legnagyobb távolság.

Összetett alaktűrések

radiális ütés tűrés		A forgásfelület valóságos profilpontjai és a bázistengely között a bázistengelyre merőleges síkban a legnagyobb és a legkisebb távolság.
homlokütés tűrés	 0,1 A	A homlokfelület valóságos profiljának pontjai és egy, a bázistengelyre merőleges sík között mért távolság.
adott irányú ütés tűrése		A vizsgált forgásfelület valóságos profiljai és a profilt kimetsző kúp csúcsa közötti távolság. A metszőkúp tengelye egybeesik a bázistengellyel és az alkotója adott irányú.
teljes radiális ütés tűrése		A valóságos hengerfelület összes pontja, valamint a bázistengely közötti legkisebb és legnagyobb távolság különbsége. A hengerfelülettől való eltérés és a bázistengelyhez viszonyított központeltérésének együtteséből ered.
teljes homlokütés tűrése	 0,1 A	A homlokfelület összes pontja és egy, a bázistengelyre merőleges sík között mért legnagyobb és legkisebb távolság különbsége. A felület síklapúság eltérésének és a bázistengelyhez viszonyított merőlegesség eltérésének együtteséből ered.
adott profil alaktűrése	 0,1 A	A névleges profil és a valóságos profil pontjai között megengedett legnagyobb távolság a névleges profilra merőleges irányban.
adott felület alaktűrése	 0,1 A	A névleges felület és a valóságos felület pontjai között megengedett legnagyobb távolság a névleges felületre merőleges irányban.
kombinált tűrések	 0,1 A  0,1 A  0,1 A	

2. Melléklet - A különböző gyártási technológiákra jellemző felületi érdességet és elérhető méretepontoság értékek.

[illegible]

3. Melléklet – Feliratmező tartalma és formája az EN ISO 7200 szabvány szerint

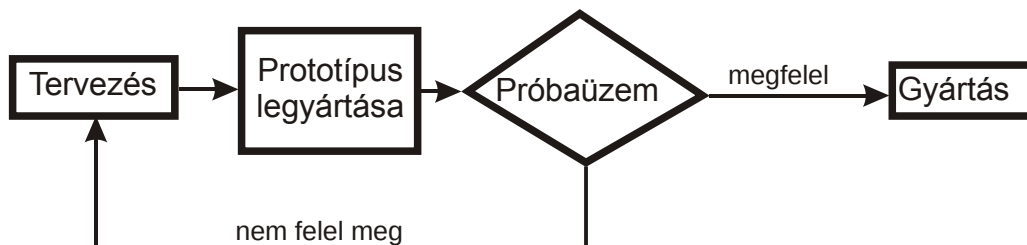
<i>Adat neve</i>	<i>Értelmezés</i>	<i>Ajánlott karakterhossz</i>	<i>Státusz</i>
Tulajdonos	A dokumentum tulajdonosának neve, cégnév és logó.	Nem specifikált	Kötelező
Rajzszám	A tulajdonos által meghatározott formátumú azonosító szám.	16	Kötelező
Cím	A rajz megnevezése, rövidítést nem tartalmazhat.	25	Kötelező
Kiegészítő cím		25	Opcionális
Tervező neve		20	Kötelező
Jóváhagyó neve		20	Kötelező
Méret	A rajz mérete (pl. A0, A1 stb.)	4	Opcionális
Méretarány		6	Kötelező
Anyag	Az alkatrész anyaga	20	Kötelező
Vetítési rend	A vetítési rend szimbóluma		Kötelező
Módosítás jele	Rajzváltozat, javított kiadás jele, pl. AA, B1.	2	Opcionális
Dátum	Az első kiadás dátuma.	10	Kötelező
Oldalszám		4	Kötelező
Összes oldal száma	Ha több oldalból áll a rajz, az összes oldal száma.	4	Opcionális
Nyelvi kód	A dokumentum nyelve ISO 639 alapján.	4	Opcionális
Felelős részleg	A dokumentum tartalmáért és karbantartásáért felelős vállalati részleg neve vagy kódja.	10	Opcionális
Technikai referens	A dokumentum technikai tartalmáért felelős személy.	20	Opcionális
Dokumentum típusa	A dokumentum típusa, amely meghatározza a tartalmának jellegét és formáját.	30	Kötelező
Besorolás / kulcsszavak	A dokumentum visszakeresését segítő információk	Nem specifikált	Opcionális
A dokumentum státusza	Például: „Tervezés alatt”, „Elfogadás alatt”, „Elfogadva”, „Visszavonva” stb.	20	Opcionális

**11. A CAD NUMERIKUS MÓDSZEREI.
A VÉGESELEM-MÓDSZER MECHANIKAI /
MATEMATIKAI ALAPJAI. A VÉGESELEMES PROG-
RAMOK JELLEMZŐ ELEMKÉSZLETE. TERHELÉS MO-
DELLEK, PEREMFELTÉTELEK. VE PROGRAMOKKAL
MEGOLDHATÓ FELADATOK. A SZERKEZET VISEL-
KEDÉSÉNEK MODELLEZÉSE**

**Szerző:
Oldal István**

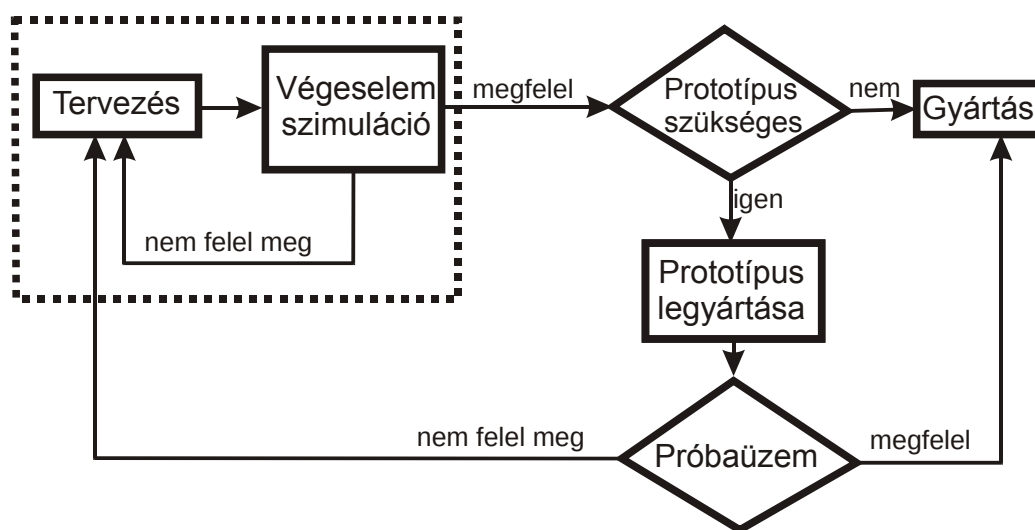
11.1. Végeselem-módszer a műszaki gyakorlatban

A végeselem-módszer elterjedése a gyakorlatban megváltoztatta a klasszikus tervezési folyamatot (11.1. ábra), beépült a termék előállításának folyamatába.



11.1. ábra. Klasszikus termék-előállítási modell egyszerűsített folyamatábrája

A gyártási költség, ezen belül a tervezési költség jelentős része a kísérleti darabok legyártása és próbaüzemének végrehajtása. Mivel ezekhez szükség van anyagra, annak megmunkálására, a próbaüzemhez szükséges peremfeltételek biztosítására, kísérleti eszközökre. Természetesen szükség van mind a prototípus-gyártás, mind a próbaüzem elvégzéséhez szakszemélyzetre. Ezen költségek csak nagy darabszám és/vagy magas termékár esetén térülnek meg. Ezt a költséget csökkenti jelentős mértékben a végeselemes szimuláció (11.2. ábra).



11.2. ábra. Végeselemes szimulációval segített termék-előállítási modell

A szükséges prototípusok számát csökkenti a végeselemes szimuláció, amennyiben jól modellezhető problémáról van szó, akkor akár el is hagyható a prototípus legyártása. Ekkor már a sorozatgyártásra lehet azonnal berendezkedni, és elegendő a nullszérián próbaüzemet végezni.

A szimuláció nemcsak a szilárdsági vizsgálatok területén nyújt segítséget, hanem a technológiai tervezéskor is. Léteznek olyan célszoftverek is, amelyekkel egy fröccsöntési, kovácsozási, mélyhúzási, stb. folyamatot tudunk szimulálni, így ezek a magas szerszámköltségű gyártási módszerek is olcsóbbá válnak.

Elmondhatjuk, hogy a tervezéskor alkalmazott végeselem-modellezés több területre is kiterjed:

- termék szilárdsági, hőtani, áramlástan, elektromos, mágneses vizsgálata, használati

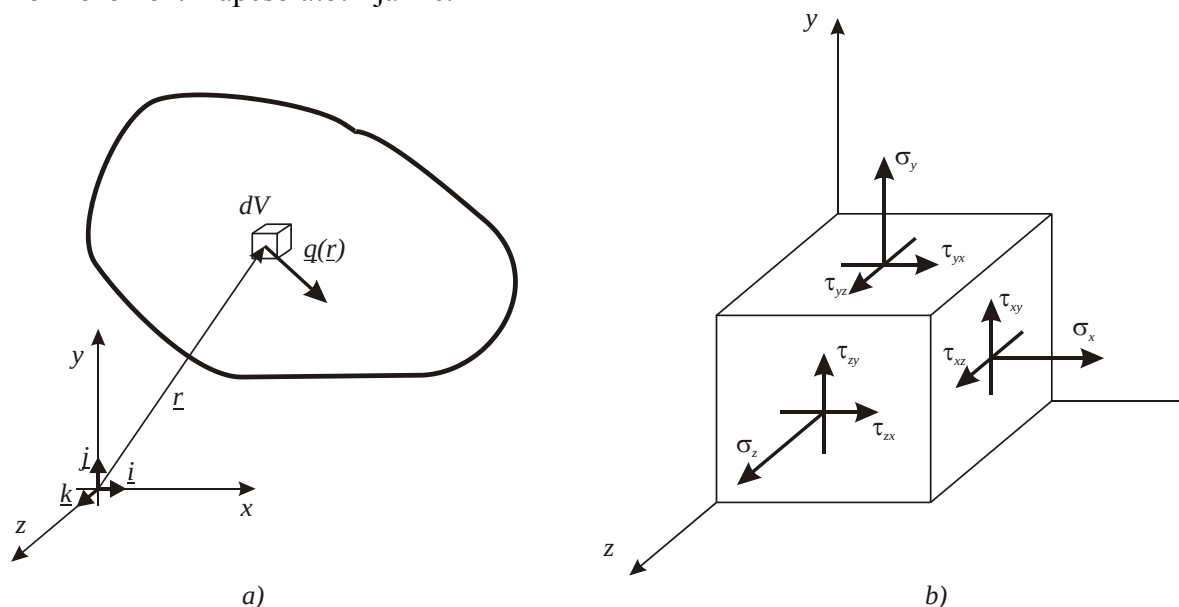
- körülmények közt, amely a termék minőségét javítja, költségét (pl. súly) csökkenti,
- termék gyártás közbeni szimulációja (gyártástechnológia szimulációja), az optimális költségű, de megfelelő termék gyártástervezéséhez,
 - szerszámok szimulációja, amely azok élettartamát, optimális üzemi feltételeit adja,

A végelem-módszer természetesen nemcsak a gépgyártásban terjedt el, hanem egyéb tudományterületeken is. A gépgyártás analógiájára elmondhatjuk, hogy a szükséges prototípusok, kísérleti modellek száma csökkenthető, így a tervezés összességében olcsóbb, gyorsabb, pontosabb.

11.2. Rugalmasságtan differenciálegyenlet-rendszere és peremérték problémája

11.2.1. Egyensúlyi egyenletek

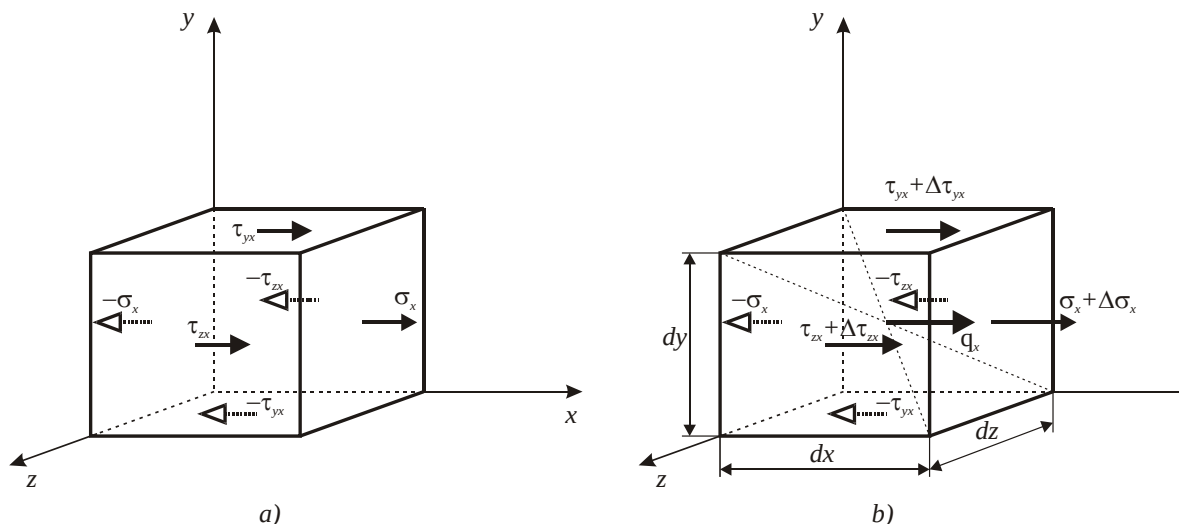
Az egyensúlyi egyenletek a testre ható $\underline{q}(\underline{r})$ térfogati terhelésmező és a $\underline{\sigma}(\underline{r})$ feszültségi tenzormező közti kapcsolatot írják le.



11.3. ábra. Elemi test általános feszültségi állapota

Ha egy test belsejében kiválasztott elemi test nyugalomban van, akkor külső (11.3.a ábra) és belső (11.3.b ábra) terhelései egyensúlyban vannak. Az x irányú terheléseket az általuk létrehozott feszültségekkel jellemezve (11.4.a ábra) láthatjuk, hogy ha nincs külső terhelés, akkor a belső erők (feszültségek) a test megfelelő oldalain egyforma nagyságúak és ellentétes értelműek. A változást a testre ható külső térfogati terhelés okozza. A feszültség felületen megoszló belső erő, ezért át kell számítani az elemi térfogatra. Az elemi hasáb lapjain a feszültség és a felület szorzatából adódó tengelyirányú erők összegét elosztva a kis kocka térfogatával ($dx \cdot dy \cdot dz$), megkapjuk az x irányba mutató térfogati erők egyensúlyi egyenletét.

$$\frac{\sigma_x + \Delta\sigma_x}{dx} - \frac{\sigma_x}{dx} + \frac{\tau_{zx} + \Delta\tau_{zx}}{dz} - \frac{\tau_{zx}}{dz} + \frac{\tau_{yx} + \Delta\tau_{yx}}{dy} - \frac{\tau_{yx}}{dy} + q_x = 0. \quad (11.1)$$



11.4. ábra. Elemi test x irányú terhelései

A feszültségek változásai az adott irányú parciális deriválttal írhatóak le: $\Delta\sigma_x = \frac{\partial\sigma_x}{\partial x} dx$,

$\Delta\tau_{zx} = \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} dz$, $\Delta\tau_{yx} = \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} dy$, amelyeket (11.1)-be helyettesítve kapjuk:

$$\frac{\partial\sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zx}}{\partial z} + q_x = 0. \quad (11.2)$$

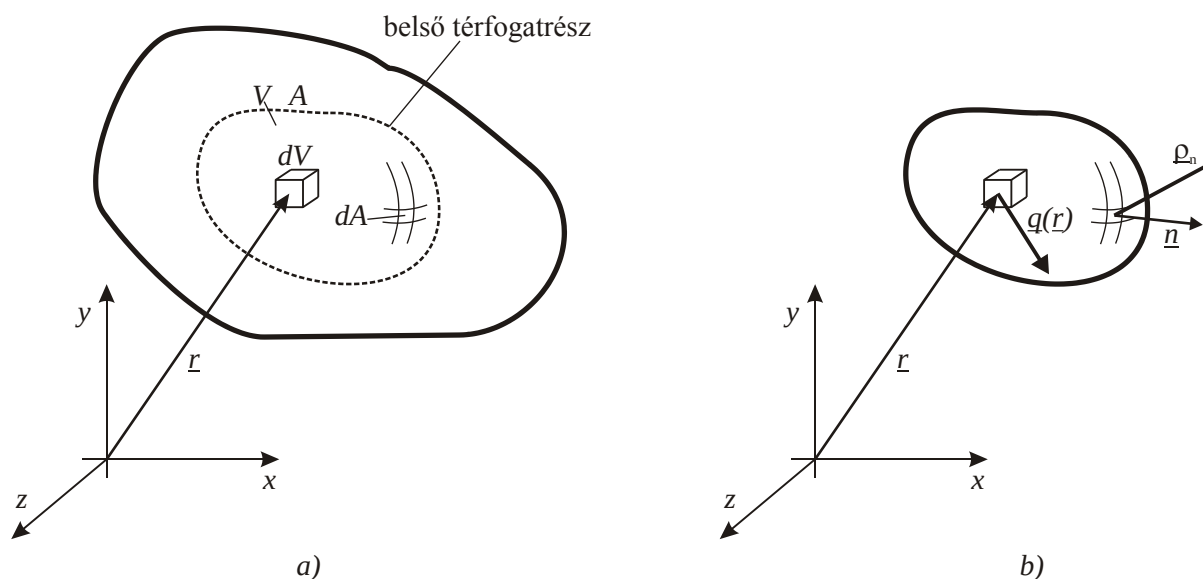
Ennek analógiájára a másik két irányban:

$$\frac{\partial\tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial\sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial\tau_{zy}}{\partial z} + q_y = 0, \quad (11.3)$$

$$\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial\sigma_z}{\partial z} + q_z = 0. \quad (11.4)$$

A (11.2)-(11.4) egyenletek a descartes-i derékszögű koordináta-rendszerben felírt **egyensúlyi egyenletek**.

Az egyensúlyi egyenletek általános megfogalmazásához vegyünk egy testen belüli V térfogatrészt a 11.5. ábrának megfelelően.



11.5. ábra. Testen belüli V térfogatrész felületi és térfogati terhelései

A dV térfogatú elemi testre ható térfogati terhelésből származó elemi erő:

$$d\underline{F} = \underline{q}dV.$$

A dA elemi felületen a $\underline{\rho}_n$ feszültségvektorból számított elemi erő:

$$d\underline{F} = \underline{\rho}_n dA = \underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{n}dA.$$

A V belső test egyensúlyban van, tehát a rá ható felületi és térfogati terhelésekből származó erők összege zérus:

$$\underline{F} = 0 = \int_V \underline{q}dV + \int_A \underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{n}dA. \quad (11.5)$$

A Gauss-Osztrogradszkij-féle integrálátalakítási tétel szerint:

$$\int_A \underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{n}dA = \int_V \underline{\underline{\sigma}} \cdot \nabla dV.$$

Ezt helyettesítve (2.28)-ba:

$$0 = \int_V \underline{q}dV + \int_V \underline{\underline{\sigma}} \cdot \nabla dV,$$

a tagonkénti integrált összeg integráljává alakítva:

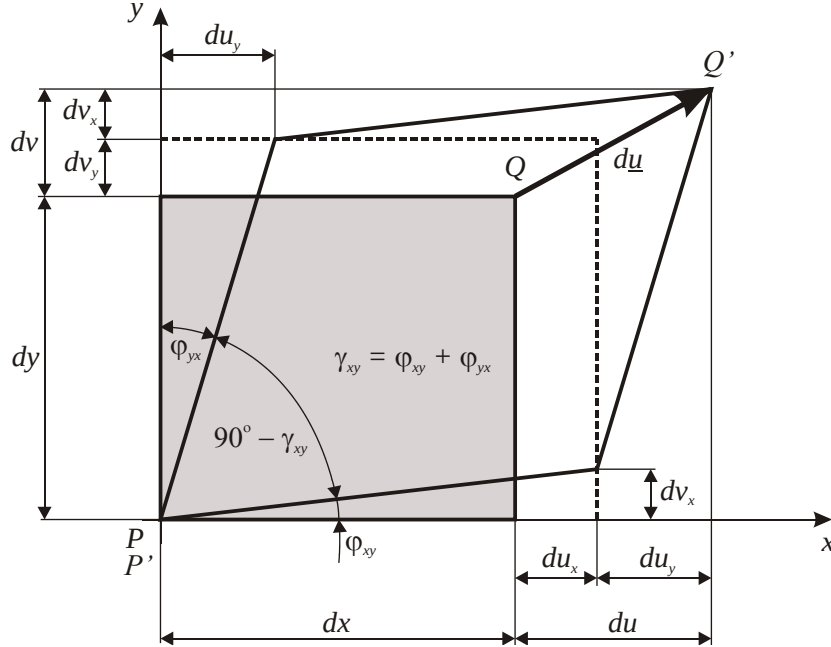
$$0 = \int_V (\underline{q} + \underline{\underline{\sigma}} \cdot \nabla) dV \quad (11.6)$$

Mivel a V térfogat tetszőleges lehet, ezért (11.6) csak az integrandusz zérus értéke mellett igaz, amely összefüggés a rugalmasságtan **egyensúlyi egyenlete**.

$$\underline{\underline{\sigma}} \cdot \nabla + \underline{q} = 0. \quad (11.7)$$

11.2.2. Geometriai egyenletek

A geometriai (kinematikai) egyenletek az $\underline{u}(\underline{r})$ elmozdulási vektormező és az $\underline{\varepsilon}(\underline{r})$ alakváltozási tenzormező kapcsolatát írják le. Descartes-i derékszögű koordináta-rendszerben, $x - y$ síkban egy elemi kocka deformációját látjuk a 11.6. ábrán.



11.6. ábra. Alakváltozások geometriai interpretációja

Tekintsünk el a merevtest-szerű mozgástól, és csak a P és Q pontok egymáshoz képesti elmozdulását vizsgáljuk. Egymásra vetítve a P és a P' pontokat, a $\overline{PQ}$ szakasz hosszának változása a $\overline{QQ'}$ vektor, amelyet $d\underline{u} = du \cdot \underline{i} + dv \cdot \underline{j} + dw \cdot \underline{k}$ elemi elmozdulásvektorral jelölünk. Síkban ennek két koordinátája du és dv . Mindkét koordináta két részre bontható $du = du_x + du_y$, $dv = dv_y + dv_x$.

du_x : a dx él nyúlásából (x függvénye),

du_y : a dy él torzulásából (y függvénye), ezért

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial x} = \frac{du_x}{dx} + 0 \quad \text{és} \quad \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0 + \frac{du_y}{dy}.$$

dv_y : a dy él nyúlásából (y függvénye),

dv_x : a dx él torzulásából (x függvénye), ezért

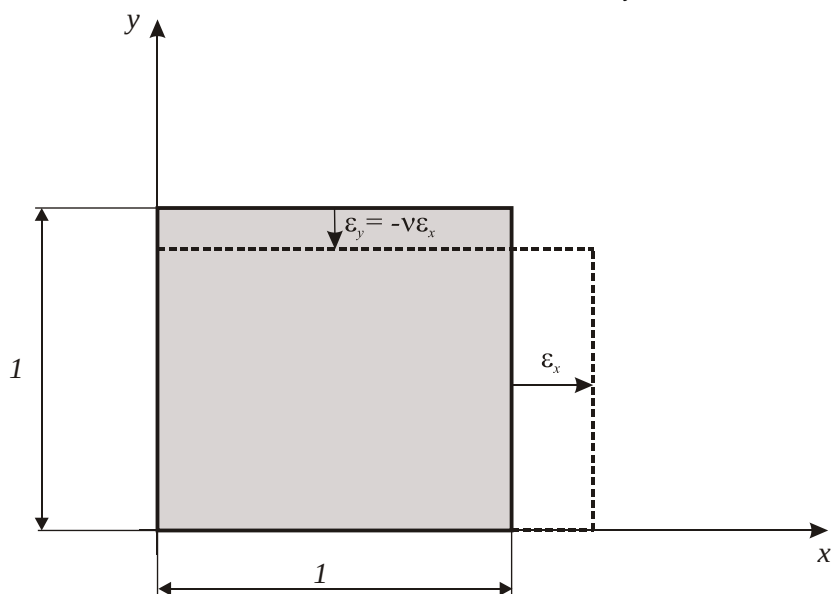
$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial x} = \frac{dv_x}{dx} + 0 \quad \text{és} \quad \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 + \frac{dv_y}{dy}.$$

A 11.6. ábra alapján a fajlagos nyúlások $\varepsilon_x = \frac{du_x}{dx}$, $\varepsilon_y = \frac{dv_y}{dy}$, és a szögtorzulás:

$$\gamma_{xy} = \varphi_{xy} + \varphi_{yx} = \arctan \frac{dv_x}{dx} + \arctan \frac{du_y}{dy} \approx \frac{dv_x}{dx} + \frac{du_y}{dy}.$$

11.2.3. Anyagegyenletek

Az anyagegyenletek a feszültségi és alakváltozási állapot közti kapcsolatot írják le. A 11.9. ábrán látható lineárisan rugalmas anyagra a Hooke-törvény érvényes. Egytengelyű feszültség-állapot esetén az egyszerű Hooke-törvény $\sigma = E\varepsilon$, ahol E (Young-modulus, rugalmassági modulus) az arányossági tényező a fajlagos nyúlás és a feszültség között. Tiszta húzás esetében, ahol csak egy irányban van feszültség, a nyúlás nemcsak egy irányban történik 11.9. ábra. A húzás irányában az anyag megnyúlik, rá merőlegesen hossza csökken. A köztük lévő arányosságot a dimenzió nélküli Poisson-tényezővel írjuk le: $\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\nu\varepsilon_x$.



11.9. ábra. Nyúlások, Poisson-tényező

Többtengelyű feszültségállapot esetében a különböző feszültségek és nyúlások közti összefüggést egy tenzoregyenlettel, az általános Hooke-törvénnyel írjuk le. Két alakja izotróp, lineárisan rugalmas anyagokra:

$$\underline{\underline{\sigma}} = 2G \left(\underline{\underline{\varepsilon}} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_1 \underline{\underline{E}} \right), \quad (11.14)$$

$$\underline{\underline{\varepsilon}} = \frac{1}{2G} \left(\underline{\underline{\sigma}} - \frac{\nu}{1+\nu} \sigma_1 \underline{\underline{E}} \right). \quad (11.15)$$

Ahol,

G : csúsztató rugalmassági modulus, amelyre igaz: $E = 2G(1+\nu)$,

$\underline{\underline{E}}$: egységmátrix,

ε_1, σ_1 : a megfelelő tenzorok első skalár invariánsa, (a főátló összege).

A (11.14) **anyagegyenletnek** megfelelő skalár egyenletek:

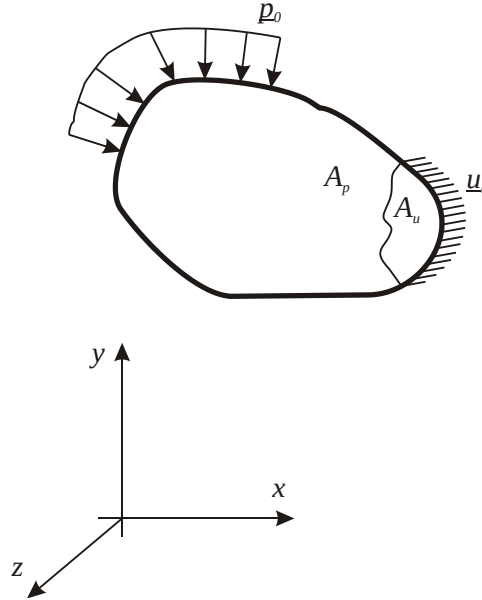
$$\sigma_x = 2G \left(\varepsilon_x + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \right),$$

$$\sigma_y = 2G \left(\varepsilon_y + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \right),$$

$$\sigma_z = 2G \left(\varepsilon_z + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \right),$$

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy}, \quad \tau_{yz} = G\gamma_{yz}, \quad \tau_{xz} = G\gamma_{xz}.$$

11.2.4. Peremfeltételek



11.10. ábra. Peremfeltételek

Rugalmasságtani probléma esetében kétféle peremfeltételt kell definiálnunk:

Kinematikai peremfeltételek: az előírt $\underline{u}_0$ elmozdulások (kényszerek) az A_u felületen. A megoldásra fennáll: $\underline{u} = \underline{u}_0$.

Dinamikai peremfeltételek: az előírt $\underline{p}_0$ terhelések az A_p felületen (a terheletlen felületek is ide tartoznak, mert azoknak ismert zérus terhelése van). A megoldásra fennáll: $\underline{p} = \underline{p}_0$, azaz $\underline{\sigma} \cdot \underline{n} = \underline{p}_0$.

Egyéb peremfeltételek is előfordulnak, de a leggyakrabban a fent említett két típus fordul elő.

11.2.5. Peremérték probléma

A rugalmasságtan peremérték problémája a rugalmasságtan differenciálegyenleteiből és a peremfeltételekből áll:

- $\underline{\sigma} \cdot \nabla + \underline{q} = 0$, egyensúlyi egyenletek,
- $\underline{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\underline{u} \circ \nabla + \nabla \circ \underline{u})$, geometriai egyenletek,
- $\underline{\sigma} = 2G \left(\underline{\varepsilon} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_1 \underline{E} \right)$, anyagegyenletek,
- $\underline{u}|_{A_u} = \underline{u}_0$, kinematikai peremfeltételek,
- $\underline{\sigma} \cdot \underline{n}|_{A_p} = \underline{p}_0$, dinamikai peremfeltételek.

Az így definiált peremérték problémának bizonyíthatóan létezik megoldása (egzisztencia) és csak egy megoldása létezik (unicitás).

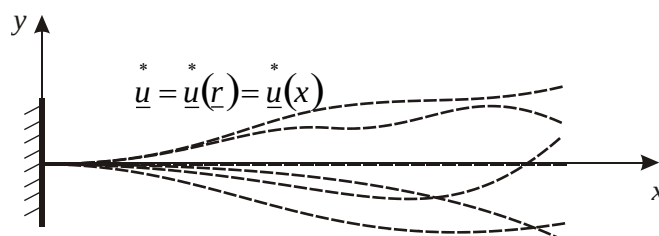
11.3. Közelítő mezők

A rugalmasságtani probléma közelítő megoldását az elmozdulások vagy az erők (feszültségek) közelítésével oldhatjuk meg. A rugalmasságtani egyenletek segítségével mindkét irányból elindulva a test elmozdulás-, alakváltozási és feszültségmezője előállítható.

11.3.1. Kinematikailag lehetséges elmozdulásmező

Kinematikailag lehetséges az elmozdulásmező $\underline{u} = \underline{u}^*(\underline{r})$, ha:

- kielégíti a kinematikai peremfeltételeket (11.10. ábra), $\underline{u}^* \Big|_{A_u} = \underline{u}_0$,
- folytonos és deriválható (teljesülnek rá a geometriai egyenletek).



$$\text{kinematikai peremfeltételek: } \underline{u}^*(0) = 0, \frac{d\underline{u}^*(0)}{dx} = 0$$

11.11. ábra. Befogott tartó kinematikailag lehetséges elmozdulásmezői

$\underline{u}^*$ -ból előállítható a kinematikailag lehetséges alakváltozási mező $\underline{\varepsilon}^* = \frac{1}{2}(\underline{u}^* \circ \nabla + \nabla \circ \underline{u}^*)$. Az alakváltozási mezőből az anyagegyenlet (általános Hooke-törvény) segítségével előállítható a kinematikailag lehetséges feszültségmező $\underline{\sigma}^* = 2G\left(\underline{\varepsilon}^* + \frac{\nu}{1-2\nu}\varepsilon_1^* \underline{E}\right)$. Egy rugalmasságtani problémának egyetlen $\underline{\sigma}(\underline{r})$ megoldása van, $\underline{\sigma}^*(\underline{r})$ pedig végtelen számú lehet, így általában nem elégíti ki az egyensúlyi egyenleteket és a dinamikai peremfeltételeket.

11.3.2. Statikailag lehetséges feszültségmező

Statikailag lehetséges a feszültségmező $\underline{\sigma} = \underline{\sigma}(\underline{r})$, ha:

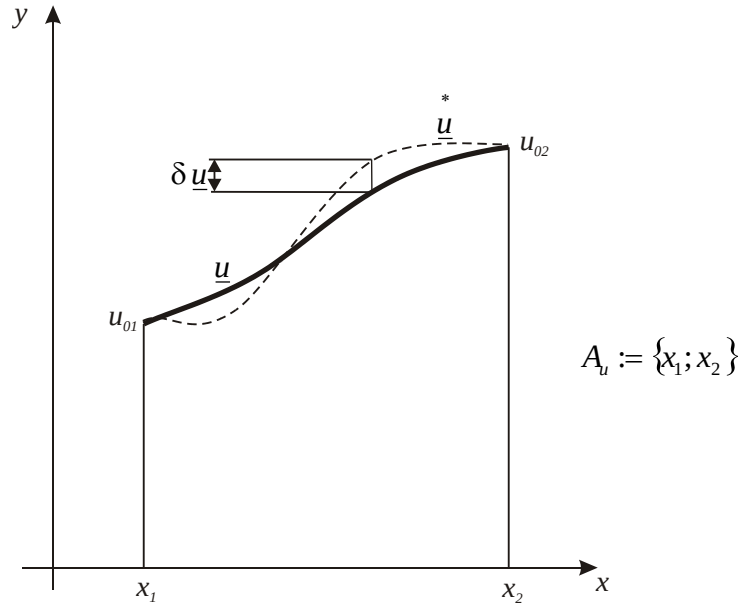
- kielégíti a dinamikai peremfeltételeket (2.15. ábra), $\underline{\sigma} \cdot \underline{n} \Big|_{A_p} = \underline{p}_0$,
- teljesülnek rá az egyensúlyi egyenletek, $\underline{\sigma} \cdot \nabla + \underline{q} = \underline{0}$.

Előállítható belőle a statikailag lehetséges alakváltozási mező az anyagegyenlet segítségével $\underline{\varepsilon} = \frac{1}{2G}\left(\underline{\sigma} - \frac{\nu}{1+\nu}\sigma_1 \underline{E}\right)$. Ez, és az ebből előállított elmozdulásmező általában nem elégíti ki a geometriai egyenleteket és a kinematikai peremfeltételeket.

11.4. Virtuális munka elve

Virtuális elmozdulás: kényszerek által megengedett kismértékű, tetszőleges elmozdulás. Előállítható egy kinematikailag lehetséges és a valódi elmozdulásmező különbségeként

$$\delta \underline{u} = \underline{u}^* - \underline{u}.$$



11.12. ábra. Kinematikailag lehetséges és virtuális elmozdulásmező

Virtuális munka elve: ideálisan rugalmas rendszer (test) egyensúlyi (rugalmasságtani probléma esetében a terhelések és kényszerek által meghatározott) helyzetéből való virtuális ki-mozdításakor a külső erők virtuális munkája megegyezik az energia virtuális változásával:

$$\delta W_k = \delta U. \quad (11.16)$$

A térfogati és felületi erők virtuális munkája:

$$\delta W_k = \int_V \delta \underline{u} \cdot \underline{q} \, dV + \int_{A_p} \delta \underline{u} \cdot \underline{p} \, dA \quad (11.17)$$

A virtuális belső energia:

$$\delta U = \frac{1}{2} \int_V \underline{\underline{\sigma}} \cdot \delta \underline{\underline{\varepsilon}} \, dV + \frac{1}{2} \int_V \delta \underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{\underline{\varepsilon}} \, dV = \int_V \underline{\underline{\sigma}} \cdot \delta \underline{\underline{\varepsilon}} \, dV \quad (11.18)$$

(3.3)-ban felhasználtuk a feszültség és alakváltozás közt fennálló anyagegyenletből levezethető $\underline{\underline{\sigma}} \cdot \delta \underline{\underline{\varepsilon}} = \delta \underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{\underline{\varepsilon}}$ összefüggést.

A (11.16) virtuális munka elve, helyettesítve a (11.17) és (11.18) összefüggéseket:

$$\int_V \underline{\underline{\sigma}} \cdot \delta \underline{\underline{\varepsilon}} \, dV = \int_V \delta \underline{u} \cdot \underline{q} \, dV + \int_{A_p} \delta \underline{u} \cdot \underline{p} \, dA. \quad (11.19)$$

11.5. Potenciális energia minimum elve

Egy test teljes potenciális energiája az alakváltozási energiának és a külső erők munkájának különbsége:

$$\Pi = U - W_k, \quad (11.20)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} \int_V \underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{\underline{\varepsilon}} dV - \int_V \underline{u} \cdot \underline{q} dV - \int_{A_p} \underline{u} \cdot \underline{p} dA. \quad (11.21)$$

Ahol az alakváltozási energia:

$$U = \frac{1}{2} \int_V \underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{\underline{\varepsilon}} dV,$$

a külső erők munkája:

$$W_k = \int_V \underline{u} \cdot \underline{q} dV + \int_{A_p} \underline{u} \cdot \underline{p} dA.$$

Állítsuk elő egy kinematikailag lehetséges elmozdulásmező esetén a potenciális energiát:

$$\Pi^* = U^* - W_k^* \quad (11.22)$$

Rugalmas test esetében a külső erők (felületi és a térfogati terhelések) munkája kinematikailag lehetséges elmozdulásmező esetében:

$$\begin{aligned} W_k^* &= \int_V \underline{u}^* \cdot \underline{q} dV + \int_{A_p} \underline{u}^* \cdot \underline{p} dA = \int_V (\underline{u} + \delta \underline{u}) \cdot \underline{q} dV + \int_{A_p} (\underline{u} + \delta \underline{u}) \cdot \underline{p} dA = \\ &= \int_V \underline{u} \cdot \underline{q} dV + \int_V \delta \underline{u} \cdot \underline{q} dV + \int_{A_p} \underline{u} \cdot \underline{p} dA + \int_{A_p} \delta \underline{u} \cdot \underline{p} dA = \\ &= \left(\int_V \underline{u} \cdot \underline{q} dV + \int_{A_p} \underline{u} \cdot \underline{p} dA \right) + \left(\int_V \delta \underline{u} \cdot \underline{q} dV + \int_{A_p} \delta \underline{u} \cdot \underline{p} dA \right) = W_k + \delta W_k \end{aligned} \quad (11.23)$$

Kinematikailag lehetséges alakváltozási mező:

$$\begin{aligned} \underline{\underline{\varepsilon}}^* &= \frac{1}{2} \left(\underline{u}^* \circ \nabla + \nabla \circ \underline{u}^* \right) = \frac{1}{2} [(\underline{u} + \delta \underline{u}) \circ \nabla + \nabla \circ (\underline{u} + \delta \underline{u})] = \\ &= \frac{1}{2} (\underline{u} \circ \nabla + \nabla \circ \underline{u}) + \frac{1}{2} (\delta \underline{u} \circ \nabla + \nabla \circ \delta \underline{u}) = \underline{\underline{\varepsilon}} + \delta \underline{\underline{\varepsilon}} \end{aligned} \quad (11.24)$$

A rugalmas testben felhalmozódó belső energia a kinematikailag lehetséges elmozdulásmező esetében, alkalmazva $\underline{\underline{\sigma}} \cdot \delta \underline{\underline{\varepsilon}} = \delta \underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{\underline{\varepsilon}}$ összefüggést:

$$\begin{aligned} U^* &= \frac{1}{2} \int_V \underline{\underline{\sigma}}^* \cdot \underline{\underline{\varepsilon}}^* dV = \frac{1}{2} \int_V (\underline{\underline{\sigma}} + \delta \underline{\underline{\sigma}}) \cdot (\underline{\underline{\varepsilon}} + \delta \underline{\underline{\varepsilon}}) dV = \\ &= \frac{1}{2} \int_V \underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{\underline{\varepsilon}} dV + \frac{1}{2} \int_V \underline{\underline{\sigma}} \cdot \delta \underline{\underline{\varepsilon}} dV + \frac{1}{2} \int_V \delta \underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{\underline{\varepsilon}} dV + \frac{1}{2} \int_V \delta \underline{\underline{\sigma}} \cdot \delta \underline{\underline{\varepsilon}} dV = \end{aligned}$$

$$= \frac{1}{2} \int_V \underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{\underline{\varepsilon}} dV + \int_V \underline{\underline{\sigma}} \cdot \underline{\underline{\delta \varepsilon}} dV + \frac{1}{2} \int_V \underline{\underline{\delta \sigma}} \cdot \underline{\underline{\delta \varepsilon}} dV = U + \delta U + \delta^2 U \quad (11.25)$$

Egy kinematikailag lehetséges elmozdulásmező esetén a potenciális energia, (11.22), (11.23), (11.25)-ből:

$$\begin{aligned} \Pi^* &= U^* - W_k^* = U + \delta U + \delta^2 U - W_k - \delta W_k = \\ &= (U - W_k) + (\delta U - \delta W_k) + \delta^2 U = \Pi + \delta \Pi + \delta^2 \Pi, \text{ ahol} \end{aligned} \quad (11.26)$$

a valóságos elmozduláshoz (megoldáshoz) tartozó potenciális energia:

$$\Pi = U - W_k$$

a potenciális energia első variációja,

$$\delta \Pi = \delta U - \delta W_k, \quad (11.27)$$

a potenciális energia második variációja:

$$\delta^2 \Pi = \delta^2 U.$$

A potenciális energia első variációja a virtuális munka elve $\delta W_k = \delta U$ szerint zérus:

$$\delta \Pi = 0,$$

a második variáció energia jellegű mennyiség, ezért bármely δu esetén igaz:

$$\delta^2 \Pi \geq 0.$$

Ekkor egy kinematikailag lehetséges és a valós elmozdulásmező különbsége:

$$\Pi^* - \Pi \geq 0 \quad (= \delta^2 \Pi). \quad (11.28)$$

A (11.28) összefüggés a **teljes potenciális energia minimum elve**: az összes kinematikailag lehetséges elmozdulásmező közül a potenciális energia a valóságos elmozdulásmező esetén minimális.

11.6. Lagrange-féle variációs elv

A potenciális energia minimum elv variációs megfogalmazása a Lagrange-féle variációs elv. A teljes potenciális energia variációs megközelítésben egy elmozdulásmezőtől függő funkcionál:

$$\Pi[\underline{u}] = U[\underline{u}] - W_k[\underline{u}],$$

ahol a kinematikai peremfeltétel variációs alakban:

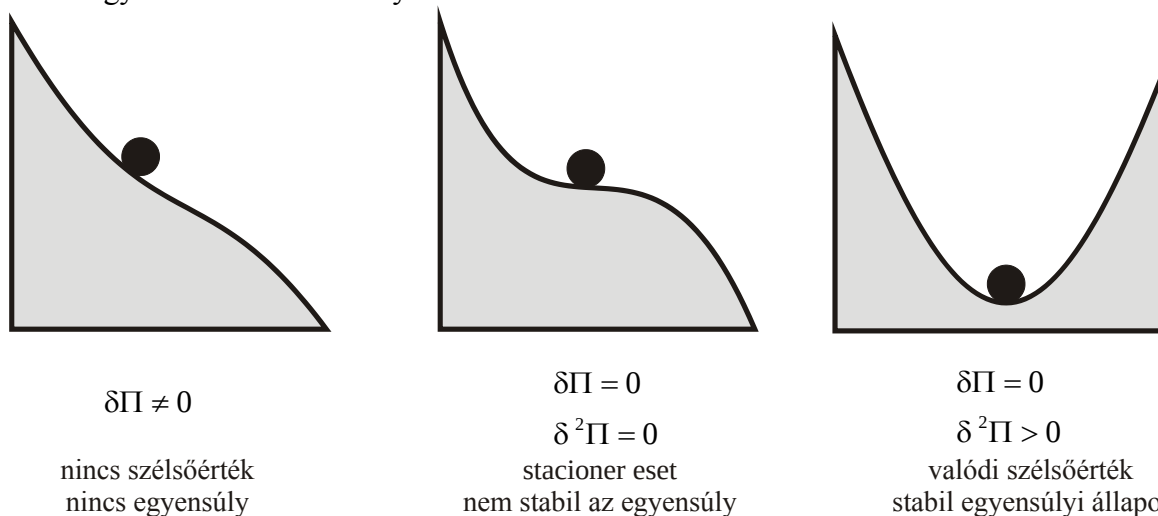
$$\delta \underline{u}|_{A_u} = 0.$$

A szélsőérték szükséges feltétele: $\delta \Pi = 0$,

$$\delta \Pi = \delta U - \delta W_k = 0. \quad (11.29)$$

Rugalmas test esetén ez megegyezik virtuális munka elvével (11.16).

Az első variáció zérus értéke esetén a funkcionál lehet stacionárius, minimum vagy maximum. Esetünkben a második variáció pozitív vagy zérus értéket vehet fel $\delta^2\Pi \geq 0$, így stacionárius vagy stabil minimum helyről van szó.



11.13. ábra. Potenciális energia kinetikai szemléltetése

A potenciális energia variációi kinetikai probléma esetében szemléltetik az állapot stabilitását a 11.13. ábrán.

11.7. Mozgásmódszeren alapuló végeelem-módszer

A mozgásmódszeren alapuló végeelem-módszer jelenleg a legelterjedtebb, a végeelem-programok döntő többsége ezen az elven alapszik. A módszer lényege, hogy elemekre bontjuk a testet. Elemenként kinematikailag lehetséges elmozdulásmezőt feltételezünk általunk felvett függvényekkel. Majd a geometriai és anyagegyenletek, valamint a peremfeltételek felhasználásával lineáris algebrai egyenletrendszert írunk fel. Ennek megoldása egy közelítő elmozdulásmező. Az ebből számított feszültségmezőre az egyensúlyi egyenletek közelítőleg fognak teljesülni. A módszerben a tenzorok helyett az egyszerűbb formalizmus érdekében vektorokat (oszlopmátrixokat) alkalmazunk.

11.7.1. Vektormező bevezetése

Feszültségkomponensek vektora (oszlopmátrixa): a feszültségtenzor elemeit tartalmazó vektor,

$$\text{térben: } \underline{\sigma} = \underline{\sigma}(\underline{r}) = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_x(x, y, z) \\ \sigma_y(x, y, z) \\ \sigma_z(x, y, z) \\ \tau_{xy}(x, y, z) \\ \tau_{yz}(x, y, z) \\ \tau_{xz}(x, y, z) \end{bmatrix}, \text{ síkban: } \underline{\sigma} = \underline{\sigma}(\underline{r}) = \begin{bmatrix} \sigma_x(x, y) \\ \sigma_y(x, y) \\ \tau_{xy}(x, y) \end{bmatrix}.$$

Alakváltozási jellemzők vektora (oszlopmátrixa): az alakváltozási tenzor elemeit tartalmazó

$$\text{vektor, térben: } \underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon}(\underline{r}) = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x(x, y, z) \\ \varepsilon_y(x, y, z) \\ \varepsilon_z(x, y, z) \\ \gamma_{xy}(x, y, z) \\ \gamma_{yz}(x, y, z) \\ \gamma_{xz}(x, y, z) \end{bmatrix}, \text{ síkban: } \underline{\varepsilon} = \underline{\varepsilon}(\underline{r}) = \begin{bmatrix} \varepsilon_x(x, y) \\ \varepsilon_y(x, y) \\ \gamma_{xy}(x, y) \end{bmatrix}.$$

A mozgásmódszer esetében szükségünk van a geometriai és anyagegyenletekre. Ezeket át kell írni vektoros formára. Helyettesítsük be a geometriai egyenlet $\underline{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\underline{u} \circ \nabla + \nabla \circ \underline{u})$ derékszögű descartes-i koordinátarendszerben felírt skalár egyenleteit

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z},$$

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \gamma_{yz} = \gamma_{zy} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \gamma_{xz} = \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}$$

az alakváltozási vektorba, majd alakítsuk szorzattá:

$$\underline{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \underline{\underline{\partial}} \underline{u}.$$

Így az alakváltozási vektort előállítottuk az $\underline{u}$ elmozdulásvektor és egy (differenciálási utasításokat tartalmazó) $\underline{\underline{\partial}}$ differenciáloperátor mátrix szorzataként.

Az anyagegyenletet $\underline{\underline{\sigma}} = 2G \left(\underline{\underline{\varepsilon}} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_1 \underline{\underline{E}} \right)$ felhasználva helyettesítsük be a feszültségvektorba a megfelelő elemeket:

$$\sigma_x = 2G \left(\varepsilon_x + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \right) = 2G \left(1 + \frac{\nu}{1-2\nu} \right) \varepsilon_x + \frac{2G\nu}{1-2\nu} \varepsilon_y + \frac{2G\nu}{1-2\nu} \varepsilon_z,$$

$$\sigma_y = 2G \left(\varepsilon_y + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \right) = \frac{2G\nu}{1-2\nu} \varepsilon_x + 2G \left(1 + \frac{\nu}{1-2\nu} \right) \varepsilon_y + \frac{2G\nu}{1-2\nu} \varepsilon_z,$$

$$\sigma_z = 2G \left(\varepsilon_z + \frac{\nu}{1-2\nu} (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \right) = \frac{2G\nu}{1-2\nu} \varepsilon_x + \frac{2G\nu}{1-2\nu} \varepsilon_y + 2G \left(1 + \frac{\nu}{1-2\nu} \right) \varepsilon_z,$$

$$\tau_{xy} = G\gamma_{xy}, \tau_{yz} = G\gamma_{yz}, \tau_{xz} = G\gamma_{xz},$$

majd alakítsuk szorzattá:

$$\underline{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2G\left(1 + \frac{\nu}{1-2\nu}\right)\varepsilon_x + \frac{2G\nu}{1-2\nu}\varepsilon_y + \frac{2G\nu}{1-2\nu}\varepsilon_z \\ \frac{2G\nu}{1-2\nu}\varepsilon_x + 2G\left(1 + \frac{\nu}{1-2\nu}\right)\varepsilon_y + \frac{2G\nu}{1-2\nu}\varepsilon_z \\ \frac{2G\nu}{1-2\nu}\varepsilon_x + \frac{2G\nu}{1-2\nu}\varepsilon_y + 2G\left(1 + \frac{\nu}{1-2\nu}\right)\varepsilon_z \\ G\gamma_{xy} \\ G\gamma_{yz} \\ G\gamma_{xz} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 2G\left(1 + \frac{\nu}{1-2\nu}\right) & \frac{2G\nu}{1-2\nu} & \frac{2G\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2G\nu}{1-2\nu} & 2G\left(1 + \frac{\nu}{1-2\nu}\right) & \frac{2G\nu}{1-2\nu} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2G\nu}{1-2\nu} & \frac{2G\nu}{1-2\nu} & 2G\left(1 + \frac{\nu}{1-2\nu}\right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} = \underline{\underline{C}} \underline{\varepsilon}.$$

Így előállítottuk a feszültségvektort az $\underline{\varepsilon}$ alakváltozási vektor és egy $\underline{\underline{C}}$ anyagállandók mátrixa szorzataként.

Bevezetve a vektormezőket, egyszerű szorzatként előállítottuk a geometriai egyenletet:

$$\underline{\varepsilon} = \underline{\underline{\partial}} \underline{u} \quad (11.30)$$

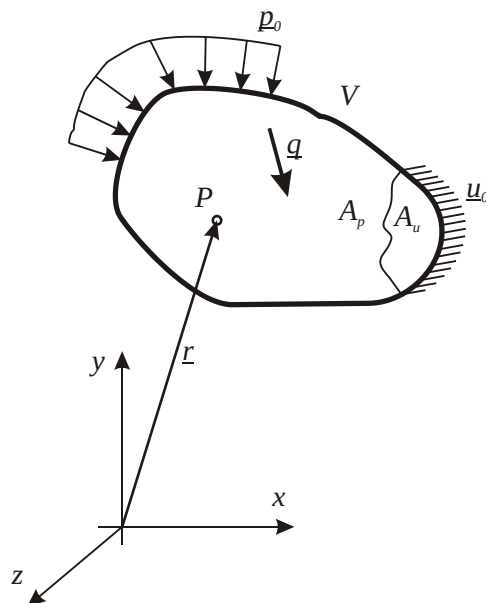
és az anyagegyenletet:

$$\underline{\sigma} = \underline{\underline{C}} \underline{\varepsilon}. \quad (11.31)$$

Az anyagegyenletbe helyettesítve: $\underline{\sigma} = \underline{\underline{C}} \underline{\underline{\partial}} \underline{u}$, így az elmozdulásmező az ismeretlen, az alakváltozások és feszültségek belőle közvetlenül számíthatóak.

11.7.2. Rugalmasságtani probléma és megoldási módszere

A végeelem-módszert rugalmasságtani probléma megoldására mutatjuk be, az általános rugalmasságtani probléma a következő:



11.14. ábra. Rugalmasságtani probléma

Adott (11.14) ábra szerint:

- a test geometriája,
- a test anyagjellemzői,
- terhelések,
- kényszerek.

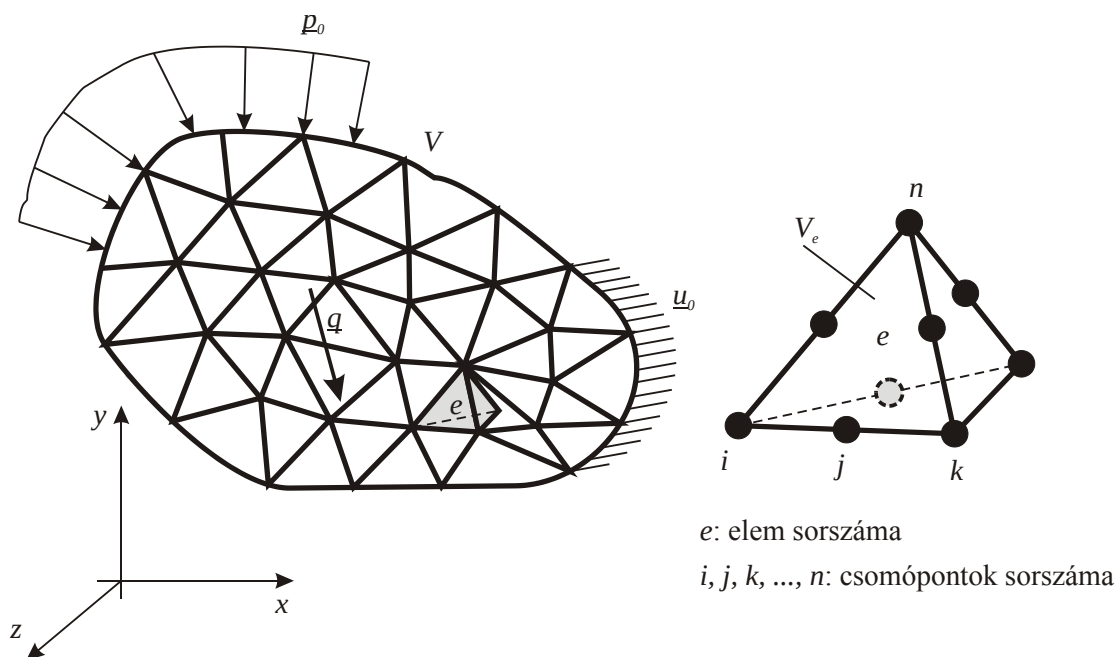
Meghatározandó: $\underline{u}(\underline{r})$, $\underline{\varepsilon}(\underline{r})$, $\underline{\sigma}(\underline{r})$.

A megoldás menete:

- A testet véges számú résztartományra, ún. véges elemre bontjuk, és az elemeken kitüntetett pontokat, ún. csomópontokat veszünk fel. Az elemek a test teljes térfogatát lefedik, geometriailag megjelenítve hálót alkotnak. Az egyes elemek közös csomópontokon keresztül illeszkednek egymáshoz.
- Az elmozdulásmezőt elemenként közelítjük, általában polinommal, amelyeket a csomópontokra illesztünk. A szomszédos elemek elmozdulásmezői a csomópontokon keresztül illeszkednek és lesznek az egész testre folytonos függvények.
- A közelítő elmozdulásmezőből a geometriai és anyagegyenletek segítségével előállítható a közelítő alakváltozási és feszültségmező, amelyekből a Lagrange-féle variációs elv felhasználásával egy lineáris algebrai egyenletrendszert kapunk a csomópontokra, ún. merevségi egyenlet. Az algebrai egyenletrendszer akkor lesz megoldható, ha az összes felületi csomópont esetében megadunk egy terhelési vagy elmozdulási paramétert, a kinematikai és dinamikai peremfeltételekből. Így a csomópontok elmozdulásai az ismeretlenek.
- Az egyenletrendszert megoldva megkapjuk a közelítő csomóponti elmozdulásokat, amiből előállítható a közelítő elmozdulásmező, alakváltozási és feszültségmező.

11.7.3. Végeselem, közelítő elmozdulásmező

A testet felosztjuk tetszőleges alakú és méretű résztartományra, véges elemre. Természetesen figyelembe véve azt, hogy az adott elemre közelítő függvényt kell felírnunk.



11.15. ábra. Felosztás, véges elem

Az e elem elmozdulásmezőjét folytonosan differenciálható függvénnyel közelítjük. A függvény típusát előre meghatározzuk és a definiálásához szükséges számú pontot (lineáris függvénynél két pont, másodfokúnál három pont élenként, stb.), csomópontot veszünk fel az elem határán. Majd az elmozdulásmezőt a csomópontok elmozdulásaival felírjuk. Az e elem i -edik csomópontjának elmozdulása:

$$\underline{u}_{ei} = \begin{bmatrix} u_{ei} \\ v_{ei} \\ w_{ei} \end{bmatrix},$$

az e elem elmozdulásvektora $i, j, k, \dots, n$ csomópontok elmozdulásaiból:

$$\underline{u}_e = \begin{bmatrix} u_{ei} \\ v_{ei} \\ w_{ei} \\ \vdots \\ u_{en} \\ v_{en} \\ w_{en} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{u}_{ei} \\ \underline{u}_{ej} \\ \vdots \\ \underline{u}_{en} \end{bmatrix},$$

$3n$ számú ismeretlent tartalmaz. Az e elem $\underline{u}_e(\underline{r})$ elmozdulásvektorát (elmozdulásmező) a $\underline{u}_e$ csomóponti elmozdulásvektorból interpolációval állítjuk elő:

$$\underline{u}_e(\underline{r}) = \underline{N}_e(\underline{r}) \cdot \underline{u}_e, \quad (11.32)$$

ahol $\underline{N}_e(\underline{r})$ approximációs mátrix (interpolációs függvények mátrixa). (3×3) -as blokkokból áll, minden blokk egy-egy csomópont interpolációs függvényeit tartalmazza.

Az e elem i csomópontjának elmozdulásából az elem elmozdulása:

$$\underline{u}_{ei}(\underline{r}) = \underline{N}_{ei}(\underline{r}) \cdot \underline{u}_{ei} = \begin{bmatrix} N_{eixx}(\underline{r}) & N_{eixy}(\underline{r}) & N_{eizx}(\underline{r}) \\ N_{eiyx}(\underline{r}) & N_{eiyy}(\underline{r}) & N_{eiyz}(\underline{r}) \\ N_{eizx}(\underline{r}) & N_{eizy}(\underline{r}) & N_{eizz}(\underline{r}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{ei} \\ v_{ei} \\ w_{ei} \end{bmatrix},$$

ahol $\underline{N}_{ei}(\underline{r})$ elemei interpolációs függvények. Az indexek értelmezése: $N_{eizx}(\underline{r})$ függvény az i csomópont z irányú elmozdulásának hatására az e elem bármely $\underline{r}$ pontjához annak x irányú elmozdulását rendeli hozzá, miközben az e elem csomóponti elmozdulás vektorának többi eleme zérus. A függvényeket úgy kell megadni, hogy teljesüljön:

- a függvények deriválhatóak legyenek,
- $\underline{N}_{ei}(\underline{r}_i) = \underline{E}$, a függvény i csomópontban adja vissza a csomóponti elmozdulás értékét,
- $\underline{N}_{ei}(\underline{r}_j) = \dots = \underline{N}_{ei}(\underline{r}_n) = 0$, a függvény a többi csomópontban tűnjön el.

Az $\underline{N}_e(\underline{r})$ mátrix n számú, az elem összes csomópontjához tartozó $\underline{N}_{ei}(\underline{r})$, $\underline{N}_{ej}(\underline{r})$, ..., $\underline{N}_{en}(\underline{r})$ blokkból áll, mérete $(3 \times 3n)$:

$$\underline{N}_e(\underline{r}) = [\underline{N}_{ei}(\underline{r}) \quad \underline{N}_{ej}(\underline{r}) \quad \dots \quad \underline{N}_{en}(\underline{r})].$$

Az elem elmozdulásmezőjének közelítése felhasználásával (11.32)-at (11.30)-ba helyettesítve előállítható az alakváltozási mező közelítése is:

$$\underline{\varepsilon}_e(\underline{r}) = \underline{\partial} \underline{u}_e(\underline{r}) = \underline{\partial} \underline{N}_e(\underline{r}) \cdot \underline{u}_e,$$

bevezetve a differenciáloperátorok és az approximációs mátrix szorzatára $\underline{B}_e(\underline{r})$ alakváltozás-csomóponti elmozdulás mátrixot:

$$\underline{\varepsilon}_e(\underline{r}) = \underline{B}_e(\underline{r}) \cdot \underline{u}_e. \quad (11.33)$$

Az elem feszültségmezője:

$$\underline{\sigma}_e(\underline{r}) = \underline{C} \underline{\varepsilon}_e(\underline{r}) = \underline{C} \underline{B}_e(\underline{r}) \cdot \underline{u}_e. \quad (11.34)$$

Az elem (11.26) szerinti potenciális energiája:

$$\Pi_e = \frac{1}{2} \int_{V_e} \underline{\sigma}_e(\underline{r}) \cdot \underline{\varepsilon}_e(\underline{r}) dV - \int_{V_e} \underline{u}_e(\underline{r}) \cdot \underline{q} dV - \int_{A_{ep}} \underline{u}_e(\underline{r}) \cdot \underline{p} dA.$$

Átírva az összefüggést a skalár és kettős skalár szorzatokat mátrixszorzattá alakítva (a belső energia tényezői felcserélve), tenzorok helyett a bevezetett vektorokat használva:

$$\Pi_e = \frac{1}{2} \int_{V_e} [\underline{\varepsilon}_e(\underline{r})]^T \underline{\sigma}_e(\underline{r}) dV - \int_{V_e} [\underline{u}_e(\underline{r})]^T \underline{q} dV - \int_{A_{ep}} [\underline{u}_e(\underline{r})]^T \underline{p} dA.$$

Helyettesítve (3.20), (3.21), (3.22)-t és a konstansokat az integrálból kiemelve:

$$\Pi_e = \frac{1}{2} (\underline{u}_e)^T \int_{V_e} [\underline{B}_e(\underline{r})]^T \underline{C} \underline{B}_e(\underline{r}) dV \underline{u}_e - (\underline{u}_e)^T \int_{V_e} [\underline{N}_e(\underline{r})]^T \underline{q} dV - (\underline{u}_e)^T \int_{A_{ep}} [\underline{N}_e(\underline{r})]^T \underline{p} dA.$$

Bevezetjük az elem merevségi mátrixát:

$$\underline{\underline{K}}_e = \int_{V_e} [\underline{B}_e(r)]^T \underline{C} \underline{B}_e(r) dV, \quad (11.35)$$

és a térfogati és felületi terhelésből származó csomóponti terhelésvektorokat:

$$\underline{F}_{qe} = \int_{V_e} [\underline{N}_e(r)]^T \underline{q} dV, \quad (11.36)$$

$$\underline{F}_{pe} = \int_{A_{ep}} [\underline{N}_e(r)]^T \underline{p} dA, \quad (11.37)$$

$$\underline{F}_e := \underline{F}_{qe} + \underline{F}_{pe}.$$

Így az elem potenciális energiája:

$$\Pi_e = \frac{1}{2} (\underline{u}_e)^T \underline{\underline{K}}_e \underline{u}_e - (\underline{u}_e)^T \underline{F}_e.$$

Az energiaelveket csak az egész testre alkalmazhatjuk, mert elemenként nem érvényesek. A test potenciális energiáját a test Q számú eleme potenciális energiáinak összege adja meg.

$$\Pi = \sum_{e=1}^Q \Pi_e = \frac{1}{2} (\underline{U})^T \underline{\underline{K}} \underline{U} - (\underline{U})^T \underline{F}.$$

A Lagrange-féle variációs elv szerint a potenciális energia elmozdulás szerinti első variációja zérus:

$$\delta \Pi = 0 = \delta \left(\frac{1}{2} (\underline{U})^T \underline{\underline{K}} \underline{U} - (\underline{U})^T \underline{F} \right) = \underline{\underline{K}} \underline{U} - \underline{F}.$$

Átrendezve a merevségi egyenlethez jutunk:

$$\underline{\underline{K}} \underline{U} = \underline{F}, \quad (11.38)$$

ahol:

$\underline{\underline{K}}$: a test merevségi mátrixa,

$\underline{U}$: a test csomóponti elmozdulásvektora,

$\underline{F}$: a test csomóponti terhelésvektora.

A (11.38) kifejezés egy lineáris egyenletrendszer, amelyet megoldva megkapjuk a rugalmasságtani feladat megoldását. (Az egyenletben szereplő tagokat egyszerű statikai probléma esetére írtuk fel, hőfeszültség, rugalmas támasz esetén a merevségi mátrix és a terhelésvektor bővül, illetve dinamikai probléma esetében a merevségi egyenletnek lesznek plusz tagjai.)

12. A VÉGESELEM-MÓDSZER ALKALMAZÁS ORIENTÁLT BEMUTATÁSA

**Szerző:
Oldal István**

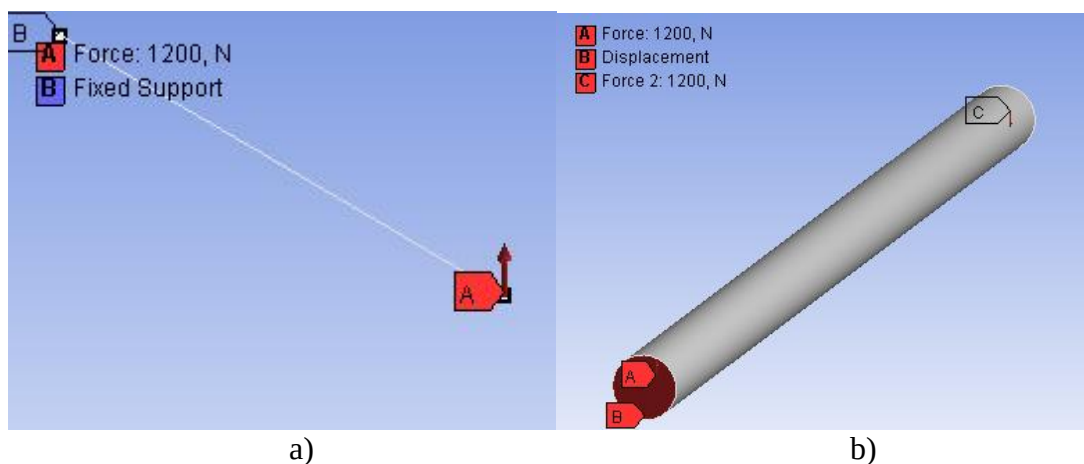
Az előző fejezetben bemutatott rugalmasságtani probléma, és a véges elemek segítségével ebből felírt merevségi egyenlet megoldása valós problémák esetében csak számítógép segítségével lehetséges. A fejezet mellékletében bemutatott nagyon egyszerű 3 elemből felépített rácsos tartó megoldását. A végelem-módszer gyakorlati alkalmazása a számítógépes szoftvereken keresztül történik. Ebben a fejezetben ennek lehetőségét és problémáit mutatjuk be néhány feladaton keresztül.

12.1. Tartók modellezése

Állandó keresztmetszetű tartók esetében a végelem-módszerben többféle modell alkalmazhatunk. Tömör tartókat 1D rúdként vagy 3D testként, vékony falú szelvényeket ezeken kívül héjként is modellezhetjük. A következőkben megvizsgáljuk, hogy az egyes modellek milyen körülmények közt alkalmazhatóak. Az összehasonlításra egyszerű problémákat oldunk meg különböző modellek felhasználásával.

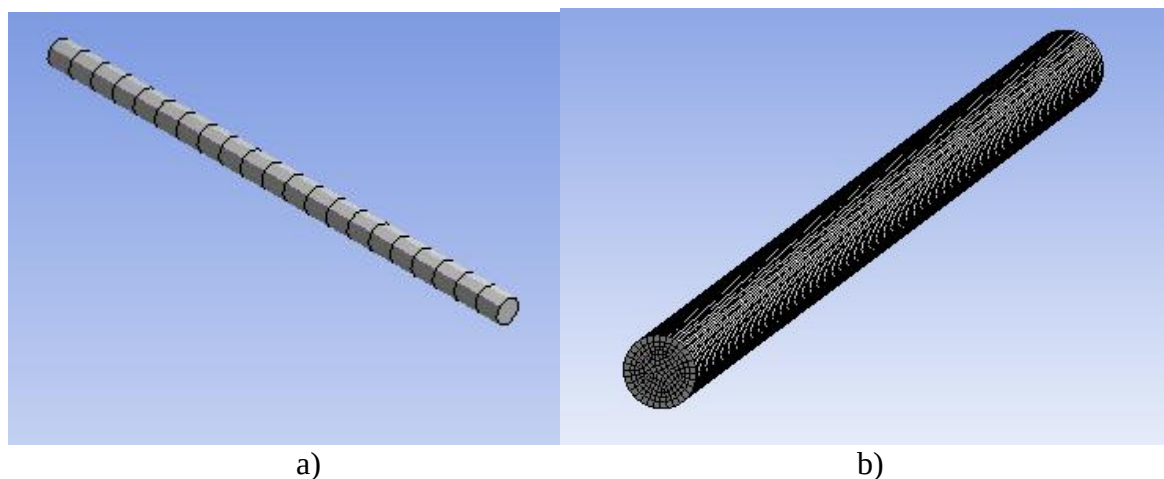
12.1.1. Kör keresztmetszetű tartó vizsgálata

Tekintsünk egy 50 mm átmérőjű, 1000 mm hosszú rudat. Az egyik felén az elfordulást és elmozdulást megakadályozzuk, a másik véglapon 1200 N nagyságú erőt működtetünk. Kereszünk a tartóban ébredő maximális feszültséget. Kétféle modellt alkalmazunk a megoldáshoz. Vonalelemek alkalmazásakor a tartót középvonalával modellezzük (12.1.a. ábra) Ebben az esetben a vonal egyik végét megfogjuk, a másik végét koncentrált erővel terheljük. 3D elemek esetében a geometriai modell egy henger, amit egyik végén felületen megoszló erővel terhelünk. A másik végén nem alkalmazunk befogást, mert a gátolt alakváltozás miatt nemcsak a hajlításból származó feszültségeket kapnánk, helyette a terheléssel ellentétes felületen megoszló erőt adunk meg és megakadályozzuk a hosszirányú elmozdulást. (12.1.b. ábra)



12.1. ábra. Tartó geometriai modellje, terhelései, kényszerei

Az 1D modellezés VEM szempontból legfontosabb előnye a kevesebb számítási igény. Maga az elem is sokkal egyszerűbb, mint a 3D elemek, emellett azonos pontosság mellett sokkal kisebb lesz az elemszám is. A behálózott modellek a 12.2. ábrán láthatóak.



12.2. ábra. VEM háló 1D és 3D elemekkel

Rúdelemek esetén 21 elem és 43 csomópont elegendő, 3D elemek esetén 33048 elem és 142911 csomópont szükséges a megfelelően pontos modell elkészítéséhez. Az elemszám ebben a terhelési esetben csökkenthető, ha az elemeket a rúd hossz tengelye irányában megnyújtjuk, de mindenképpen nagyságrendekkel több kell, mint 1D elemek esetében.

Az ébredő feszültségeket analitikusan is meghatározzuk a későbbi összehasonlítás végett. Egy befogott tartó esetében a hajlításból számítható a legnagyobb feszültség értéke kör keresztmetszet esetében:

$$\sigma = \frac{M_h}{K} = \frac{32 \cdot F \cdot l}{d^3 \pi} = \frac{32 \cdot 1200 \text{ N} \cdot 1000 \text{ mm}}{50^3 \text{ mm}^3 \cdot \pi} = 97,78 \text{ MPa} ,$$

ahol:

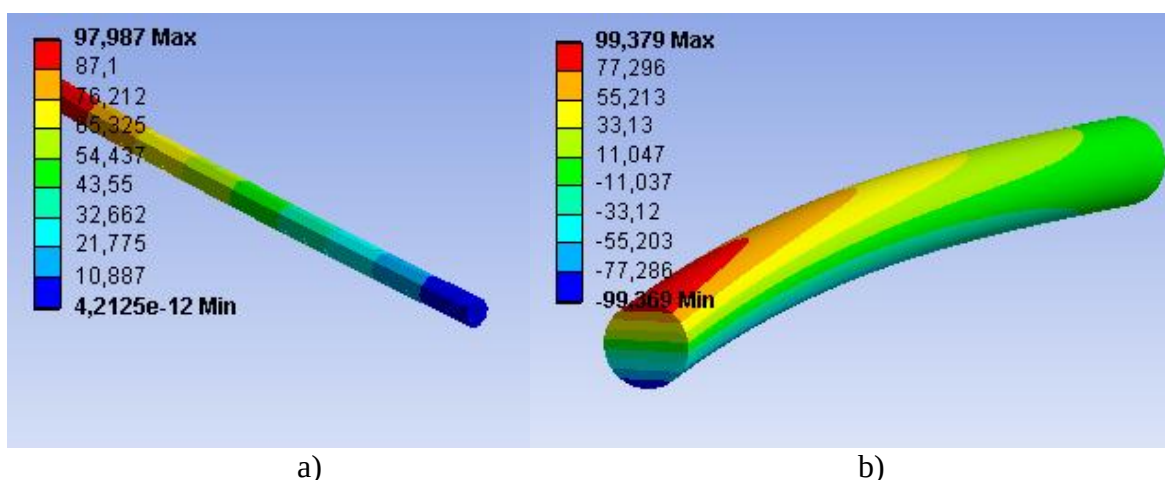
σ : feszültség,

M_h : legnagyobb hajlítónyomaték,

F : koncentrált erő,

K : keresztmetszeti tényező,

d : keresztmetszet átmérője.



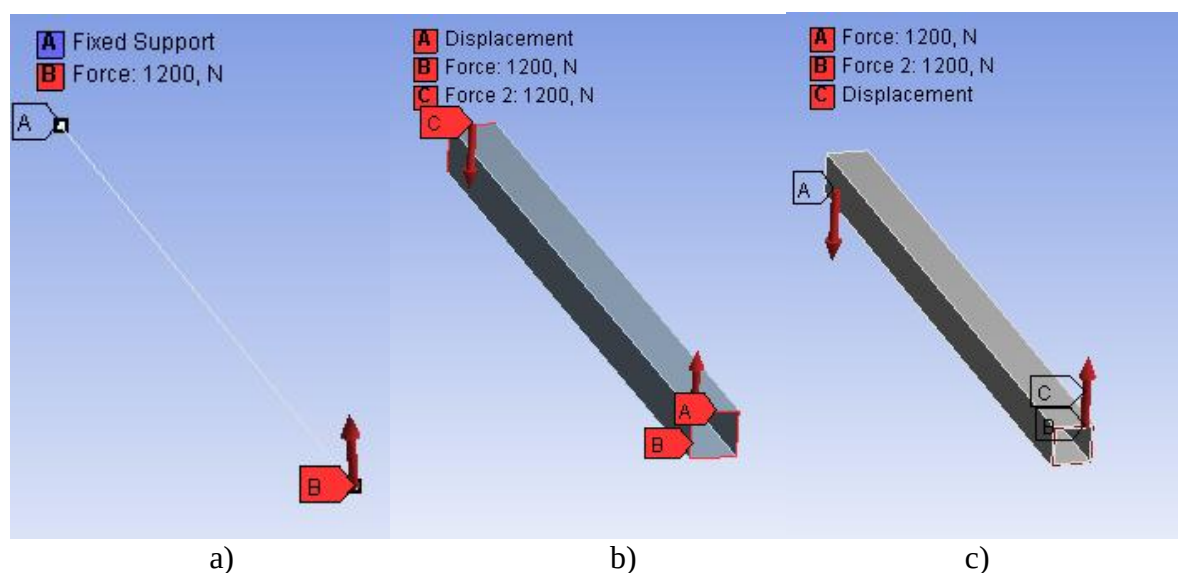
12.3. ábra. Számított normál feszültségek MPa-ban

A 12.3. ábrán láthatjuk a számított feszültségeket. Az analitikus eredménnyel közel megegyezik a rúdmodellel számított érték. A testmodellel számított feszültség kevesebb, mint 2%-kal több, ami gyakorlati szempontból elfogadható eltérés.

A rúdmodellek alkalmazása sok esetben szükséges lehet, ha egy nagy méretű szerkezetről a testmodellt olyan sok elemmel lehet előállítani, amit a rendelkezésre álló idő alatt nem tudunk megoldani, vagy ha valamilyen okból kifolyólag csökkenteni akarjuk a számítási időt. Ha a peremfeltételeket megfelelően állítjuk be, az eredmény is megbízható. Tisztában kell lennünk azonban a rúdmodell korlátaival. A megfogási módokat, érintkezési feszültségeket, keresztmetszet-átmenetek geometriáját nem képes valóságosan modellezni. A számított feszültségeket sem tudjuk olyan részletességgel leírni a keresztmetszeten belül, mint ahol a keresztmetszet geometriája is részletesen benne van a modellünkben.

12.1.2. Vékony falú zárt szelvényű rúd modellezése

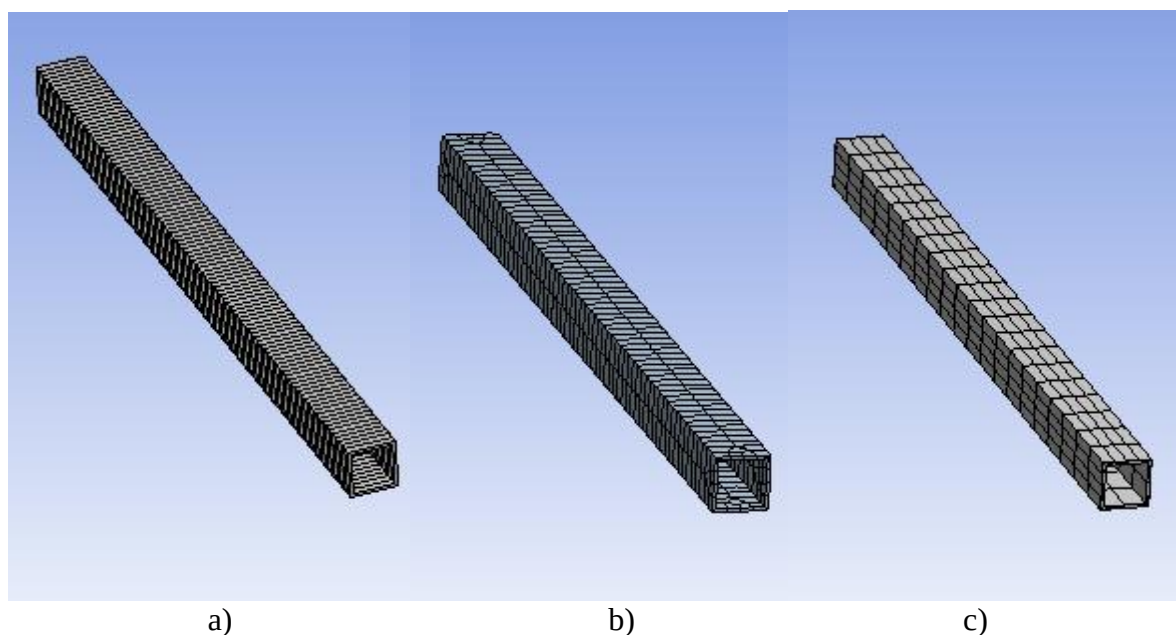
Tekintsük az előző fejezetben tárgyalt tartót úgy, hogy nem kör keresztmetszetű, hanem vékony falú 60x60x4-es zárt szelvényű idomacél. Ekkor az egy- és háromdimenziós elemek mellett lehetőségünk van héjelemek alkalmazására is a modellezéskor. A 12.4. ábrán látható, hogy a tartó geometriáját az egyes modellek a) vonalként, b) felületként, c) testként írják le.



12.4. ábra. Tartó geometriai modellje, terhelései, kényszerei

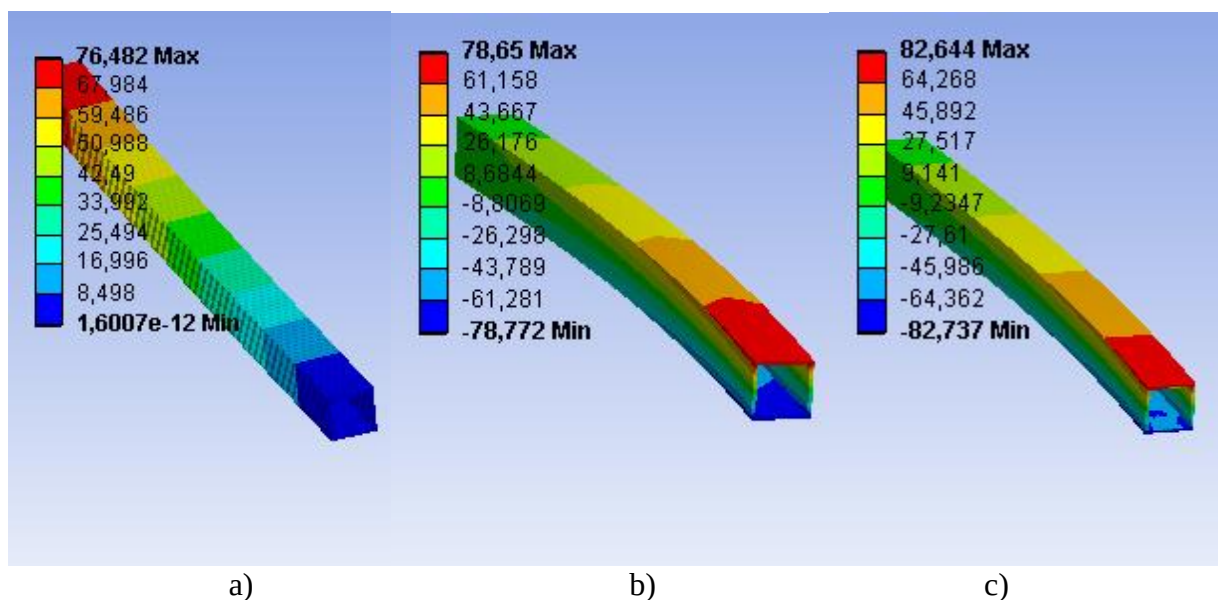
Az előzőekhez hasonlóan itt is csak a rúdmodell esetén alkalmazunk befogást. A héj és testmodell esetében erőpárt és hosszirányú megfogást alkalmazunk, mert csak a hajlításból származó feszültségeket akarjuk kiszámítani.

Az egyes geometriai modellekből hálózás után kapjuk a végelem-modelleket (12.5. ábra).



12.5. ábra. 1D, 2D és 3D végeselem-modellek

A 12.5.a. ábrán látható vonalelemekből felépített modell 100 elemből és 201 csomópontból áll. A 12.5.b. ábrán a héjelemekből felépített modell 530 elemből és 1622 csomópontból épül fel, ami többszöröse a vonalelemhez képest. A 12.5.c. ábrán látható testmodell esetében egy hosszirányban ritkább hálót alakítottunk ki, de ennek ellenére 340 elem és 1907 csomópont alkotja a modellt. A hálózás után a várákozásunknak megfelelően látható, hogy a magasabb dimenziójú modellek felépítéséhez egyre több elemre és csomópontra van szükség, a számítási igények is ennek megfelelően növekednek.



12.6. ábra. 1D, 2D és 3D végeselem-modellekkel számított normál feszültségek MPa-ban

Hajlításból analitikusan számított feszültség:

$$\sigma = \frac{M_h}{I_z} e = \frac{6 \cdot F \cdot l \cdot a}{a^4 - (a - 2v)^4} = \frac{6 \cdot 1200 \text{ N} \cdot 1000 \text{ mm} \cdot 60 \text{ mm}}{60^4 \text{ mm}^4 - 52^4 \text{ mm}^4} = 76,48 \text{ MPa},$$

ahol:

σ : feszültség,

M_h : legnagyobb hajlítónyomaték,

F : koncentrált erő,

I_z : másodrendű nyomaték,

a : keresztmetszet magassága, szélessége,

v : keresztmetszet vastagsága,

e : szélső szál távolsága a keresztmetszet súlypontjától.

A 12.6.a. ábrán látható, hogy a rúdmodellel számított feszültség megegyezik az analitikus eredménnyel, ami egyezik a várakozásokkal, mert az analitikus modell is rúdmodell. A 12.6.b ábrán látható, héjmodellel számított eredmény közel 3%, a 12.6.c. ábrán látható testmodellel számított eredmény 8% növekedést mutat a rúdmodellhez képest. Az eltérés annak a következménye, hogy a vékony falú szelvényben a feszültségek nem ideálisan egytengelyűek, amelyet csak a magasabb dimenziójú modellek képesek leírni.

12.2.3. Vékony falú nyitott szelvényű rúd modellezése

A következőkben megvizsgáljuk, hogy milyen hibát okoz, ha egy vékony falú nyitott szelvényű tartó esetében rúdmodellt alkalmazunk. A legnagyobb problémát a gátolt csavarás okozza, mert a legtöbb rúdmodell nem képes ennek leírására. Vizsgáljunk az előzőekhez hasonlóan egy 1000 mm hosszú, befogott és 1200 N koncentrált erővel terhelt, 100x100x4-es hidegen hajlított U-szelvényű idomacél tartót. Elsőként analitikusan határozzuk meg a normál feszültségeket. (A csúsztató feszültségekkel most külön nem foglalkozunk, de tudjuk, hogy azok további növekedést okoznak a redukált feszültségben.)

Hajlításból analitikusan számított feszültség

$$\sigma = \frac{M_h}{I_z} e = \frac{1200 \text{ N} \cdot 1000 \text{ mm}}{2103829 \text{ mm}^4} 50 \text{ mm} = 28,52 \text{ MPa},$$

ahol:

σ : normál feszültség,

M_h : legnagyobb hajlítónyomaték,

F : koncentrált erő,

$$I_z = \frac{a^4}{12} - \frac{(a - v)(a - 2v)^3}{12} = \frac{100^4}{12} - \frac{96 \cdot 92^3}{12} = 2103829 \text{ mm}^4 : \text{másodrendű nyomaték},$$

a : keresztmetszet magassága, szélessége,

v : keresztmetszet vastagsága,

e : szélső szál távolsága a keresztmetszet súlypontjától.

Gátolt csavarásból analitikusan számított normál feszültség

Csavarási másodrendű nyomaték:

$$I_c = \frac{1}{3} \sum v_i s_i = \frac{1}{3} (4 \text{ mm})^3 (2 \cdot 98 \text{ mm} + 96 \text{ mm}) = 6229,3 \text{ mm}^4,$$

ahol:

v_i : a felosztott keresztmetszet egyes részeinek vastagsága,

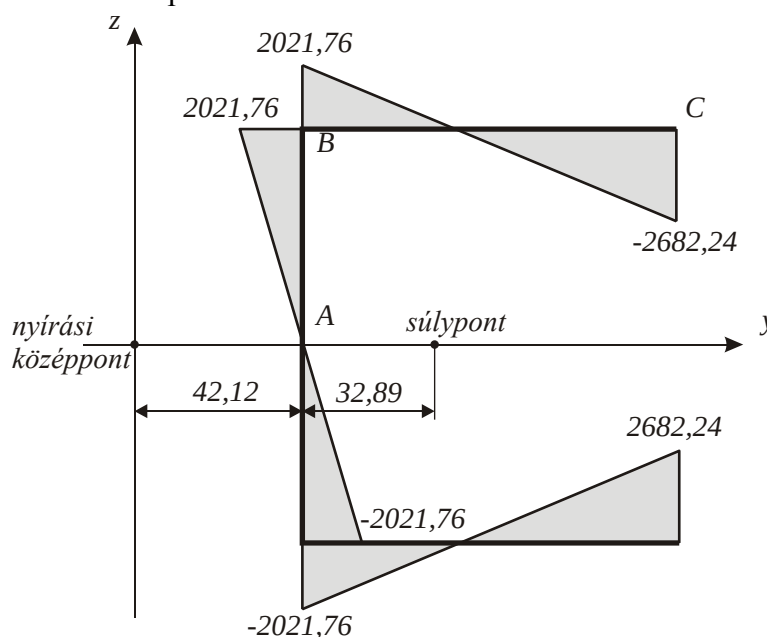
s_i : a felosztott keresztmetszet egyes részeinek középvonalának hossza.

Kétszeres cikkterület függvény:

$$\omega = \int_s d\omega = \int_{z_0}^z y \, dz - \int_{y_0}^y z \, dy,$$

ahol:

y, z : a keresztmetszet középvonalának koordinátái.



12.7. ábra. ω függvény a nyírási középpontra számítva (mm^2 -ben)

A kétszeres cikkterület függvényt a csavarási középponttal megegyező nyírási középpontra számítjuk, ennek négyzetét a keresztmetszet területén integráljuk:

$$I_\omega = \int_A \omega^2 dA = \int_s \omega^2 v \, ds = v \int_s \omega^2 ds = 4 \cdot \left[\int_0^{48} (42,12s)^2 ds + \int_0^{98} (2021,76 - 48s)^2 ds \right] \cdot 2 = 2,054 \cdot 10^9 \text{ mm}^6$$

Bevezetjük:

$$\alpha = \sqrt{\frac{G \cdot I_c}{E \cdot I_\omega}} = \sqrt{\frac{80 \text{ GPa} \cdot 6229,3 \text{ mm}^4}{210 \text{ GPa} \cdot 2,054 \cdot 10^9 \text{ mm}^6}} = 0,00107477 \text{ mm}^{-1},$$

ahol:

$G = 80 \text{ GPa}$: csúsztató rugalmassági modulus,

$E = 210 \text{ GPa}$: Young-modulus.

A tartó fajlagos elcsavarodása a hossz mentén:

$$\vartheta(x) = c_1 \cdot sh(\alpha \cdot x) + c_2 \cdot ch(\alpha \cdot x) + \frac{M_c}{G \cdot I_c} (1 - ch(\alpha \cdot x)),$$

ahol:

M_c : csavarónyomaték a nyírási középpontra,

x : a tartó középvonala menti koordináta,

c_1, c_2 : konstansok.

Ennek deriváltja:

$$\frac{d\vartheta(x)}{dx} = \alpha c_1 \cdot ch(\alpha \cdot x) + \alpha c_2 \cdot sh(\alpha \cdot x) - \alpha \frac{M_c}{G \cdot I_c} sh(\alpha \cdot x).$$

A tartó szabad végén:

$$\frac{d\vartheta(x)}{dx} = 0, \text{ ebből: } c_1 = 0.$$

A befogásnál:

$$\vartheta(x) = 0, \text{ ebből: } c_2 = \frac{M_c}{G \cdot I_c} \left(1 - \frac{1}{ch(\alpha \cdot l)} \right).$$

Az ismert konstansokkal a fajlagos elcsavarodás egyik végén befogott tartóra:

$$\vartheta(x) = \frac{M_c}{G \cdot I_c} \left(1 - \frac{sh(\alpha \cdot x)}{ch(\alpha \cdot l)} \right).$$

A fajlagos elcsavarodás deriváltja:

$$\frac{d\vartheta(x)}{dx} = -\alpha \frac{M_c}{G \cdot I_c} \frac{sh(\alpha \cdot x)}{ch(\alpha \cdot l)}.$$

A gátolt csavarás hatására létrejövő másodlagos hajlításból számított normál feszültség:

$$\sigma_\omega = -\frac{B_\omega}{I_\omega} \omega,$$

ahol:

$$B_\omega = EI_\omega \frac{d\vartheta(x)}{dx} : \text{kettős nyomaték.}$$

Esetünkben:

$$B_\omega = EI_\omega \left(-\alpha \frac{M_c}{G \cdot I_c} \frac{sh(\alpha \cdot x)}{ch(\alpha \cdot l)} \right) = -\frac{M_c}{\alpha} \frac{sh(\alpha \cdot x)}{ch(\alpha \cdot l)},$$

ennek maximuma a befogásnál $x = l$, van:

$$B_\omega = -6,6267 \cdot 10^7 \text{ Nmm}^2.$$

Ekkor a másodlagos hajlításból számított feszültség, az U-szelvény sarkában, 12.7. ábra „B” pont ($\omega = 2021,76 \text{ mm}^2$):

$$\sigma_{\omega B} = 65,21 \text{ MPa} ,$$

az U-szelvény végénél, 20.7. ábra „C” pont ($\omega = -2682,24 \text{ mm}^2$):

$$\sigma_{\omega C} = -86,52 \text{ MPa} .$$

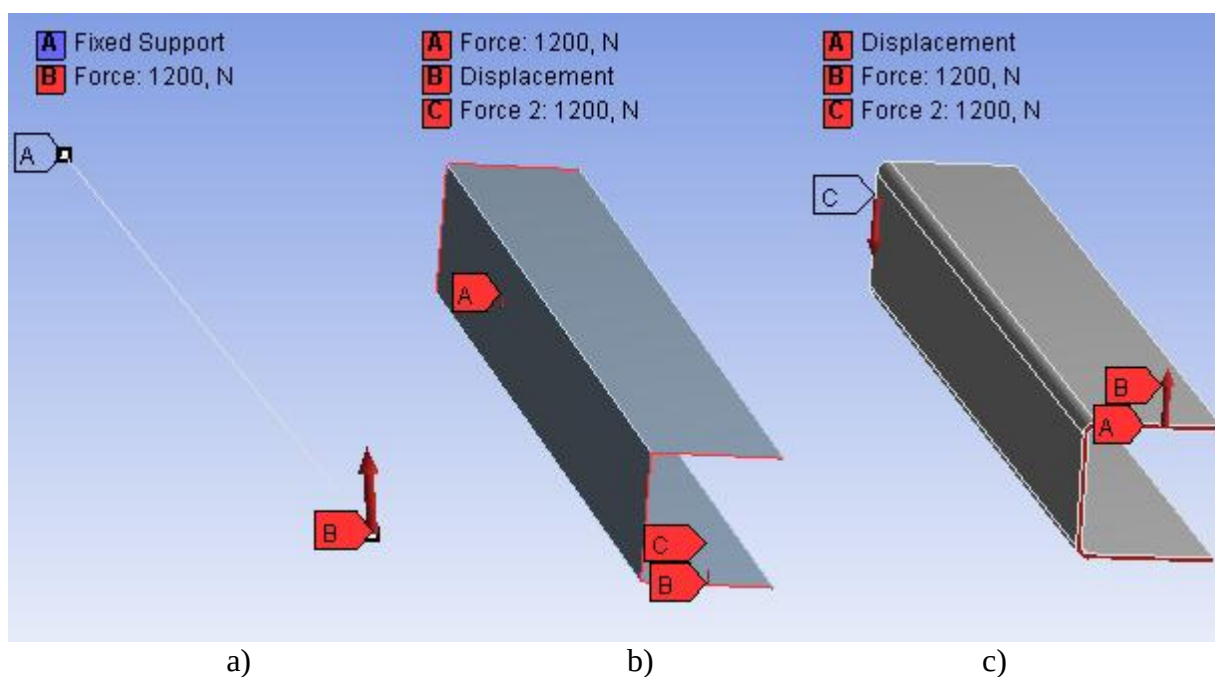
Ekkor a hajlításból és másodlagos hajlításból számított feszültségek összege:

$$\sigma_B = \sigma + \sigma_{\omega B} = 93,73 \text{ MPa} ,$$

$$\sigma_C = \sigma + \sigma_{\omega C} = -58 \text{ MPa} .$$

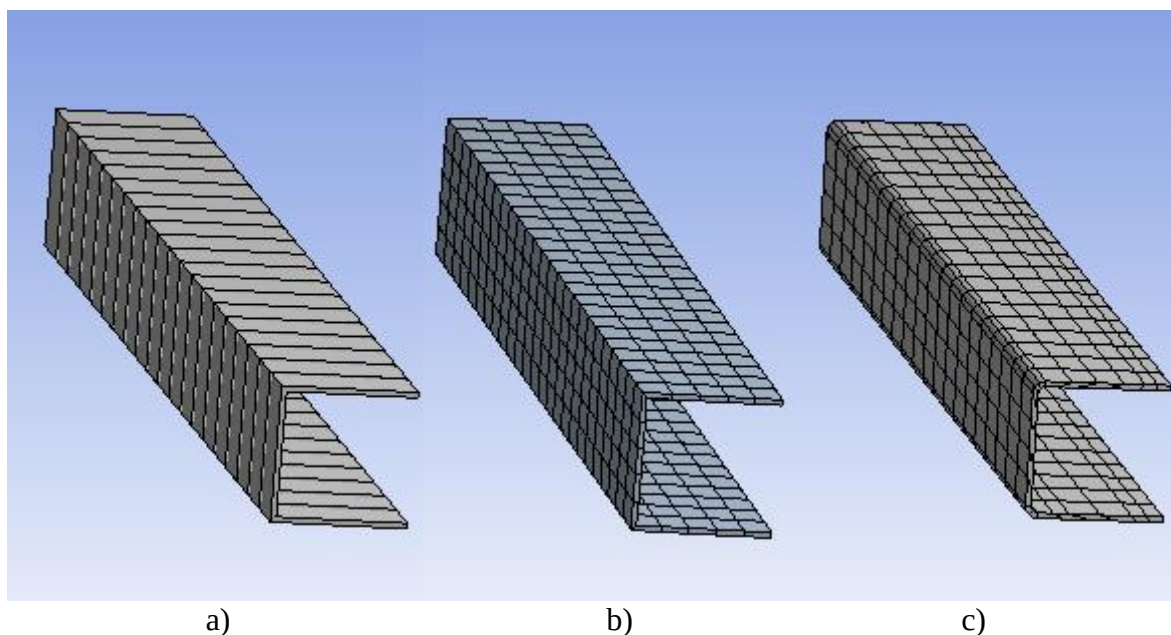
VEM modellekkel számított normál feszültség

Az analitikusan számított feszültségeket összehasonlítjuk a vonal-, héj- és testelemekkel modellezett tartó esetén számított értékekkel. A geometriai modellek az előzőekhez hasonlóan a középvonalával (12.8.a. ábra), középsíkjával (12.8.b. ábra) és teljes keresztmetszetével (12.8.c. ábra) leírt tartók lesznek.



12.8. ábra. Tartó geometriai modellje, terhelései, kényszerei

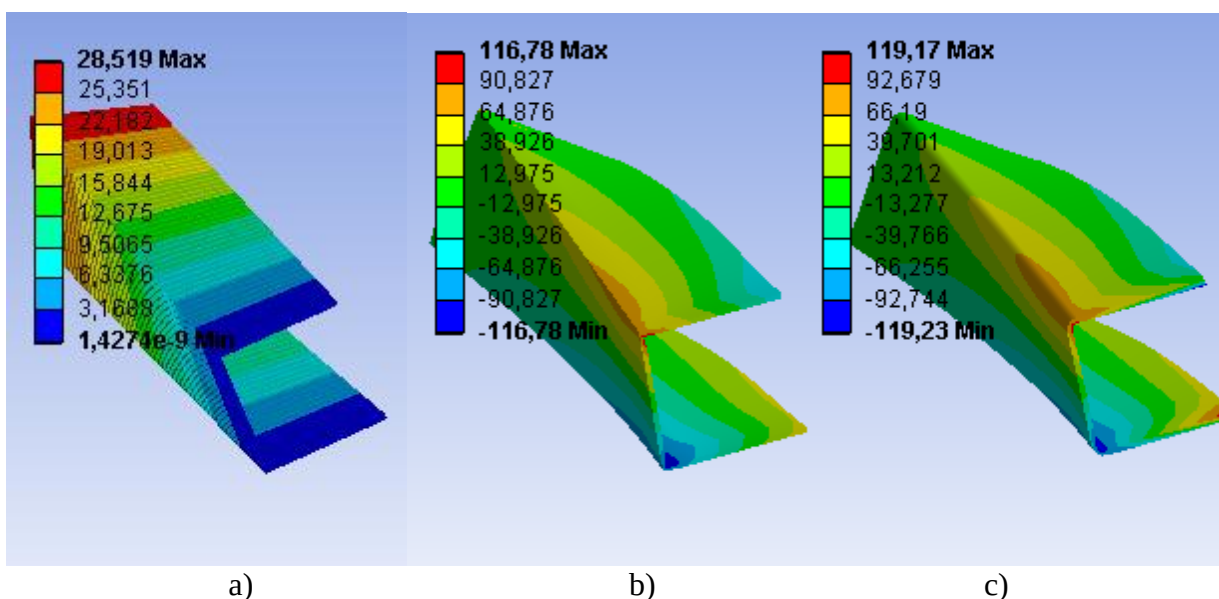
A befogást ebben az esetben is csak a rúdmodell esetén alkalmaztam, a héj- és testmodelleknél erőpárt és csak hosszirányú megfogást.



12.9. ábra. 1D, 2D és 3D végelem-modellek

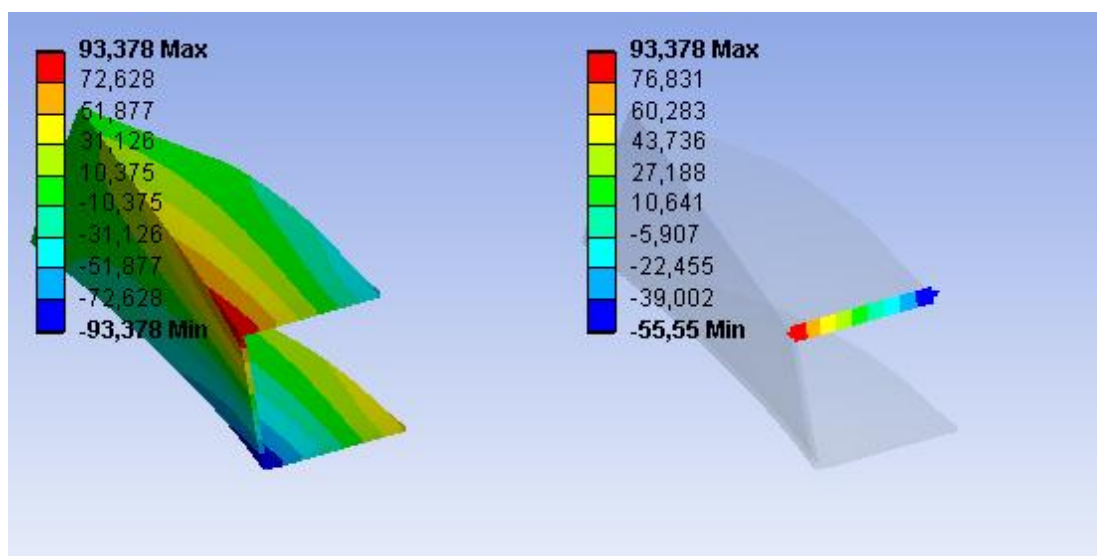
A 12.9.a. ábrán látható vonalelemekből felépített modell 20 elemből és 41 csomópontból áll. A 12.9.b. ábrán a héjelemekből felépített modell 375 elemből és 1206 csomópontból épül fel. A 12.9.c. ábrán látható testmodell esetében 420 elem és 3148 csomópont alkotja a modellt.

A 12.10. ábrán a számított feszültségeket láthatjuk MPa mértékegységben ábrázolva. Látható a rúdmodell az alakváltozásánál, hogy a csavarással számol, de a másodlagos hajlítást nem képes modellezni (mj: létezik gátolt csavarást is modellező rúdelem, de csak egyes szoftverekben, alkalmazásakor az erő szelvényen belüli támadáspontját külön kell definiálni). A héj- és a testmodell esetében a végeselemes szimuláció az analitikusan számítotttnál magasabb feszültségeket eredményezett. Ennek oka, hogy az analitikus modellel a középsíkokra számítottuk a feszültségeket, és a lemez vastagsága mentén állandónak tekintettük, a modellek viszont a vastagság menti változást is követték.



12.10. ábra. 1D, 2D és 3D végelem-modellekkel számított normál feszültségek MPa-ban

Ha megnézzük a feszültségeket a héjelemek esetében a középsíkon (12.11. ábra), akkor láthatjuk, hogy a számított $\sigma_B = 93,73 \text{ MPa}$, $\sigma_C = -58 \text{ MPa}$ feszültségekkel kis hibával egyeznek az eredmények.



12.11. ábra. Héjmodellel számított normál feszültségek a középsíkon MPa-ban

12.1.4. Vastag falú cső modellezése

Vizsgáljuk meg, hogy egy 60 mm belső és 120 mm külső átmérőjű, 30 MPa belső nyomással terhelt csövet milyen modellekkel, mekkora pontossággal tudunk leírni.

Analitikus modell

Vastag falú csőben a feszültségek hosszirányban állandóak, a sugár mentén másodfokú hiperbola függvény szerint változnak. A csődiagramokat ezért a fajlagos reciprok sugár függvényében szokás ábrázolni:

$$\rho = \left(\frac{r}{r_b} \right)^2,$$

ahol:

r : a cső sugara (változó),

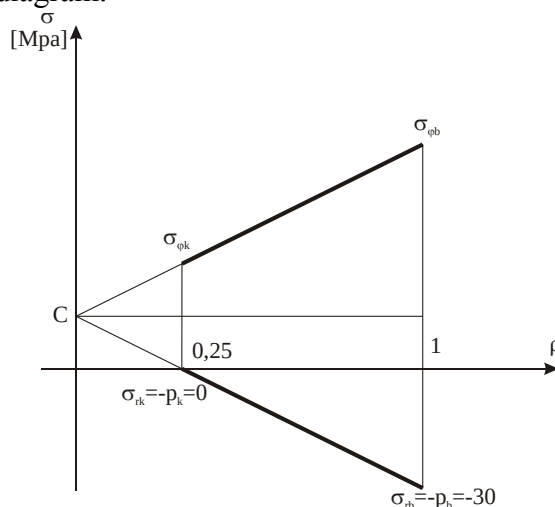
r_b : a cső belső sugara.

Esetünkben a külső és belső falnál:

$$\rho_k = \left(\frac{r_k}{r_b} \right)^2 = \left(\frac{60}{30} \right)^2 = 0,25,$$

$$\rho_b = \left(\frac{r_b}{r_b} \right)^2 = 1.$$

Ezek segítségével a csődiagram:



12.12. ábra: Csődiagram

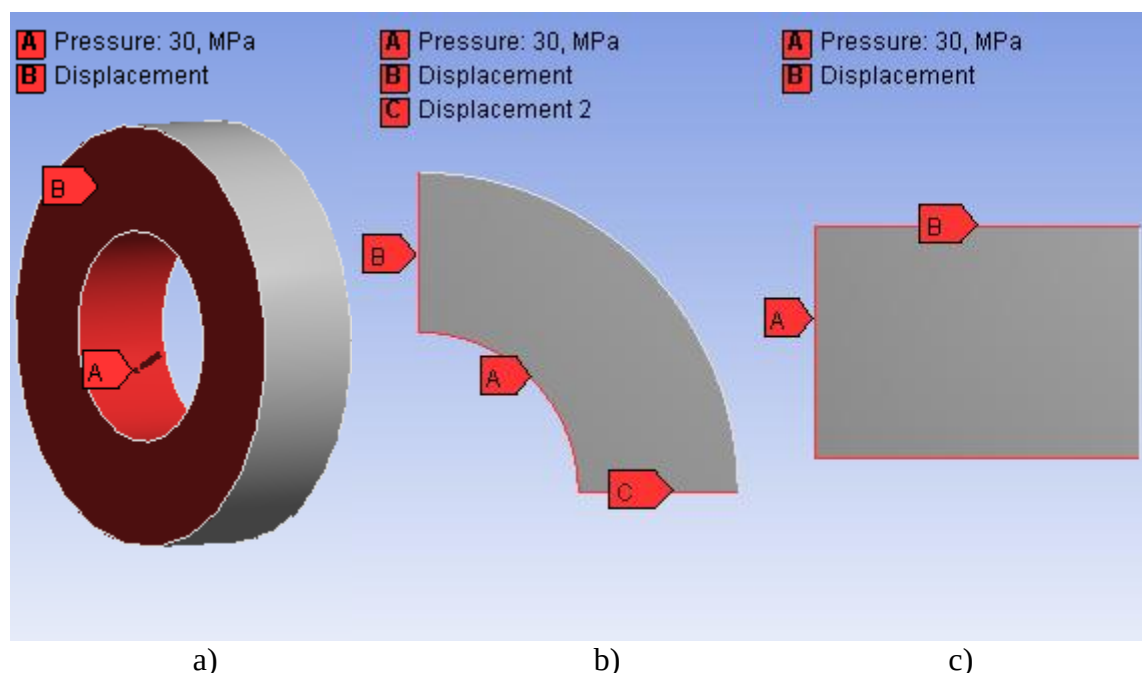
A sugárirányú feszültség a külső és belső falon megegyezik a külső és belső nyomással. Ezután az arányosság felhasználásával a külső és belső falon az érintőirányú feszültségek: $\sigma_{\phi b} = 50 \text{ MPa}$, $\sigma_{\phi k} = 20 \text{ MPa}$. A tengelyirányú feszültségek attól függően, hogy nyitott vagy zárt a cső, állandó C vagy 0 értéket vesznek fel. Vizsgáljuk meg, hogy az egyes végelem-modellekkel milyen értékeket kapunk az érintőirányú feszültségekre!

Végelem-modellek

Egy vastag falú cső, amely nyomással van terhelve, 2D és 3D modellek segítségével is megfelelően leírható. 3D modell esetében is egyszerűsíthetünk az eredeti geometrián annak felhasználásával, hogy a hossz mentén állandóak a feszültségek, mert így az eredeti csőből egy kis szakaszt elegendő modelleznünk. Ha a szimmetriát is kihasználjuk, akkor ennek a felét vagy a negyedét is elegendő modellezni, de akkor a szimmetriának megfelelő kényszereket kell alkalmaznunk az elvágott felületeken.

2D modellek esetén két lehetőségünk van a cső leírására. A cső minden keresztmetszete síkalakváltozást szenved, ezért modellezhetjük a csövet egy keresztmetszetével síkban. Ekkor is kihasználhatjuk a szimmetriát, így az eredeti körgyűrű felület helyett alkalmazhatunk fél vagy negyed körgyűrű geometriát is, itt is alkalmazva a szimmetria feltételeket az elvágott vonalakon. A másik lehetőség, ha a tengelyszimmetrikus geometriát és terhelést is kihasználjuk, és tengelyszimmetrikus 2D modellt választunk. Ekkor elegendő a csőfalból egy hosszirányú félmetsetet modelleznünk.

Az összehasonlítás érdekében kiválasztunk mindhárom modellből egyet, és annak alkalmazásával megoldjuk a problémát.



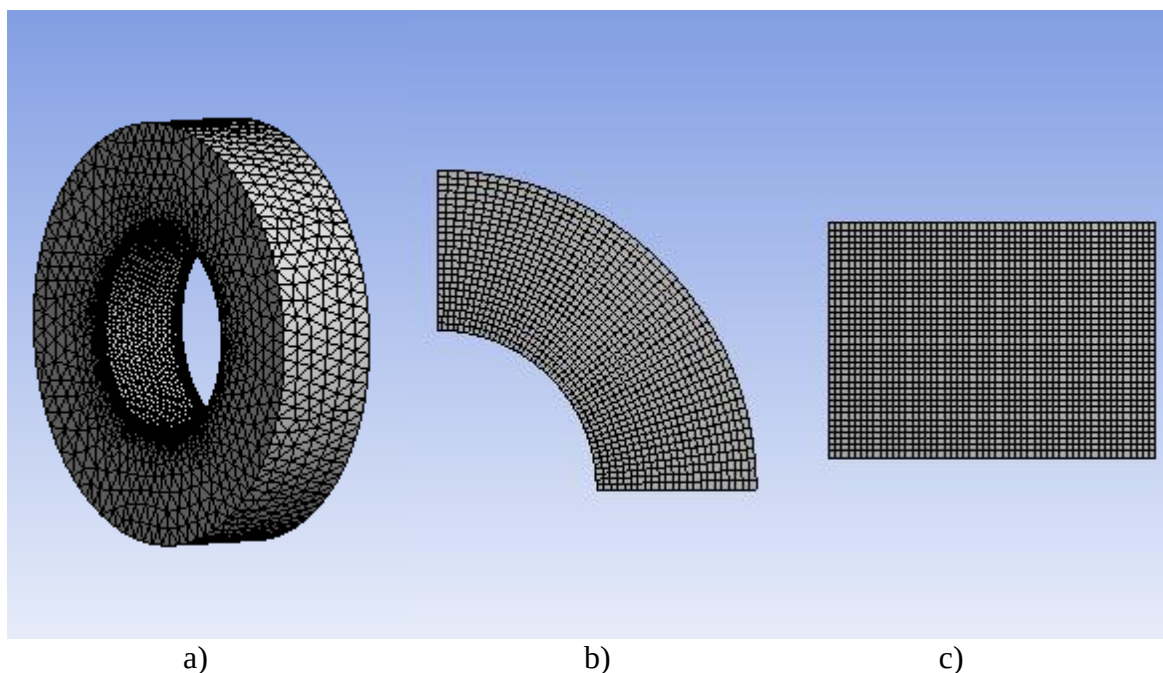
12.13. ábra: Vastag falú cső modellezési lehetőségei, terhelések, kényszerek

A 12.13.a. ábrán a 3D modellel a cső egy szakaszát modellezzük, az elhagyott részeket elmozdulásokkal helyettesítjük: a cső két metszett felületén (B) nem engedünk tengelyirányú elmozdulást. A cső belső felületén 30MPa nyomást definiálunk.

A 12.13.b. ábrán a cső egy keresztmetszetének negyedét modellezzük. Ekkor 2D síkalakváltozások modelljét kell választanunk. A „B” és „C” vonalakon a vonalra merőleges elmozdulást nem engedjük meg, így használva ki a szimmetrikus viselkedést. Az „A” vonalon alkalmazzuk a 30MPa-nak megfelelő vonal menti terhelést.

A 12.13.c. ábrán a rúd hosszmetsetének egy szakaszát modellezzük 2D tengelyszimmetrikus elemekkel. A geometriai modellt úgy kell megrajzolni, hogy a forgástengelytől belső sugárnyira, 30mm-re legyen az „A” felület. A „B” vízszintes vonalakra függőleges elmozdulást nem engedünk, így modellezzük a cső további szakaszait. Az „A” vonalra a 30MPa nyomásnak megfelelő vonal menti terhelést.

A modelleknél meghatározott elemekből felépített végeelem-modellek láthatóak a 12.14. ábrán. A 12.14.a. ábrán látható 3D elemekből létrehozott végeelem-modell hálójá 44756 elemből és 69542 csomópontból áll. A 12.14.b. ábrán látható 2D síkalakváltozás elemekből létrehozott háló 1104 elemből és 3455 csomópontból áll. A 12.14.c. ábrán látható tengelyszimmetrikus 2D elemekből felépített háló 1887 elemből és 5838 csomópontból áll. Az összehasonlításakor azt érdemes figyelembe venni, hogy azonos elemméret és pontosság mellett a 3D modell elem- és csomópontszáma ötödére a tengelyszimmetrikus modell esetében huzadára csökkenthető. Így elmondhatjuk, hogy számítási igény szempontjából a legjobb (legkevesebb számítási igénye van) a tengelyszimmetrikus modell, második a síkalakváltozás modell és utolsó a testmodell.



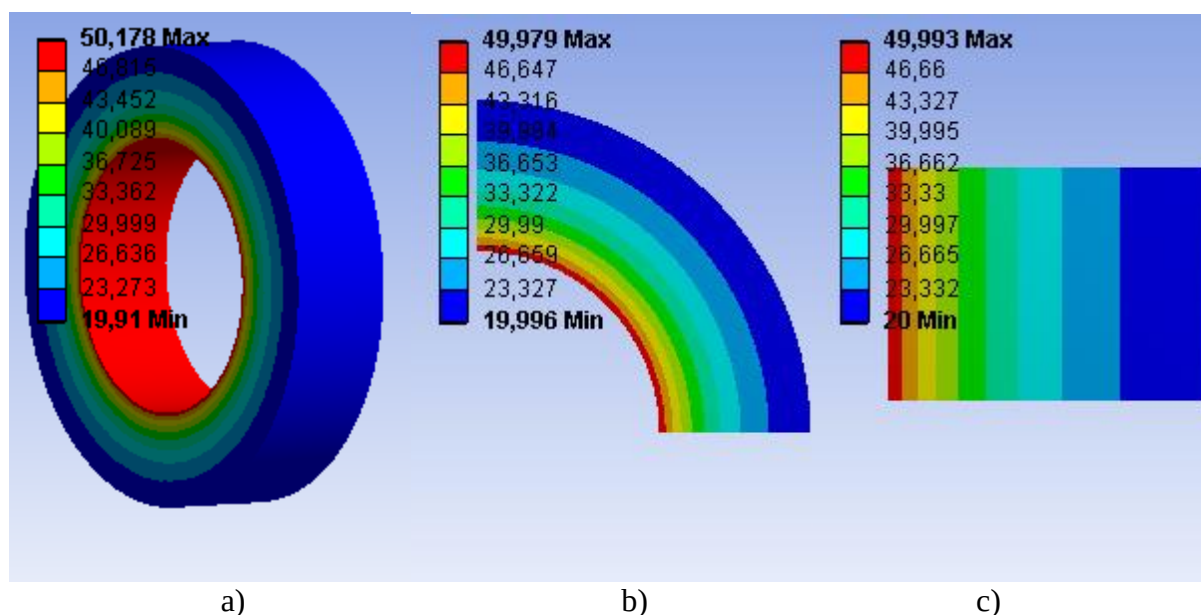
a)

b)

c)

12.14. ábra. 3D, 2D síkalakváltozás és 2D tengelyszimmetrikus modellek

A különböző modellekkel számított érintő irányú feszültségek a 12.15. ábrán láthatóak.



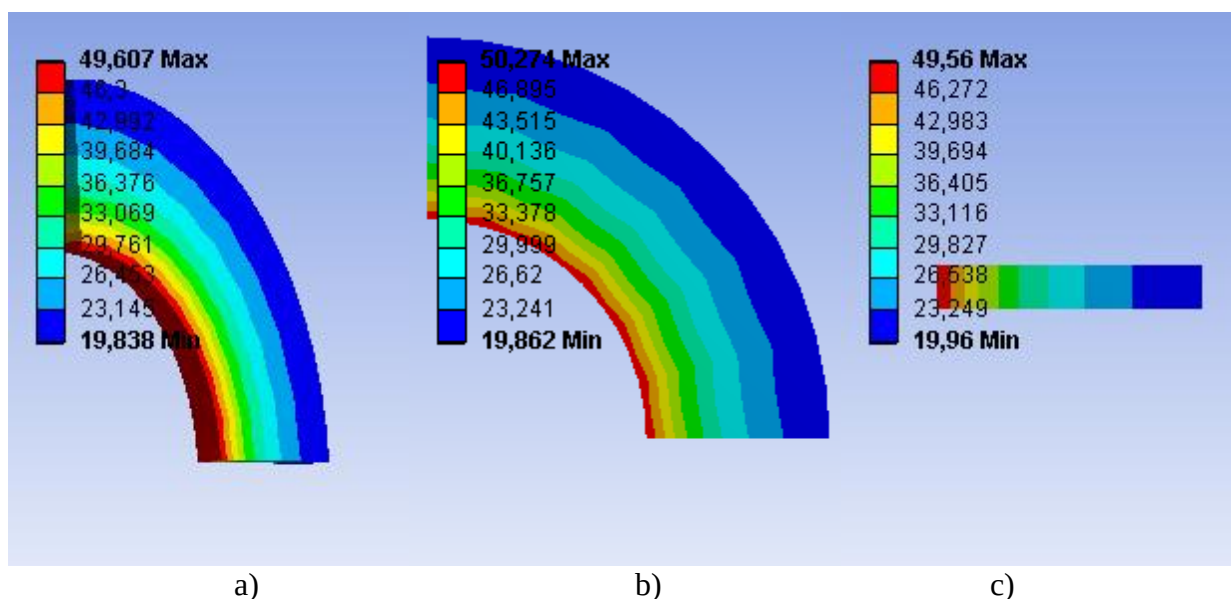
a)

b)

c)

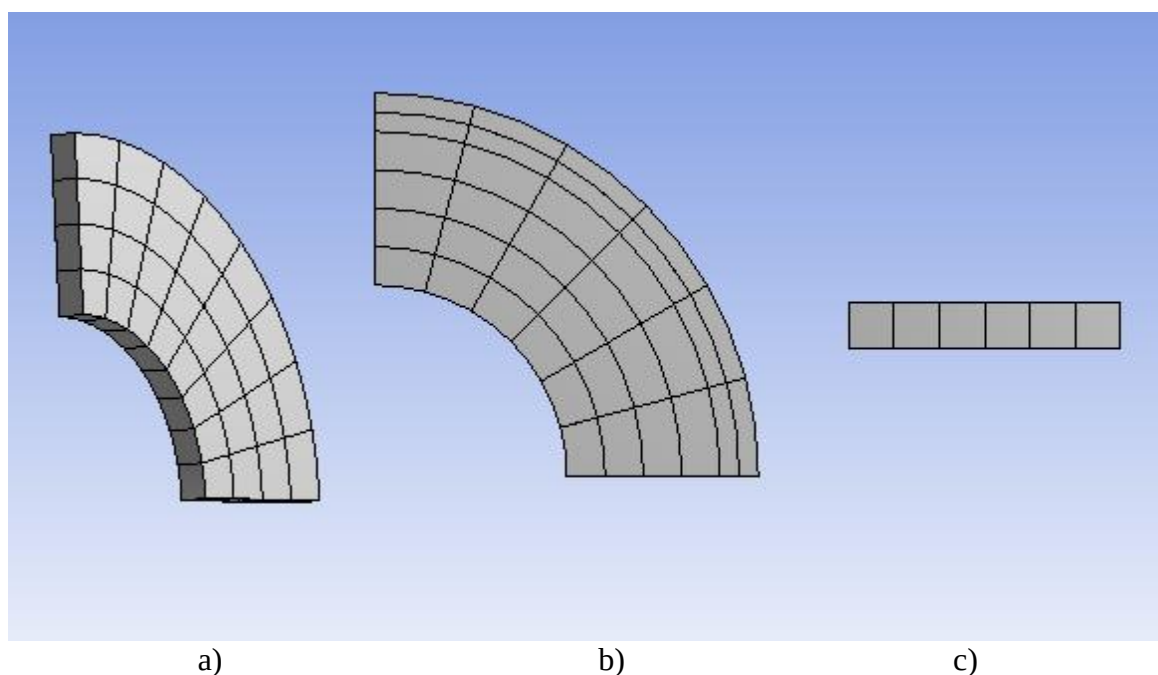
12.15. ábra. 3D, 2D síkalakváltozás és 2D tengelyszimmetrikus modellekkel számított érintő irányú normál feszültségek MPa-ban

Az eredményeket összehasonlítva egymással és az analitikus eredménnyel, megállapítható, hogy a legjobb közelítést a tengelyszimmetrikus, modell esetében kaptunk, de egyik modell sem ért el még 0,5% hibát sem az analitikus eredményhez képest. Jobban hangsúlyozható az egyes modellek közti különbség, ha mindhárom esetben az elemméretet úgy választjuk meg, hogy az 5% hibahatáron belül kerüljön. Ebben az esetben a testmodellnél is kihasználjuk a kettős szimmetriát.



12.16. ábra: 3D, 2D síkalakváltozás és 2D tengelyszimmetrikus modellekkel számított 5%-nál kisebb hibájú érintő irányú normál feszültségek MPa-ban

A 12.16. ábrán látható feszültségeket a háló módosításával kaptuk, addig finomítva, amíg az 5%-os hibahatáron belül került az 50 MPa elméleti megoldáshoz képest. Az ehhez szükséges legdurvább hálók a 12.17. ábrán láthatóak.



12.17. ábra: 3D, 2D síkalakváltozás és 2D tengelyszimmetrikus modellek 5%-os hibához tartozó minimális elemszámmal

Az egyes modellekhez tartozó elemszámok és csomópontok száma:

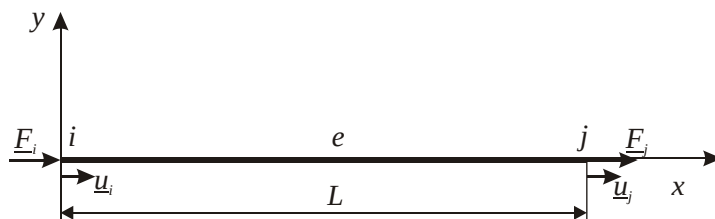
Modelltípus	Elemszám	Csomópontok száma
Test	32	287
2D síkalakváltozási	36	133
2D tengelyszimmetrikus	6	33

Ezek alapján azonos megállapítást tehetünk, mint az előző eredmények alapján: a legkisebb számítási igény mellett a legpontosabb eredményt a tengelyszimmetrikus modell alkalmazásával kapjuk.

12.2. MELLÉKLET: Merevségi egyenlet meghatározása és megoldása síkbeli, húzott rúdelemre

12.2.1. Merevségi egyenlet 2D húzott rúdelemre

A húzott-nyomott rudakból álló szerkezetek (rácsos tartók) jellemzője, hogy az egyes rudakat csak tengelyirányú terhelés éri. A rúd tengelyéhez lokális koordinátarendszert veszünk fel. A 12.18. ábrán látható L hosszúságú e rúdelem terhelései a csomópontokban lévő $\underline{F}_i = (F_i, 0)$, $\underline{F}_j = (F_j, 0)$ terhelés.



12.18. ábra: Két csomópontú, síkbeli rúdelem

Az i csomópontban $\underline{u}_i = (u_i, 0)$, a j csomópontban $\underline{u}_j = (u_j, 0)$ az elmozdulás. A rúdelem $\underline{u}_e(x, y) = (u_e(x), 0)$

(12.1)

elmozdulásmezőjét lineáris függvénnyel közelítjük:

$$u_e(x) = a_{e0} + a_{e1}x, \quad (12.2)$$

az elmozdulásmező az elem csomópontjaiban az ottani elmozdulásokat adja vissza:

$$u_e(x=0) = u_i = a_{e0} + a_{e1}0,$$

$$u_e(x=L) = u_j = a_{e0} + a_{e1}L.$$

Ebből az együtthatókat kifejezve és helyettesítve (12.2)-be:

$$u_e(x) = u_i + \frac{u_j - u_i}{L}x.$$

Ezt a (12.1) összefüggésbe helyettesítve:

$$\underline{u}_e(x, y) = \left(\frac{1-x}{L}u_i + \frac{x}{L}u_j, 0 \right),$$

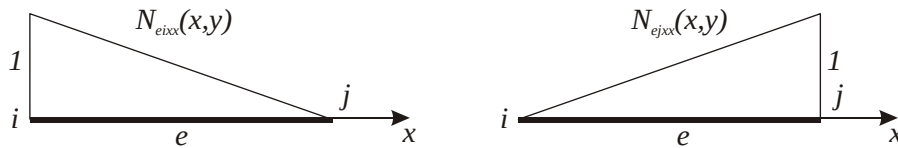
szorzattá alakítva, mátrix alakban:

$$\underline{u}_e(x, y) = \begin{bmatrix} u_e(x, y) \\ v_e(x, y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1-x}{L} & 0 & \frac{x}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \end{bmatrix} = \underline{N}_e(x, y) \underline{u}_e,$$

ahol $\underline{N}_e(x, y)$ az e rúdelem approximációs mátrixa, $\underline{u}_e$ a csomóponti elmozdulások vektora. Az approximációs mátrix két blokkból áll, az i és a j csomóponti vektorokhoz tartozó interpolációs függvényekkel:

$$\underline{N}_{ei}(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{1-x}{L} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \underline{N}_{ej}(x, y) = \begin{bmatrix} \frac{x}{L} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

$N_{eix}(x, y) = \frac{1-x}{L}$, $N_{ejx}(x, y) = \frac{x}{L}$ interpolációs függvények a követelményeknek megfelelnek (folytonos, saját csomópontban egységnyi, a többi csomópontban eltűnik), a 12.19. ábrán láthatóak.



12.19. ábra. Interpolációs függvények

Rúdelem esetében csak tengelyirányú nyúlások vannak, így a geometriai egyenlet:

$$\underline{\varepsilon}_e(x, y) = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{d\underline{u}_e(x, y)}{dx} = \frac{d\underline{N}_e(x, y)}{dx} \underline{u}_e = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \end{bmatrix} = \underline{B}_e(x, y) \underline{u}_e.$$

A $\underline{B}_e(x, y)$ elmozdulás-alakváltozás mátrixnak állandó elemei vannak, tehát a rúd fajlagos nyúlása állandó. Egytengelyű feszültségállapotban az egyszerű Hooke-törvény alkalmazható a feszültség számítására:

$$\underline{\sigma}_e(x, y) = \underline{C} \underline{\varepsilon}_e(x, y) = \underline{C} \underline{B}_e(x, y) \underline{u}_e.$$

Ekkor az anyagjellemzők mátrixa:

$$\underline{C} = \begin{bmatrix} E & 0 \\ 0 & E \end{bmatrix}.$$

Az elem merevségi mátrixa:

$$\underline{K}_e(x, y) = \int_{V_e} [\underline{B}_e(x, y)]^T \underline{C} \underline{B}_e(x, y) dV = \int_0^L [\underline{B}_e(x, y)]^T \underline{C} \underline{B}_e(x, y) A dx =$$

$$= \int_0^L \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E & 0 \\ 0 & E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{1}{L} & 0 & \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} A dx = \begin{bmatrix} \frac{E}{L^2} & 0 & -\frac{E}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{E}{L^2} & 0 & \frac{E}{L^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} A \int_0^L dx$$

$$\underline{\underline{K}}_e(x, y) = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \underline{\underline{K}}_e. \quad (12.3)$$

Ekkor az elem merevségi egyenlete:

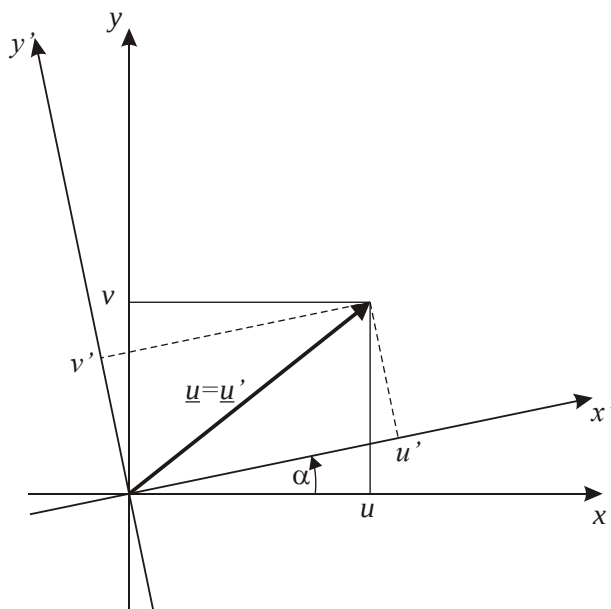
$$\underline{\underline{K}}_e \underline{u}_e = \underline{F}_e, \quad (12.4)$$

ahol

$\underline{u}_e = [u_i \quad v_i \quad u_j \quad v_j]^T$ az elem csomóponti elmozdulásvektora,

$\underline{F}_e = [F_{xi} \quad F_{yi} \quad F_{xj} \quad F_{yj}]^T$ az elem csomóponti terhelésvektora.

A rácsos tartók rúdjaihoz kötött lokális koordinátarendszerek általános esetben különböznek, így a merevségi egyenletet át kell transzformálni egy közös, úgynevezett globális (abszolút) koordinátarendszerbe azért, hogy a merevségi mátrixok összegezhetőek legyenek a teljes testre.



12.20. ábra. Vektor elforgatott koordinátarendszerben

Egy a 12.20. ábrán látható vektor koordinátáit α szöggel elforgatott koordinátarendszerben a következőképpen számítjuk:

$$u' = u \cdot \cos(\alpha) + v \cdot \sin(\alpha), \quad v' = u \cdot \sin(\alpha) - v \cdot \cos(\alpha).$$

Mátrix alakban:

$$\underline{u}' = \begin{bmatrix} u' \\ v' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \underline{T} \underline{u}, \quad (12.5)$$

ahol $\underline{T}$: transzformációs mátrix. A mátrix a két vektorból álló $\underline{u}_e$ és $\underline{F}_e$ vektorokra két blokkban írható fel, ahol egy blokk egy vektorra vonatkozik:

$$\underline{T} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) & 0 & 0 \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ 0 & 0 & -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}.$$

Állítsuk elő az elem merevségi mátrixát egy α szöggel elforgatott koordináta-rendszerben! Ehhez a (12.4) egyenlet elforgatott alakját kell előállítanunk:

$$\underline{K}'_e \underline{u}'_e = \underline{F}'_e. \quad (12.6)$$

(12.5) szerint:

$$\underline{u}'_e = \underline{T} \underline{u}_e \Rightarrow \underline{u}_e = \underline{T}^{-1} \underline{u}'_e, \text{ ehhez hasonlóan: } \underline{F}_e = \underline{T}^{-1} \underline{F}'_e. \text{ Ezt helyettesítve (12.4)-be:}$$

$$\underline{K}_e \underline{T}^{-1} \underline{u}'_e = \underline{T}^{-1} \underline{F}'_e. \text{ Szorozzuk balról } \underline{T} \text{-vel:}$$

$$\underline{T} \underline{K}_e \underline{T}^{-1} \underline{u}'_e = \underline{T} \underline{T}^{-1} \underline{F}'_e,$$

$$\underline{T} \underline{T}^{-1} = \underline{E} \Rightarrow \underline{T} \underline{K}_e \underline{T}^{-1} \underline{u}'_e = \underline{F}'_e, \text{ melyet (12.6)-tal összevetve a következő adódik:}$$

$$\underline{K}'_e = \underline{T} \underline{K}_e \underline{T}^{-1}.$$

$\underline{T}$ ferdeszimmetrikus, ezért $\underline{T}^{-1} = \underline{T}^T$, akkor:

$$\underline{K}'_e = \underline{T} \underline{K}_e \underline{T}^T. \quad (12.7)$$

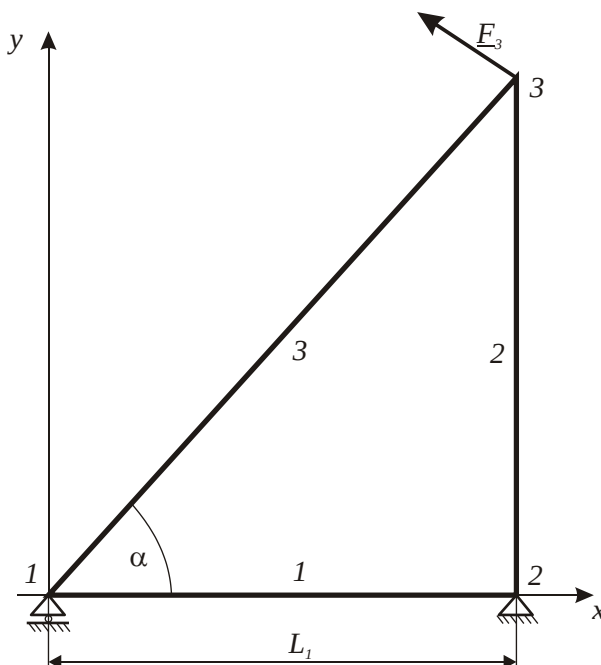
Számítsuk ki a (12.7) kifejezéssel értelmezett, globális koordináta-rendszerbeli merevségi mátrixot síkbeli rúdelemre a lokális koordináta-rendszerbeli merevségi mátrix felhasználásával:

$$\underline{K}'_e \underline{T}^T = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & -\cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\cos(\alpha) & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\underline{K}'_e = \underline{T} \underline{K}_e \underline{T}^T = \frac{AE}{L} \begin{bmatrix} \cos^2(\alpha) & -\cos(\alpha)\sin(\alpha) & -\cos^2(\alpha) & \cos(\alpha)\sin(\alpha) \\ -\cos(\alpha)\sin(\alpha) & \sin^2(\alpha) & \cos(\alpha)\sin(\alpha) & -\sin^2(\alpha) \\ -\cos^2(\alpha) & \cos(\alpha)\sin(\alpha) & \cos^2(\alpha) & -\cos(\alpha)\sin(\alpha) \\ \cos(\alpha)\sin(\alpha) & -\sin^2(\alpha) & -\cos(\alpha)\sin(\alpha) & \sin^2(\alpha) \end{bmatrix} \quad (12.8)$$

Egy szerkezet esetében az összes rúd merevségi mátrixát azonos koordináta-rendszerbe transzformáljuk, és összegezzük. Ezután felírható a szerkezetre a merevségi egyenlet, amely megoldása az összes csomóponti erő és elmozdulás.

12.2.2. Példa



12.21. ábra. Rácsos szerkezet

A 12.21. ábrán látható három rúdból álló rácsos szerkezet ismert adatai:

$$F_{3x} = -1200 \text{ N}$$

$$F_{3y} = 1000 \text{ N}$$

$$L_1 = 1,2 \text{ m}$$

$$\alpha = 50^\circ$$

$$A_1 = A_2 = A_3 = A = 100 \text{ mm}^2$$

$$E = 210 \text{ GPa}$$

Számítsuk ki az erőket és az elmozdulásokat!

Rúdhosszak:

$$L_2 = L_1 \tan(\alpha) = 1430,1 \text{ mm}$$

$$L_3 = \frac{L_1}{\cos(\alpha)} = 1866,87 \text{ mm}$$

Az 1 rúd merevségi mátrixa a lokális (amely azonos az abszolúttal) koordináta-rendszerében (12.3) szerint:

$$\underline{\underline{K}}_1 = \frac{AE}{L_1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 17500 & 0 & -17500 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -17500 & 0 & 17500 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{N}{mm}$$

A csomópontok szerinti 2x2-es blokkok (felső index az elem száma, alsó index a két csomópont száma, amelyek közt a blokk a kapcsolatot leírja):

$$\underline{\underline{K}}_1 = \begin{bmatrix} \underline{\underline{K}}_{11}^1 & \underline{\underline{K}}_{12}^1 \\ \underline{\underline{K}}_{21}^1 & \underline{\underline{K}}_{22}^1 \end{bmatrix}.$$

A 2. rúd merevségi mátrixa a lokális koordináta-rendszerében:

$$\underline{\underline{K}}_2^\xi = \frac{AE}{L_2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 14684,24 & 0 & -14684,24 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -14684,24 & 0 & 14684,24 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{N}{mm}$$

A 2. rúd az abszolút koordináta-rendszerre merőleges, így át kell számítani abszolút koordináta-rendszerbe (12.7) szerint:

$$\underline{\underline{K}}_2 = \underline{\underline{T}} \underline{\underline{K}}_2^\xi \underline{\underline{T}}^T = \frac{AE}{L_2} \begin{bmatrix} \cos^2(\alpha_2) & -\cos(\alpha_2)\sin(\alpha_2) & -\cos^2(\alpha_2) & \cos(\alpha_2)\sin(\alpha_2) \\ -\cos(\alpha_2)\sin(\alpha_2) & \sin^2(\alpha_2) & \cos(\alpha_2)\sin(\alpha_2) & -\sin^2(\alpha_2) \\ -\cos^2(\alpha_2) & \cos(\alpha_2)\sin(\alpha_2) & \cos^2(\alpha_2) & -\cos(\alpha_2)\sin(\alpha_2) \\ \cos(\alpha_2)\sin(\alpha_2) & -\sin^2(\alpha_2) & -\cos(\alpha_2)\sin(\alpha_2) & \sin^2(\alpha_2) \end{bmatrix}$$

ahol $\alpha_2 = -90^\circ$.

$$\underline{\underline{K}}_2 = \frac{AE}{L_2} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 14684,24 & 0 & -14684,24 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -14684,24 & 0 & 14684,24 \end{bmatrix} \frac{N}{mm}$$

A csomópontok szerinti 2x2-es blokkok:

$$\underline{\underline{K}}_2 = \begin{bmatrix} \underline{\underline{K}}_{22}^2 & \underline{\underline{K}}_{23}^2 \\ \underline{\underline{K}}_{32}^2 & \underline{\underline{K}}_{33}^2 \end{bmatrix}.$$

A 3. rúd merevségi mátrixa a lokális koordináta-rendszerében:

$$\underline{\underline{K}}_3^\xi = \frac{AE}{L_3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 11248,78 & 0 & -11248,78 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -11248,78 & 0 & 11248,78 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{N}{mm}$$

A 3. rúd az abszolút koordináta-rendszerrel α szöget zár be, így át kell számítani abszolút koordináta-rendszerbe:

$$\underline{\underline{K}}_3 = \underline{\underline{T}} \underline{\underline{K}}_3^x \underline{\underline{T}}^T = \frac{AE}{L_3} \begin{bmatrix} \cos^2(\alpha) & -\cos(\alpha)\sin(\alpha) & -\cos^2(\alpha) & \cos(\alpha)\sin(\alpha) \\ -\cos(\alpha)\sin(\alpha) & \sin^2(\alpha) & \cos(\alpha)\sin(\alpha) & -\sin^2(\alpha) \\ -\cos^2(\alpha) & \cos(\alpha)\sin(\alpha) & \cos^2(\alpha) & -\cos(\alpha)\sin(\alpha) \\ \cos(\alpha)\sin(\alpha) & -\sin^2(\alpha) & -\cos(\alpha)\sin(\alpha) & \sin^2(\alpha) \end{bmatrix}$$

ahol $\alpha = -50^\circ$.

$$\underline{\underline{K}}_3 = \begin{bmatrix} 4647,73 & 5538,94 & -4647,73 & -5538,94 \\ 5538,94 & 6601,06 & -5538,94 & -6601,06 \\ -4647,73 & -5538,94 & 4647,73 & 5538,94 \\ -5538,94 & -6601,06 & 5538,94 & 6601,06 \end{bmatrix} \frac{N}{mm}$$

A csomópontok szerinti 2x2-es blokkok:

$$\underline{\underline{K}}_3 = \begin{bmatrix} \underline{\underline{K}}_{11}^3 & \underline{\underline{K}}_{13}^3 \\ \underline{\underline{K}}_{31}^3 & \underline{\underline{K}}_{33}^3 \end{bmatrix}.$$

A merevségi mátrixokat összeadjuk, úgy, hogy az azonos csomópontok közti kapcsolatot leíró blokkokat összeadjuk, így a szerkezet merevségi mátrixa:

$$\underline{\underline{K}} = \begin{bmatrix} \underline{\underline{K}}_{11}^1 + \underline{\underline{K}}_{11}^3 & \underline{\underline{K}}_{12}^1 & \underline{\underline{K}}_{13}^3 \\ \underline{\underline{K}}_{21}^1 & \underline{\underline{K}}_{22}^1 + \underline{\underline{K}}_{22}^2 & \underline{\underline{K}}_{23}^2 \\ \underline{\underline{K}}_{31}^3 & \underline{\underline{K}}_{32}^2 & \underline{\underline{K}}_{33}^2 + \underline{\underline{K}}_{33}^3 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 17500 + 4647,73 & 5538,94 & -17500 & 0 & -4647,73 & -5538,94 \\ 5538,94 & 6601,06 & 0 & 0 & -5538,94 & -6601,06 \\ -17500 & 0 & 17500 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 14684,24 & 0 & -14684,24 \\ -4647,73 & -5538,94 & 0 & 0 & 4647,73 & 5538,94 \\ -5538,94 & -6601,06 & 0 & -14684,24 & 5538,94 & 14684,24 + 6601,06 \end{bmatrix} \frac{N}{mm}$$

A szerkezet merevségi egyenlete:

$$\underline{\underline{K}}\underline{\underline{U}} = \underline{\underline{F}}$$

$$\begin{bmatrix} 22147,73 & 5538,94 & -17500 & 0 & -4647,73 & -5538,94 \\ 5538,94 & 6601,06 & 0 & 0 & -5538,94 & -6601,06 \\ -17500 & 0 & 17500 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 14684,24 & 0 & -14684,24 \\ -4647,73 & -5538,94 & 0 & 0 & 4647,73 & 5538,94 \\ -5538,94 & -6601,06 & 0 & -14684,24 & 5538,94 & 25285,3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{1x} \\ F_{1y} \\ F_{2x} \\ F_{2y} \\ F_{3x} \\ F_{3y} \end{bmatrix}$$

helyettesítve az ismert erő és elmozdulás peremfeltételeket:

$$\begin{bmatrix}
 22147,73 & 5538,94 & -17500 & 0 & -4647,73 & -5538,94 \\
 5538,94 & 6601,06 & 0 & 0 & -5538,94 & -6601,06 \\
 -17500 & 0 & 17500 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 14684,24 & 0 & -14684,24 \\
 -4647,73 & -5538,94 & 0 & 0 & 4647,73 & 5538,94 \\
 -5538,94 & -6601,06 & 0 & -14684,24 & 5538,94 & 25285,3
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 u_1 \\
 0 \\
 0 \\
 0 \\
 u_3 \\
 v_3
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 0 \\
 F_{1y} \\
 F_{2x} \\
 F_{2y} \\
 -1200 \\
 1000
 \end{bmatrix}.$$

A szorzat egy hat ismeretlenes lineáris egyenletrendszer, megoldása:

$$u_1 = -0,068571 \text{ mm}$$

$$u_3 = -0,523986 \text{ mm}$$

$$v_3 = 0,16549 \text{ mm}$$

$$F_{1y} = 1430,1 \text{ N}$$

$$F_{2x} = 1200 \text{ N}$$

$$F_{2y} = -2430,1 \text{ N}$$

13. CAX RENDSZEREK INTEGRÁCIÓJA

**Szerző:
Mikó Balázs**

A számítógéppel segített tervezés (CAD), gyártás-előkészítés (CAM) és mérnöki tervezés (CAE) számítógépes rendszerei nem önmagukban, elszigetelten dolgoznak, hanem egy adott feladat megoldása során egyetlen rendszert alkotnak, melyben a különböző feladatok végrehajtásán együttesen dolgozik több mérnök, akik akár földrajzilag is eltérő helyen vannak. Ezen közös munka több aspektusból vizsgálható, az együttműködés különböző szinteken valósulhat meg.

A tervezők munkájuk során számos szabványos, vagy más cégek által gyártott alkatrészeket illetve részegységeket alkalmaznak, melyek jelentős része különböző elemkatalógusokban illetve a forgalmazók internetes honlapjain elérhetők.

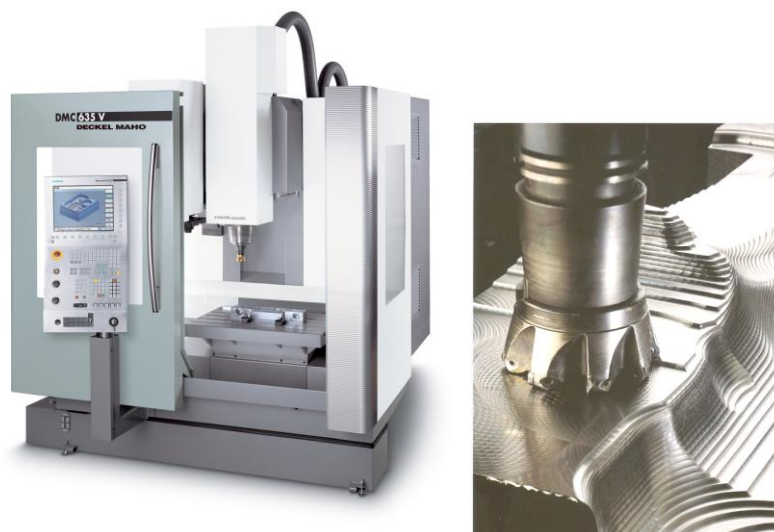
Az egyes tervezési feladatokat gyakran különböző CAD/CAM/CAE rendszerekben oldják meg, így ezek között meg kell teremteni az adatok cseréjét, mely történhet natív fájlok beolvasásával, vagy szabványos fájlformátumokon keresztül. A tananyag bemutatja a leggyakrabban használt STEP és IGES formátumokat, használatuk előnyeit és hátrányait.

Amennyiben a tervezési folyamatot egyetlen rendszerbe foglaljuk, melyben az egyes tervezési fázisok térben és időben elválnak egymástól, meg kell oldanunk a projekt menedzselését, valamint a hatékony adatkezelést. A tervezői csoportmunka erre ad megoldást. A tervezés során keletkező adatokat egyetlen egységként célszerű kezelni. A termék adat kezelő (PDM) rendszerek ezt a feladatot oldják meg, így valamennyi adat megfelelő jogosultság esetén hozzáférhető, kereshető, módosítható.

13.1. CAx rendszerek

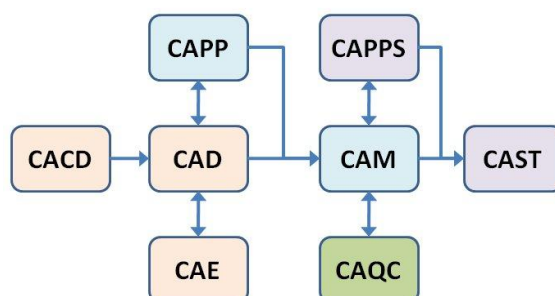
A CAD rendszerek fejlődésével hamar nyilvánvalóvá vált az igény a rendszerek képességeinek bővítésére. Ez három irányba indult el: egyrészt a modellezési technológiák és a modellezési képességek fejlesztése területén; másrészt a CAD rendszerekbe integrálható szakmodulok irányába; harmadrészt a CAD modellekre alapuló további feladatok számítógépes támogatására.

E harmadik terület fejlődésének jelentős hajtó ereje a CNC megmunkálási technológiák fejlesztése. Az egymásra hatás nyilvánvaló: a felhasználói igények egyre bonyolultabb termékgeometriát igényelnek, tehát szükséges a CAD rendszerek fejlesztése, hogy a szükséges geometria lemodellezhető legyen. Ez azonban hasztalan, ha nem tudjuk legyártani a megtervezett geometriát, melyhez a CNC (Computer Numerical Control) vezérlésű szerszámgépek fejlesztése vált szükségessé. A 13.1. ábra egy korszerű CNC vezérlésű megmunkáló központot mutat, valamint marással előállított 3D-s felületet nagyolás után.



13.1. ábra. CNC megmunkálóközpont (DMC 635V) és 3D-s mart felület nagyolás után

A számítógéppel segített technológiák kapcsolódását mutatja a 13.2. ábra. Ennek kezdő állomása a *számítógéppel segített koncepcionális tervezés* (computer aided conceptual design - CACD), amely segít összegyűjteni, megfogalmazni a termékkel szembeni elvárásokat, valamint a korai formaterveket, koncepciókat. A számítógéppel segített *tervezést* (computer aided design / drawing - CAD), amely jelenthet 2D-s *rajzolást*, szerkesztést, vagy 3D-s modellezést és az alapján rajzgenerálást, különféle mérnöki számításokkal, termék szimulációval, *mérnöki számításokkal* támogathatjuk (computer aided engineering- CAE). A CAD adatok alapján a számítógéppel segített *gyártás* (computer aided manufacturing – CAM) rendszerek segítségével tervezhetjük meg a gyártáshoz szükséges szerszámpályákat és NC programokat. A két rendszer elem közötti kapcsolatot a számítógéppel segített *folymattervezés* (computer aided process planning – CAPP) teremti meg, melynek feladata a gyártási folyamat lépéseinek megtervezése (művelettervezés). A CAM szorosan összekapcsolódik a számítógéppel segített *minőségellenőrzéssel* (computer aided quality control – CAQC), amely elsősorban koordináta mérés technika támogatását jelenti. A gyártás-előkészítés fontos feladata a gyártási erőforrások és az anyagszükséglet biztosítása, valamint a gyártás ütemezése, melyet a számítógéppel segített *termelés tervezés* (computer aided production planning and scheduling – CAPPs) valósít meg. A gyártáshoz kapcsolódó logisztikai feladatokat a számítógéppel segített *raktározás és szállítás* modul (computer aided storage and transportation - CAST) segítségével tervezhetjük.

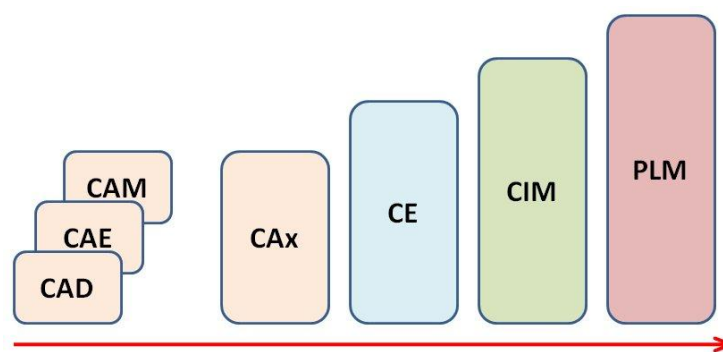


13.2. ábra. CAx technológiák kapcsolatai

A CAx rendszerek integrációja révén megvalósítható a *párhuzamos, konkurens, szimultán termékfejlesztési folyamat*, mely tulajdonképpen egy stratégia a terméktervezés szervezésére.

A konkurens tervezés (Concurrent Engineering - CE) stratégiája két alapelve épül: az egyik, hogy már a konstrukciós tervezés során figyelembe kell venni a gyártási, szerelési, karbantartási és a termék használatból való kivonhatósági vizsgálatának műszaki-gazdasági feltételeit. A másik, hogy a kivitelezési részfolyamatok számára közvetlenül hozzáférhető és feldolgozható formába kell biztosítani minden információt.

A hardver és szoftver eszközök fejlődésével létrejött az *integrált gyártás* koncepciója (computer integrated manufacturing - CIM) abból indul ki, hogy a termelési rendszerek eredményességét az erőforrások kapcsolatainak minősége és a rajtuk végrehajtott operációk együttesen határozzák meg. Egy vállalaton belüli legfontosabb termelési alrendszer: a vállalatirányítási (management), a műszaki (engineering) és a termelési (production). A CIM rendszerek a vállalatirányítási, gazdasági, pénzügyi, vevő és beszállító funkcióikat integrálja a műszaki folyamatokkal együtt.



13.3. ábra

13.2. CAx rendszerek integrációja

CAD rendszerek integrációjának kétféle iránya figyelhető meg. Egyrészt a CAD rendszerek bizonyos funkciói beépülnek más alkalmazásokba, melyek valamilyen módon kapcsolódnak a termék életciklusával kapcsolatos tevékenységekhez, másrészt a CAD rendszerek integrálnak magukba más alkalmazásokat.

A CAD rendszerek manapság túl bonyolultak ahhoz, hogy beépíthetők legyenek más alkalmazásokba. Ez a bonyolultság egyrészt jelentkezik a kezelhetőségben, mivel a számos funkció teljes körű alkalmazása – már ha ez lehetséges egyáltalán – komoly képzettséget igényel. A bonyolultság másrészt megmutatkozik a rendszer szoftveres megvalósításában is, amely az integrációt nehezíti meg.

A CAD rendszerek fejlődése során a számításokat végző **grafikus mag**, úgynevezett **kernel**, és a használatot lehetővé tevő felhasználói felület elvált egymástól. Ez lehetővé tette, hogy a háttérben dolgozó matematikai módszerek fejlesztése és a felhasználói felület grafikai megjelenése, menürendszerének kialakítása elváljon egymástól. A grafikus kernel biztosítja tehát a 3D-s objektumok kezelését és megjelenítését, valamint az adatkommunikációhoz szükséges funkciókat, melyek a CAD rendszeren belüli modulok és más CAD rendszerekkel való kommunikációt biztosítja. A CAD rendszerekben létrehozott 3D-s adatokat egyre szélesebb körben, egyre több alkalmazásban használják és a grafikus kernel fejlesztése hosszadalmas, drága és bonyolult feladat, a grafikus kernel piacképes terméké vált. Így más rendszerek fejlesztői hozzáférnek a kernel biztosította 3D-s geometriák kezeléséhez, a fejlesztés az alkalmazásra koncentrálhat. A grafikus kernel más alkalmazásokba történő integrációjával a CAD rendszerek egyes funkciói elérhetővé válnak más szoftverekben, biztosítják a tökéletes adatkommunikációt az ugyan ezen kernelen működő CAD rendszerrel. Az integráció jellem-

zően a 3D-s adatok kezelésére, megjelenítésére és az adatátvitel egyszerűsítése céljából történik. A 3D-s kernelt használó tipikus alkalmazások:

- a CNC megmunkálás szimulációs programjai,
- formatervező alkalmazások,
- szimulációs programok,
- PLM rendszerek megjelenítési moduljai,
- adatkonvertáló programok.

A legjelentősebb 3D-s grafikus kernelek a következők:

- ACIS: a Dassault Systemes-hez tartozó Spatial Corporation 3D grafikus kernelje, amely objektum-orientált C++ környezetben készül, és támogatja a drótváz, felület és testmodellezés hibrid alkalmazását. 1989-ben jelent meg az első verzió, 2010-ben a 21. verziónál tartanak. A kernel elérhető Windows, Apple OS, SunSolaris és Linux operációs rendszerekhez. A kernel három fő területet fed le: 3D modellezés, 3D modellek menedzselése és 3D modellek megjelenítése. A kernel saját fájlformátumának kiterjesztése .SAT.
- Parasolid: a Siemens PLM (korábban UGS) tulajdonában álló ShapeData által fejlesztett kernel. Hibrid 3D-s felület és testmodellezést valósít meg, a 2D-s elemkészlete minimális. A kernel saját fájlformátumának kiterjesztése .X_T.
- Granite: a PTC 3D-s felület és testmodellező kernelje Windows, SunSolaris és Linux operációs rendszerekhez. A kernel saját fájlformátumának kiterjesztése .G.

CAx rendszerek integrációjának első, legkevésbé integrált módja, amikor egy CAD rendszer egy adott funkciót ellátó külső programmal működik együtt. Az integráció ezen alacsony szintű megvalósítása tipikus volt a 70-es, 80-as években. Ekkor a CAD rendszer átadja egy kommunikációs modulon keresztül a CAD adatokat a külön futtatott programnak, amely elvégezte a szükséges feladatokat, majd az adatokat visszaadta a CAD rendszernek, mely megjelenítette azt. A korai végeelem rendszerek általában így működtek.

Az integráció magasabb szintjét jelenti, ha az adott funkciót még mindig egy külső független program végzi el, de ennek elindítása már a CAD rendszerből történik automatikus adatátadással, vagyis a CAD adat konverziójával, mentésével, majd beolvasásával nem kell a felhasználónak foglalkoznia.

A teljes integrációt a szakmodulok megjelenése jelenti, mely esetben az adott integrált CAD rendszeren belül indítjuk az adott speciális funkciót, a CAD rendszer megszokott kezelőfelületét és struktúráját használva végezzük el a feladatot. Tulajdonképpen semmi nem utal arra, hogy elhagytuk a CAD rendszert. A szakmodulok nem részei az alap CAD rendszernek, a felmerülő speciális igények esetén bővíthetjük CAD rendszerünket.

A szakmodulok kétféle módon készülhetnek:

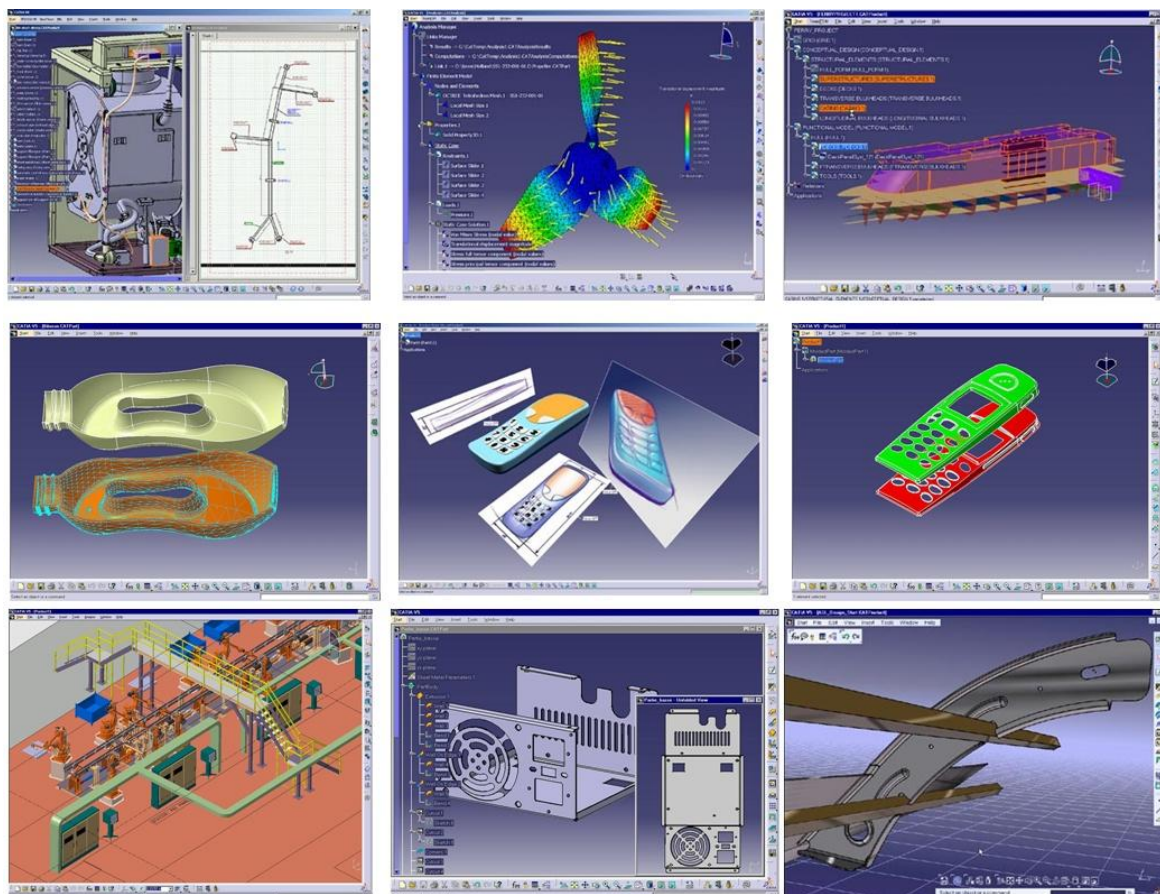
- a felhasználói igények alapján belső fejlesztésként jönnek létre, vagy
- egy létező szoftver megvásárlásával és teljes integrációjával.

Gyakori, hogy egy nagy felhasználó (pl. autó- vagy repülőgép tervezéssel foglalkozó vállalat) speciális igényét kielégítő egyedi kiegészítő alkalmazásból jön létre az adott iparágban használható szakmodul.

A szakmodulok száma tulajdonképpen végtelen, a felhasználók igényei újabb és újabb modulok fejlesztését teszik szükségessé (13.4. ábra). A 13.1. táblázat a legismertebb szakmodulok listáját mutatja.

13.1. táblázat. CAD szakmodulok

konceptcionális tervező	öntészeti modul	cipő tervezés
formatervező	fröccsöntő szerszámtervező modul	elektronikus áramköri panelek megjelenítése
lemezalkatrész tervező modul	fémöntő szerszámtervező modul	ergonómiai elemzés
kábelezés modellezése	lemezalkatrész megmunkáló modul	repülőgép konstrukciós szakmodul
csővezeték modellezése	hegesztés tervező modul	autó konstrukciós szakmodul
kinematikai szimuláció	koordináta mérőgép adatait feldolgozó modul	
dinamikai szimuláció		
szilárdsági szimuláció		



13.4. ábra. Néhány szakmodul (CATIA v5)

A felsorolt szakmodulok egy-egy speciális feladat megoldására alkalmasak, azonban van néhány olyan általános célú modul, mely nem köthető ilyen feladatokhoz, többféle tervezési, fejlesztési feladat megoldása során is alkalmazható. Régebben ezen feladatokra külön szoftvereket alkalmaztak, azonban idővel az integráció lévén ezek beépültek CAD rendszerekbe.

Az integráció eredményeként a létrejövő dokumentum asszociatív az eredeti CAD modellekkel, vagyis azok változása esetén, az eredmények aktualizálhatók. Előny, hogy a CAD

rendszer megszokott felhasználói felületét használhatjuk és csak egy forgalmazóval kell kapcsolatot tartanunk terméktámogatás szempontjából. Hátránya ezen megoldásoknak, hogy a modulként megjelenő alkalmazás általában kisebb funkcionalitással rendelkezik, mint az önálló szoftver, lévén nem akar saját maga konkurensé lenni.

A fotórealisztikus megjelenítés tipikusan ebbe a körbe tartozik. Ezen rendszerekkel fotórealisztikus képet illetve animációt lehet készíteni a modellről, mellyel támogatjuk a termék marketingjét.

A mindennapi termékfejlesztés során nem csak szilárdságtani vagy kinematikai szimulációra lehet szükség, hanem a geometriát meghatározó mérnöki, geometriai számításokat is kell végezni. Ezen számítások határozzák meg a konstrukció geometriai méreteit. A 3D-s tervezés sokszorosára növeli a kezelendő paraméterek számát egy optimalizációs folyamatban. Az optimalizálás támogatására komplex matematikai megoldásokat is tartalmazó szakmodulok készültek, valamint külső programok (pl. Excel, MathCad) eredményei is kapcsolhatók a modellhez.

13.3. Adatsere CAx rendszerek között

CAD/CAM/CAE rendszerek között, a magas fokú integráció ellenére, gyakran szükség lehet adatok cseréjére. Az adatsere során a modellek lehetnek a CAD rendszerre jellemző eredeti, úgynevezett natív fájlformátumú (tehát például Pro/Engineer vagy a CATIA saját fájlformátuma), illetve semleges (neutrális) fájlformátumú. A semleges formátum arra utal, hogy a tervezőrendszer belső adatábrázolásától eltérő formátumról van szó.

Natív fájlformátumokat általában az azonos anyavállalathoz tartozó rendszerek olvassák gond nélkül (azonos kernel), illetve gyakori a külön modulként megvásárolható adatkonverziós modul. A natív fájlok olvasásának nyilvánvaló előnye, hogy nincs szükség külön adatmentésre, az információ tartalom nem sérül. Gyakran emlegetik előnyként, hogy az esetleges modell változások egyszerűbben végigvezethetők például egy CAM rendszer alkalmazása esetén, azonban, ha figyelembe vesszük, hogy a CAM munkafolyamat során a tervező kiegészíti a modellt, illetve más helyeken egyszerűsíti, tehát tovább építi a modellt, akkor az egyszerű modellcseréje módszere már nem tűnik olyan egyszerű eljárásnak.

Szabványos fájlformátumok használata mindig adatvesztéssel jár, viszont ezen fájlokat a különböző rendszerek képesek olvasni, illetve tovább feldolgozni.

Az adatvesztés három kérdéskört érint:

- *Parametrikusság elvesztése:* a szabványos fájlformátum használata esetén az egyes építő elemek nem módosíthatók a létrehozásukkor definiált paraméterekkel, ezen paramétereket nem tudjuk elérni.
- *Modellfa elvesztése:* a beolvasott modell története egyetlen import építőelemet tartalmaz, amely a teljes modell. Így elveszik a modell létrehozásának folyamata, nem látjuk, hogy milyen építőelemek alkotják az alkatrészt, azok hogyan követik egymást, hogyan épülnek egymásra. Ez a tulajdonság persze nem feltétlenül hátrány. Amennyiben az darabot technológizálásra küldünk tovább egy másik véghez, nem szeretnénk, ha látnák, hogyan hoztuk létre a modellt. A modellalkotás folyamata fontos vállalati tudás, szeretnénk bizalmasan kezelni. A modell geometriájának kikerülése nyilván elkerülhetetlen, azonban a létrehozás folyamatát védünk célszerű. Egy parametrikus modell alapján könnyedén létre tudjuk hozni a termék kisebb, vagy nagyobb verzióját, esetleg egy kicsit módosítva egy teljesen egyenértékű terméket, a szükséges hosszadalmas kreatív modellezési munka nélkül.
- *Geometriai hibák:* a beolvasott modell gyakran tartalmaz hibákat, melyek alapvető oka az objektumok készletének és ábrázolásának különbsége illetve a geometriai modul

számítási, modellábrázolási pontossága. A tipikus hibák közé tartozik a kontúr görbék nem metsződése (gyakran csak pár tizedred mm a különbség), hiányzó vagy túllógó felület darabok illetve duplikált felületek. A CAD rendszerek egy része tartalmaz parancsokat e modellhibák automatikus vagy manuális javítására. Ha ez nem sikerül, célszerű más formátummal dolgozni, illetve a mentés esetleges paraméterein változtatni.

A felsorolt hátrányok egy részének kiküszöbölésére fejlesztette ki a Siemens cég (Solid Edge, Unigraphics fejlesztő) a 2008-ban megjelent *szinkronmodellezési technológiát*, amely modelltörténet nélküli, alakelemeken alapuló, parametrikus modellezést tesz lehetővé. A szinkronmodellezés a Parasolid geometriai kernelre épül. Közvetlenül a modellel dolgozhatunk, a vázlat (sketch) nem vezeti a modellt, így módosításkor nincs újraszámolás. A technológia intelligenciájának köszönhetően idegen modellekkel is úgy lehet dolgozni, mintha az adott CAD rendszerben készült volna.

A leggyakrabban használt szabványos (neutrális) fájlformátumok a következők:

- DXF
- IGES (.igs)
- VDA/FS (.vda)
- STEP (.stp)
- STL

13.3.1. DXF formátum

A DXF (*Drawing Exchange Format*) formátumot az AutoCAD fejlesztő Autodesk alkotta meg CAD rendszerek közti adatcsere céljából, mint a neve is mutatja. 1982 decemberében megjelent AutoCAD 1.0 rendszerben már szerepelt, kezdetben csak ASCII, 1988-tól már bináris (binary dxf) formában is. A formátum alapvetően rajzi adatok, tehát 2D-s adatcserére alkalmas.

A DXF fájl felépítését tekintve egymást követő szekciók sorozata. Az információkat típus kód – érték adatpárok írják le, Az objektumok szekcióban pontok, egyenesek, körök, szövegek adhatók meg. Az elemi objektumokból összetett objektumok, a DXF elnevezés szerint blokkok is generálhatók, melyek azonosítókkal és beépítési koordinátákkal rendelkeznek. Ilyen blokkok lehetnek például a különböző kontúrok.

13.3.2. IGES formátum

Az IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*) formátum, melynek hivatalos neve *termék adatok digitális reprezentációja* (*Digital Representation for Communication of Product Definition Data*), 1980 januárjában publikálta az Amerikai Szabványügyi Hivatal (U.S. National Bureau of Standards, azonosító: ANSY Y14.26M).

Az IGES 1.0 és 2.0 a kor igényeinek megfelelően rajzi objektumok átvitelére voltak alkalmasak. A 4.0 változat már CSG testmodellek ábrázolását is lehetővé tette, az 5.0 változat az ábrázolható objektum készlet és a megbízhatóság terén jelentett előrelépést. A formátum alkalmas drótváz, szabad formájú felületek és testmodellek leírására, támogatja a gépészeti műszaki rajzok és az áramköri rajzok átvitelét is. A formátum megszületése az Amerikai Szabványügyi Hivatal, az Amerikai Védelmi Minisztérium és számos iparvállalat (pl. Boeing, General Electric, Xerox, Computervision, Applicon) együttműködésének köszönhető. A STEP formátum 1994-es szabványosítása után az IGES fejlesztése gyengült, az utolsó verziót 1996-ban publikálták (v 5.3).

Az IGES objektum központú, ami elsősorban a 70 évek filozófiáját tükrözi. Az objektumok típusát számkód jelzi 1-től 5000-ig számozva. Háromféle objektum csoport létezik: geometriai, annotációs és struktúra objektumok. Ezek fontosabb elemei a következők:

Geometriai objektumok

Görbék

100	körív
102	összetett görbe
110	egyenes
112	parametrikus szplájn
126	racionális B-szplájn

Felületek

108	sík
114	paraméteres szplájn
118	vonalfelület
120	forgásfelület
128	racionális B-szplájn
144	trimmelt paraméteres vonalfelület

Testek

150	téglatest
154	henger
156	kúp
158	gömb
160	tórusz
161	tömör forgástest
502	csomópont
504	él
508	élhurok
510	lap
514	héj

Egyéb

124	transzformációs mártix
132	kapcsolódási pont
136	véges elem

Annotációs objektumok

202	szöveg
206	átmérő
216	hosszméret
220	ponthoz tartozó méret
222	sugár méret
230	metszett terület

Struktúra objektumok

302	asszociativitás definíció
310	szöveg betűtípus definíció
314	szín definíció
404	rajz
410	méret
412	négyszög alakú csoport
414	kör alakú csoport

Az IGES fájl ASCII karakterekből áll, 80 karakter hosszú sorokat tartalmaz.

A fájl öt szekcióból áll (S, G, D, P, T).

Az *S* – *Start* szekció a felhasználó számára tartalmaz általános jellegű információkat, például a fájl nevét, a szabvány nem írja elő ennek tartalmát.

A *G* – *Global* szekció a fájl feldolgozásához szükséges paramétereket tartalmazza úgynevezett „Hollerich” formátumban szerepelnek, ahol egy szám jelöli a karakterek számát, majd egy *H* karakter után szerepel az adat, mint például a létrehozó rendszer neve, verziószáma, a modellter mérete, mértékegység, a minimális felbontás stb.

Az objektumok a *D* – *Directory entry* és a *P* – *Parameter data* szekciók tartalmazzák. Ezen szekciók kétirányú kapcsolatban vannak egymással. A *D* szekció a leírt objektumokat sorolja fel és azok néhány attribútumát, típusát, altípusát és mutatót a *P* szekcióra, amely az objektum adatait írja le.

A *T* – *Terminate* szekció az előző szekciókban elhelyezett rekordok számát adja meg, biztosítva ezzel az adatátvitel ellenőrzését.

13.3.3. VDA/FS

Az IGES korai verzióinak hiányosságait kiküszöbölendő a szabad formájú felületek átvitelére német fejlesztők létrehozták az elsősorban autóiipari alkalmazásokhoz kidolgozott VDA/FS formátumot, amely később német szabvánnyá vált (DIN 66301). A formátum geometriai és topológiai információk átvitelére egyaránt alkalmas. A formátum használata elsősorban a német autóiiparban és az azzal kapcsolatban álló kiszolgáló vállalatoknál elterjedt. A formátum ASCII formájú, 80 karakter széles sorokból áll, a kezdő szekció tartalmazza a fontosabb technikai adatokat (modell neve, verzió szám, dátum, készítő stb.), majd a geometriai adatok következnek.

13.3.4. STEP formátum

A STEP formátum hivatalos neve ISO 10303 *Szabvány termék modell adatok cseréjére* (Standard for the Exchange of Product model data), célja pedig a termék gyártási információinak számítógépes reprezentációja. A formátum tehát nem csak geometriai információk leírását célozza, hanem a termék életciklusához kapcsolódó *minden* információ tárolható. A formátum fejlesztője az ISO 184-es bizottság 4-es albizottsága (TC 184/SC 4). A fejlesztés 1984-ben kezdődött, 1995-ben került publikálásra az első verzió, amely tartalmazta a 3D-s modellek leírását. A 2002-ben záródó második szakaszban kiterjesztették a leírást több speciális ipari területre (repülőgép ipar, autóiipar, elektronikai ipar stb.) figyelembe véve azok speciális igényeit. A számos speciális alkalmazás nagyon szerteágazóvá, átláthatatlanná, redundánssá és az ISO legterjedelmesebb szabványává tette a STEP-et. A modulok harmonizációja és egységesítése jelenti jelenleg a legnagyobb feladatot.

A STEP az Express modellezési nyelvet használja.

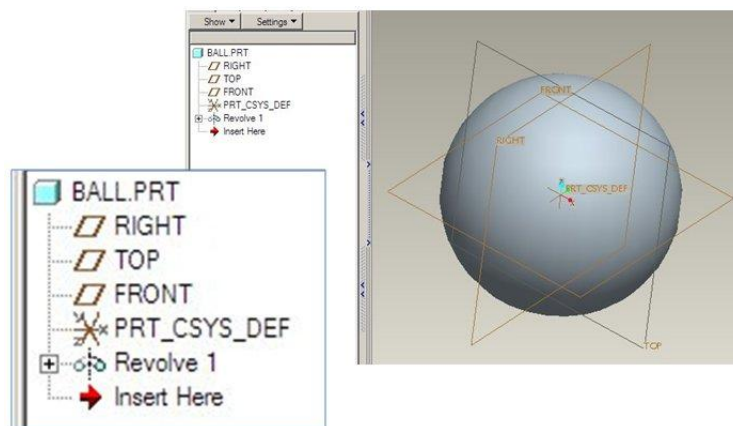
13.3.5. STL formátum

Az STL formátumot a 3D Systems nevű cég fejlesztette a sztereolotográfiai gyors prototípus rendszeréhez (lásd 15. fejezet), azonban idővel CAM rendszerek és analízis szoftverek is átvették. Az STL fájl csak a 3D modell geometriáját írja le a szín, a textúra vagy egyéb tulajdonság nem vihető át. Létezik ASCII és bináris változata is, melyek közül a kisebb fájl méret okán a bináris népszerűbb.

Az STL megadható méretű háromszögekre osztva definiálja a 3D geometriát, megadva a felületi normálist és a háromszög csúcsait derékszögű koordinátarendszerben.

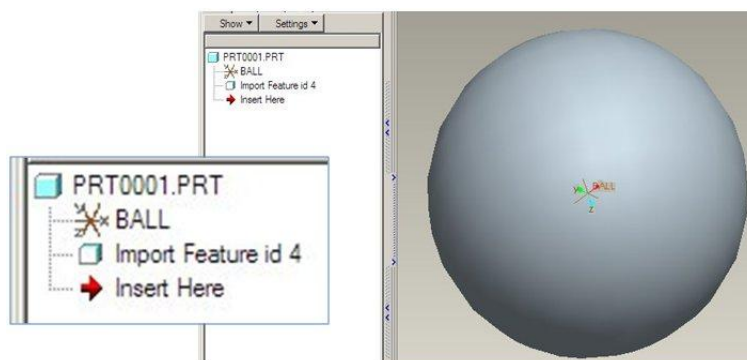
Az STL fájl nem módosítható, a legtöbb CAD rendszerben még a felületek sem másolhatók le, így igen alkalmas prezentációra a geometria kiszivárogtatásának veszélye nélkül.

Az 13.5. ábra egy 50 mm átmérőjű gömböt mutat. A modell Pro/Engineer WF4 rendszerben készült. A bal oldali modellfán jól látható a három koordináta sík, a koordináta rendszer és az egyetlen építő elem, ami egy forgatás.



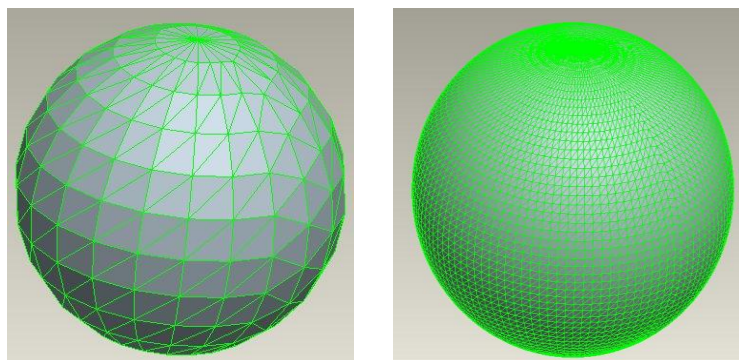
13.5. ábra. Gömb CAD modellje Pro/Engineer WF4 rendszerben

A 13.6. ábra ugyan ezt a modellt mutatja miután elmentettük IGES formátumba és visszaolvastuk. A különbséget a modellfa mutatja, ahol eltűntek a koordináta síkok, és az egyetlen építőelem egy import geometria. Tetszőlegesen bonyolult modell esetén is csak ennyiből állna a modellfa.



13.6. ábra. A gömb visszaolvasott IGES modellje

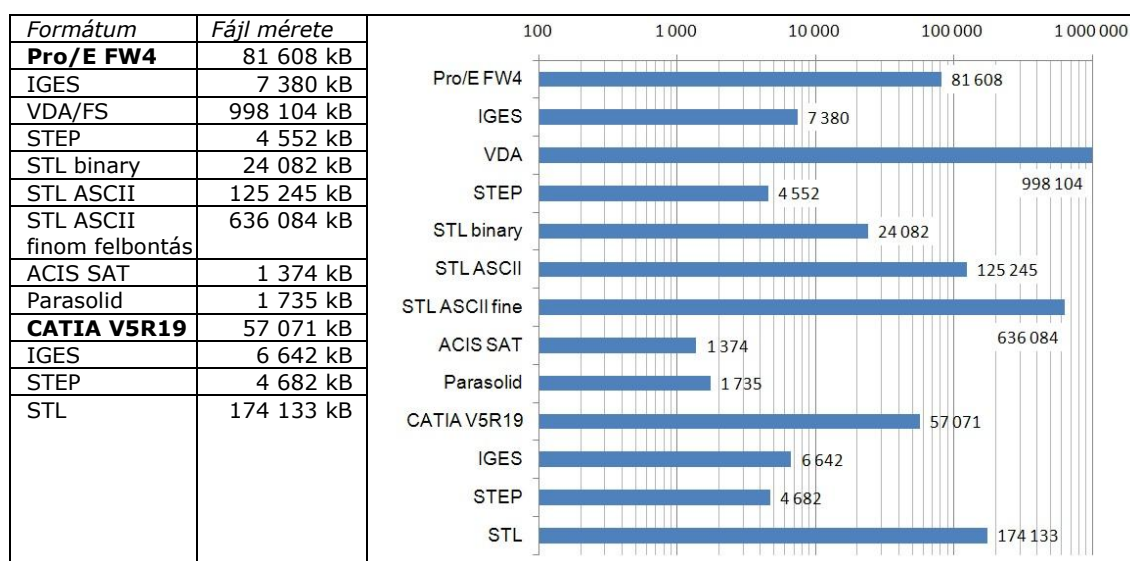
A 13.7. ábra a gömb STL formátumú modelljét mutatja, ahol jól látszanak a felületet alkotó háromszögek, melyek a jobb láthatóság miatt nagy méretűre lettek állítva. A méretük csökkentésével a modell felbontása finomítható, az alakhűsége javítható, a fájl mérete viszont nő.



13.7. ábra. STL modell különféle felbontásban

A VDA/FS mérete kiugróan nagy, a többi fájl mérete közel azonos, vagy kisebb, mint az eredeti, natív Pro/E fájl mérete. A legkisebb mérete a két kernel fájlnak van. 13.2. ábra a gömb modelljének méretét mutatja, különféle fájlformátumok esetén. A VDA/FS mérete kiugróan nagy, a többi fájl mérete közel azonos, vagy kisebb, mint az eredeti, natív Pro/E fájl mérete. A legkisebb mérete a két kernel fájlnak van. CATIA V5R19 CAD rendszerben elkészítve ugyan ezt a modellt a natív fájl méret kisebb, az IGES szintén kisebb, azonban a STEP minimálisan nagyobb méretű fájlt eredményezett.

13.2. táblázat. Fájl méret a formátum függvényében

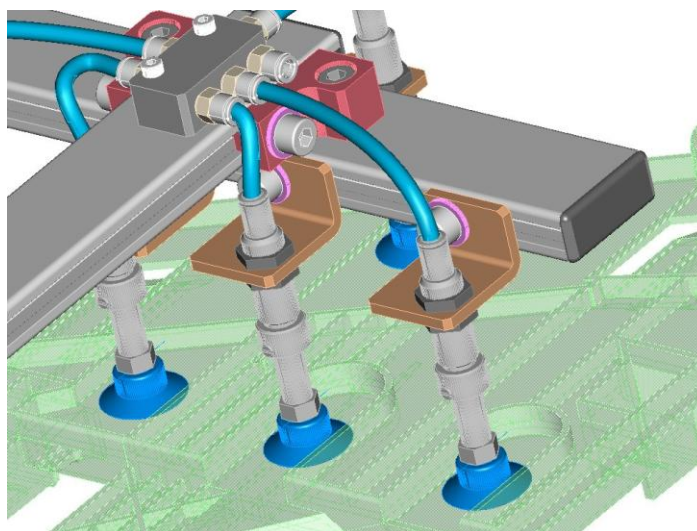


13.4. CAD elemtárak

A konstrukciós tervezés során törekednünk kell a saját tervezésű, egyedi alkatrészek számának minimalizálására. Ennek célja egyrészt a tervezési folyamat hatékonyságának növelése, másrészt a gyártási, szerelési folyamat racionalizálása. Az újra felhasznált komponensek lehetnek szabványos elemek, például kötőelemek, vagy kereskedelmi részegységek, melyek köre igen széles: csapágycsuklók, vezetékek, motorok, hidraulikus- pneumatikus elemek, profilok, ipari robotok stb.

A modellezési folyamat hatékonysága jelentősen növelhető, ha ezen kereskedelmi elemeket nem kell újra lemodellezni, hanem kész részmodellként építhetjük be az összeállításunkba.

A 13.8. ábra 90%-ban katalógus elemekből összeállított pneumatikus robotmegfogó CAD modelljének részletét mutatja.



13.8. ábra. Katalógus elemekből épített vákuumos robotmegfogó

A kivitelezést tekintve több megoldás is létezik. Az első elemkönyvtárakat a CAD rendszereket fejlesztő cégek hozták létre a rendszer moduljaként plusz szolgáltatást nyújtva. Ezen elemkönyvtárak szabványos, gyakran használt elemeket tartalmaztak, melyek beszerzése nem köthető egy adott vállalathoz. Az ilyen elemtárak használata egyszerű, általában bővíthető a felhasználó által, de az elemkészlet szűk.

A különböző gépészeti alkatrészeket, részegységeket gyártó cégek felismerték a piaci lehetőséget, hogy amennyiben a tervezés során kész CAD modellekkel támogatják, és ezzel egyszerűsítik és gyorsítják a tervezési folyamatot, ennek hatás megjelenik a növekvő értékesítési mutatóikban. Így egyre több cég teszi hozzáférhetővé termékeinek CAD modelljét. Ennek több formája alakult ki.

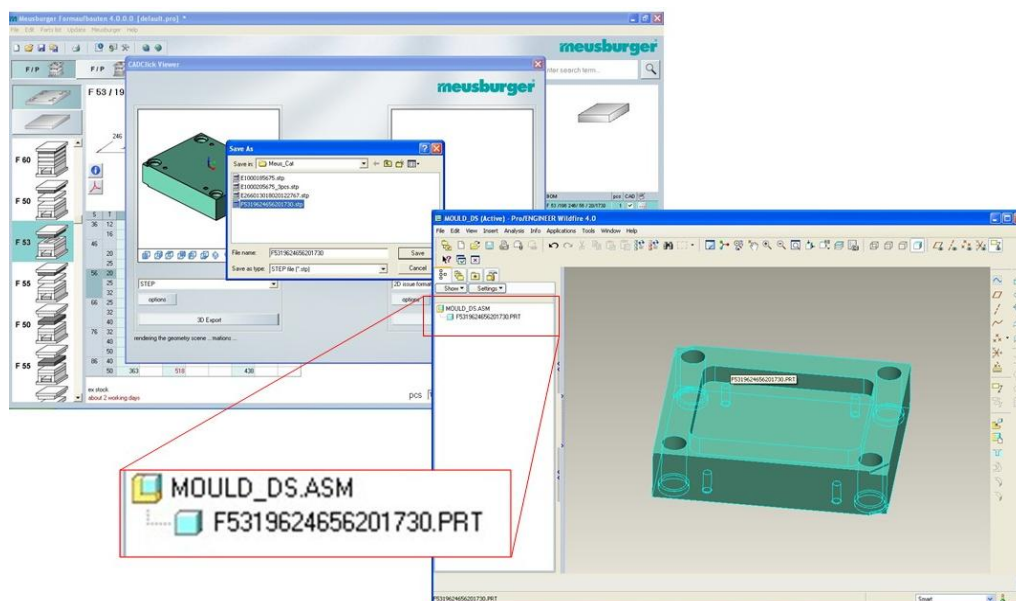
Kezdetben telepíthető katalógusokat fejlesztettek, melyek a papír alapú katalógusok digitális verziói voltak a CAD modellekkel kiegészítve. Később megjelentek a kiválasztást, méretezést segítő alkalmazások is, melyek tovább automatizálták a tervezés bizonyos fázisait. Ezen megoldás hátránya, hogy el kell juttatni a telepítő csomagot a felhasználóhoz, a termékpaletta változásának követése nehézkes, a telepített állományok helyet foglalnak. A telepített programok vagy beépülnek a CAD rendszerben és közvetlen elérést biztosítanak a katalógus elemeihez, vagy külön futtathatók.

A felmerülő hátrányok kiküszöbölésére fejlesztették ki az internet alapú on-line katalógusokat, melynek természetesen előfeltétele volt a széles sávú internet kapcsolat elterjedése. Ebben az esetben a katalógus frissítése nem okoz gondot, bárki hozzáférhet, aki rátalál a cég honlapjára, nem foglal helyet a felhasználó gépén, viszont hálózati kapcsolat nélkül nem elérhető. Az ilyen rendszerek gyakran tartalmaznak rendelési lehetőséget is.

Amennyiben keresünk valamilyen alkatrészt, de nem tudjuk, milyen cég gyártja, vagy nincs állandó beszállítónk, akkor a CAD elem portálok nyújthatnak segítséget, ahol közös felületen kereshetünk különböző cégek termékei között.

A fenti megoldások esetén nem parametrikus modelleket tölthetünk le CAD rendszer specifikus natív vagy többféle szabványos formátumban, azonban ezek a modellek a legkritikább esetben parametrikusak. Tehát egy csavar hosszának változása esetén egy új modellt kell letöltenünk és beillesztenünk a konstrukcióba, ami okozhat problémát.

A letölthető modellek részletessége a beépítés követelményeivel összhangba lett kialakítva. Egy pneumatikus útszelep esetén például a befoglaló méretek, a rögzítési pontok, a csatlakozások helye és mérete a fontos, de a belső kialakítás nem.



13.9. ábra. Szerszámlap letöltése a Meusburger szerszámelem katalógusból és a beolvasott katalógus elem

A 13.9. ábra a Meusburger cég szerszámelem katalógusát mutatja, amely mind telepíthető, mind on-line változatban létezik. A katalógusból kiválasztott elem letöltése után egy CAD rendszerbe beolvasva jól látható, hogy az egyébként elég komplex geometriájú alkatrész egyetlen CAD építőelemből áll, mely nem parametrikus. A katalógus lehetőséget ad arra is, hogy egy már kiválasztott elemhez kapcsolódó további alkatrészek körét szűkítse, például csak a már kiválasztott szerszámlap vastagságához és furataihoz és illő vezetőoszlopokat tudunk választani.

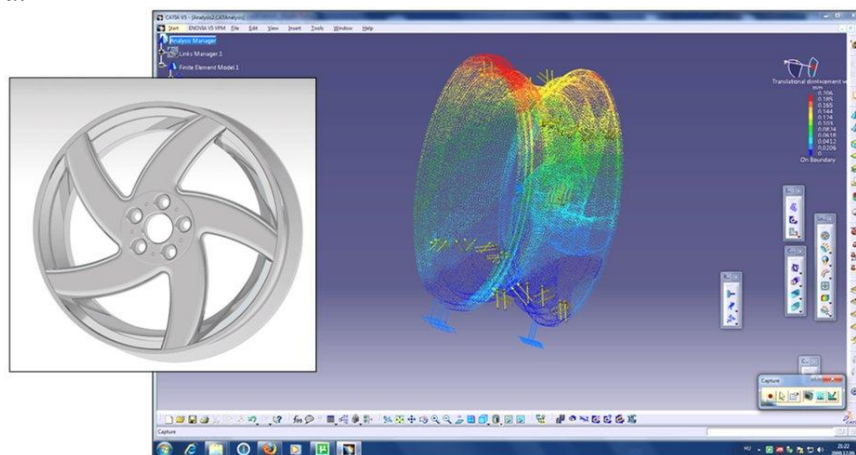
13.5. Digitális prototípus (digital mockup)

A CAx rendszerek integrációjának egyik fontos és dinamikusan fejlődő alkalmazása a digitális prototípusok létrehozása. Digitális prototípusnak (*Digital Mock-up, DMU*) a geometriai prototípusok és a funkcionális prototípusok fizikailag meg nem valósuló formáit nevezzük. A digitális prototípus technológia a termékfejlesztés során keletkezett adatokat egyetlen digitális modellbe tömöríti. Ez az önálló digitális modell testesíti meg a terméket, annak minden tulajdonságával, valamint lehetővé teszi a tervezőmérnökök számára, hogy élethűen megjelenítsék, kezelhessék, tesztelhessék, optimalizálhassák a modellt, még mielőtt fizikai prototípust gyártanának.

A digitális prototípus a termék digitális szimulációja, amely az alak, az alkalmasság és a funkció tesztelésére egyaránt alkalmazható. A digitális prototípus a koncepcionális, gépészeti és elektronikai adatok összekapcsolásával egyre összetettebbé válik. A kész digitális prototípus a végtermék valódi fizikai szimulációja és a költséges fizikai prototípusok legyártásának csökkentése céljából a termék virtuális minősítésére, optimalizálására és elfogadására (validálására) használható.

A digitális prototípus a valós termék számítógépes definíciója, mely tartalmaz minden az-zal kapcsolatos dokumentumot, jellemzőt és struktúrát [5]. A DMU a termékmodellnek azon egyértelműen meghatározott adathalmaz, amely leírja a valós terméket. A termékmodell alatt értjük mindazon információkat, melyek a termékfejlesztés során keletkeznek. A DMU egy olyan adatkészlet, mely lehetővé teszi a termék funkcionális tesztelését vagy ellenőrzését.

A digitális prototípus előállítása alkalmas arra, hogy a tervező és gyártó részlegeknek arra, hogy a komplett gyártmányt még azelőtt virtuálisan felülvizsgálják, mielőtt azt fizikai valóságban legyártanák. A digitális prototípus előállításával a gyártók az ötlet megfogalmazásától kezdve a gyártással bezárólag a tervek előállítására, érvényesítésére, optimalizálására és kezelésére kapnak olyan kedvező terepet, ahol az érintett részlegek között a kommunikáció magasabb szinten valósul meg és ennek eredményeként a jóval innovatívabb termékek is gyorsabban dobhatók piacra.



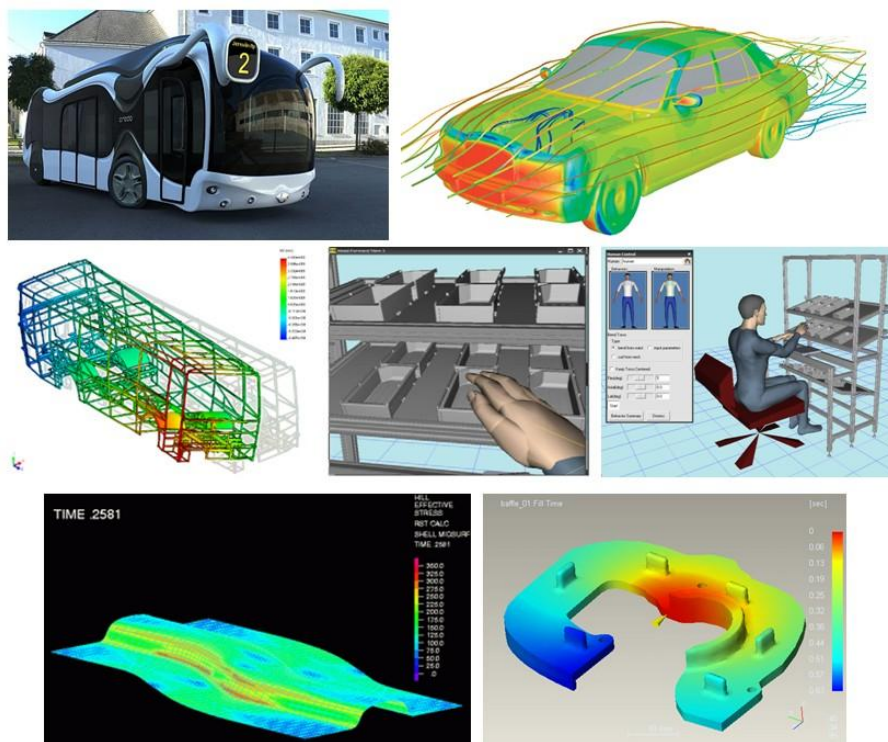
13.10. ábra. Gépkocsi keréktárcsa szilárdsági végelem modellje (CATIA v5)

A digitális prototípusok általi fejlesztés nagy előnye, hogy a fejlesztők megtekinthetik munkájuk eredményét fizikai prototípus létrehozása nélkül is. Mindezen feladatok elvégzéséhez szükség van olyan digitális prototípusra, mely a komplett munkafolyamatot végigkíséri a koncepcionális tervezéstől a szériagyártásig [4]. Ez látszólag ellentmond a prototípus definíciójának, hiszen a koncepcionális tervezést nem kíséri végig olyan modell (a VDID szerint), amely geometriai pontossága és funkcióhordozása révén digitális prototípusnak minősül. Ellentmondásnak tűnhet továbbá az is, hogy a látványterv (élethű megjelenítés), mint stílusmodell szintén nem tekinthető prototípus értékűnek. Figyelembe kell vennünk azonban azt a tényt, hogy amennyiben a funkcionális tervezést, a tervezés során létrejövő termékváltozatokat azonnal modellterben definiáljuk, úgy egyből meghatározott geometriával rendelkező modellt kapunk, amely már prototípus. Az ilyen módon, pusztán ötletgyűjtés során létrehozott, ám meghatározott geometriával rendelkező modell persze a virtuális tesztek során vagy elbukik, vagy része lesz a fejlesztési folyamatnak. A látványterv is készülhet (és készül is) már kidolgozott tesztelés alatt álló, vagy gyártás előtt álló modell alapján. Amennyiben a termékfejlesztésre, mint műszaki és gazdasági tevékenységre tekintünk, úgy a látványtervnek van funkciója a termékfejlesztési folyamatban, tesztelhető általa a piaci környezet reakciója, a termék várható profitabilitása.

A digitális prototípus használata a gépészeti tervezés fokozott minőségi követelményei és az átfutási idő valamint költségek csökkentése miatt szükséges. A termék fejlesztési fázisában nagymértékben csökkenteni kell a termék koncepciójának kidolgozásától a piacra kerülésig eltelt időt, amely a fizikai prototípus kiiktatásával illetve számának csökkentésével érhető el. A fejlesztés során alkalmazkodni kell a korlátozott anyagi erőforrásokhoz, valamint már a

tervezés során hatékonyan kell támogatni a gyártási és értékesítési folyamatokat is. A digitális prototípus mára olyan haladó ipari gyakorlattá vált, amely lehetővé teszi a termék teljes digitális értékelését, széleskörű lehetőséget ad az együttműködésre, segíti a hibakeresést és a hibák korai kiküszöbölését.

A digitális 3D-s prototípus magában foglalja a 3D-s alkatrész modelleket illetve minden olyan adatot, amely lehetővé teszi a különböző elemzéseket. Ezek az elemzések lehetnek virtuális tesztek (pl. különböző végelem analízisek, ergonómiai elemzések) illetve fotórealisztikus képgenerálási folyamatok.



13.11. ábra. Példák digitális prototípus alkalmazására (Valósághű megjelenítés (fotó: E-Bone), áramlástani szimuláció, szilárdsági végelem analízis, ergonómiai vizsgálat, képlékeny alakítás szimuláció, fröccsöntés szimuláció)

A felülről lefelé (top-down) tervezési elv különösen alkalmas a digitális prototípusok alkalmazására. Első lépésként a papír alapú vázlatok vagy fizikai modellek helyett (pl. agyag vagy gipsz modell) digitális koncepcionális modelleket kell létrehozni, alkalmazni. A számítógépes koncepcionális modellek kiküszöbölik a fizikai koncepciók időigényes módosítását, valamint a kész fizikai modellek digitalizálását, amely alapjául szolgál a későbbi részletes 3D CAD modellezéshez.

A digitális prototípus olyan, mint egy rendkívül részletes CAD modell, amely képes helyettesíteni a fizikai prototípust, mivel tartalmaz minden olyan geometriai, topológiai, anyag adatot, amely szükséges a virtuális tesztek végrehajtásához. Így minden geometriai részletnek, minden alkatrésznek (kötőelemek, beszállított részegységek) és minden anyag adatnak (anyagtulajdonságok, színek, felület stb.) szerepelnie kell a 3D-s CAD modellben. Egy közös forrás használatával könnyebb elkerülni az adatátviteli problémákat. A digitális prototípus

hatékonyan támogatja a szimultán tervezést is, mivel a digitális prototípus különböző példányain egy időben végezhető el különböző vizsgálatok.

A digitális prototípus célja tehát a fizikai prototípus helyettesítése számítógépes modellel, melyen különböző tesztek, vizsgálatok hajthatók végre. Sokféle szimuláció hajtható végre ezen modelleken, mint például statikus és dinamikus végelelemes szimulációk, folyadékdinamika alapú szimuláció, formatervezett felületek reflexió analízise, ergonómiai tesztek. Ezen tesztek eredményeinek alapján a modell módosítható, a módosítás hatása újabb tesztekkel ellenőrizhető. A szimulációk áthelyezése a valóságból a virtuális tervezési területre jelentősen csökkenti a fejlesztési időt és költséget.

A szimulációk azon típusai, amelyek nincsenek közvetlen hatással a tervezés menetére, mint például a fotórealisztikus megjelenítés, hatékonyan támogatja a marketing tevékenységet, szükségtelessé teszik a hagyományos fényképészeti munkát.

Egy ilyen részletességű digitális prototípus létrehozásához az informatikai eszközöknek számos funkciót el kell látniuk. Ezen szoftveres háttér az integrált tervezőrendszerek képében áll a tervezőmérnökök rendelkezésére. Az ilyen rendszereknek mindenképp tartalmazniuk kell:

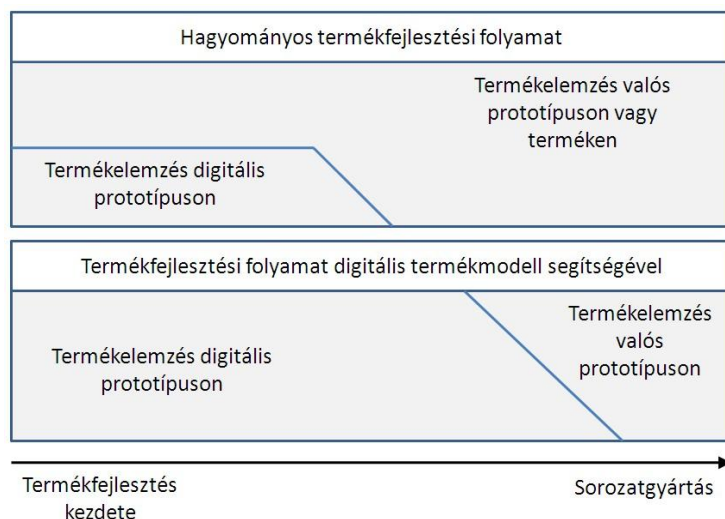
- 3D-s parametrikus felület és szilárdtest modellezőt a gépészeti tervezéshez, ellenőrzéshez, dokumentáláshoz,
- a szilárdtest modell valósághű megjelenítését lehetővé tevő alkalmazást segítve ezzel a döntéshozók munkáját,
- PDM adatmenedzsment eszközöket.

Ezek közül a funkciók közül kiemelten fontos a modellezők szerepe, melyeknek nem kizárólag a felület és testgenerálási, módosítási eljárások lehetővé tétele a célja, hanem a már létrehozott szilárdtest modell értékelésének, tesztelésének, szimulációknak az elvégzése is. Ilyen kiemelten fontos, a modellezőtől elvárt képességek például a véges elemes analízis (Finite Element Method - FEM) és a hidrodinamikai és aerodinamikai szimulációk (Computational Fluid Dynamics - CFD).

A legelterjedtebb szimulációk, mely egy digitális prototípuson végrehajthatók:

- fotórealisztikus megjelenítés,
- mozgás analízis
- ütközés vizsgálat
- tűrés analízis,
- statikus szilárdságtani végelelem analízis (feszültség, elmozdulás),
- dinamikus szilárdságtani végelelem analízis,
- áramlástan végelelem analízis,
- mágneses végelelem analízis,
- hőtan végelelem analízis,
- ergonómiai analízis (hozzáférés, láthatóság),
- gyárthatósági elemzés, gyártáshelyesség vizsgálata,
- szerelészahelyesség vizsgálata,
- képlékeny alakítási technológiai szimuláció,
- fröccsöntés analízis,
- virtuális törésteszt (járműipar).

Az előbb említett tesztelési és ellenőrzési funkciók nem tartoznak a DMU fogalmába. A DMU nem egy termék-kiértékelést, ellenőrzést vagy tesztelést segítő szoftverrendszer, hanem tartalmazza a hasonló kiértékeléseket lehetővé tévő szoftverek számára szükséges információt. A digitális prototípus használatának tehát nem kizárólag az információátvitel megkönnyítése a célja, hanem az is, hogy lehetővé tegye a termék jellemzőinek ellenőrzését, elemzését a termékfejlesztési folyamat korai fázisaiban, virtuális prototípus segítségével.



13.12. ábra Termékelemzés a DMU adatai alapján [5]

Ilyen módon egyes esetekben elkerülhető az, hogy bizonyos értékeléseket kizárólag a valós prototípus legyártása után tudjunk elvégezni. Ma azonban még nem lehetséges az, hogy a termék értékelését legnagyobb mértékben kizárólag a DMU adatainak elemzésével végezzük, sok esetben szükséges egy fizikailag is létező prototípus legyártása. Reményeink szerint ez a jövőben változni fog, hiszen a virtuális prototípusok elemzésével kapott eredmények visszacsatolása a termékfejlesztési részfolyamatok végén fontos eleme a modern fejlesztési folyamatnak. A 13.12. ábra mutatja a termék funkcionális elemzéseinek megoszlását a termékfejlesztés kezdetétől a sorozatgyártásig aszerint, hogy valós, ténylegesen elkészített darabon vagy virtuális prototípuson végezzük azokat [5]. Az ábrán láthatjuk azt is, hogy ezen elemzések és szimulációk lehető legnagyobb részének elvégzését a jövőben virtuális prototípusok segítségével kívánjuk elvégezni.

13.6. Irodalom

- [1] Horváth Imre – Juhász Imre: Számítógéppel segített gépészeti tervezés 1.; Műszaki Könyvkiadó Budapest 1996.
- [2] Váradi Károly – Horváth Imre: Gépészeti tervezést támogató technológiák; Műegyetemi Kiadó, Budapest 2008.
- [3] Horváth László: Bevezetés a számítógépes gépészeti és technológiai tervezésbe; Bánki Donát Gépipari Műszaki Főiskola HS27, Budapest 1995.
- [4] Digitális prototípus gyártás az Autodesk Inventorral; MCAD Magazin, 2009. szeptember, I. évf. 3. szám
- [5] Dölner, Germot – Kelner, Peter: Digital mock-up and rapid prototyping in automotive product development; J. of Integrated Design and Process Science, 2000/3. p.55-66.

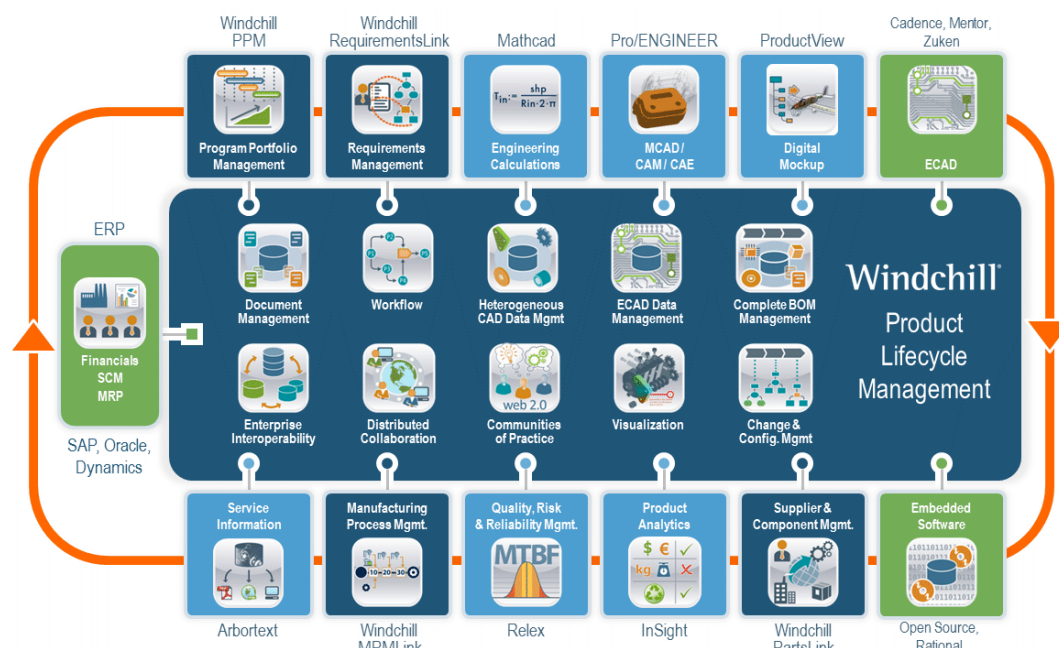
14. TERMÉKÉLETÚT KEZELÉS, A PLM. TERMÉKADAT MENEDZSMENT, A PDM

**Szerző:
Piros Attila**

Napjaink mérnöki tevékenysége már nemcsak a termékek megtervezésére, a kapcsolódó számítógépes modellek megalkotására, illetve a szükséges gyártási dokumentáció elkészítésére irányul; hanem ezeknél a tevékenységeknél jóval átfogóbb jellegű, térben és időben is kiterjedtebb feladatokat is magában foglal. Mindezen feladatokat általában más mérnökökkel összehangolva, sok esetben globális méretű tervezői csoportokban kell megoldani. A tervezési folyamatok számítógépes támogatása csaknem teljes körűnek mondható, de ez nemcsak nyilvánvaló előnyökkel, hanem az exponenciálisan növekvő elektronikus adatmennyiség miatt konkrét hátrányokkal is jár. Emellett a tervezési feladatok komplexitását tovább növeli, hogy a tervezőmérnöknek egyre több esetben a szorosan vett tervezési feladatokon felül más munkákat is el kell végeznie. A következő kihívásokkal kell szembenézni a tervezési folyamat végrehajtásakor:

- ◆ az elektronikusan generált adatok tömegének áttekintése, kezelése;
- ◆ a termékadatok teljes körű kezelése, az adatok változásainak követése;
- ◆ a térben és időben is kiterjedt csoportmunka támogatása;
- ◆ a tervezéshez kapcsolódó egyéb tevékenységek, folyamatok kezelése.

Ezeket a térben és időben is kiterjedt tevékenységeket csak komoly technikai háttér megléte mellett, adatbázis kezelésen alapuló háttérrendszerek segítségével lehet végrehajtani. Azon rendszereket, melyek szorosan csak a termékadatok kezelésével foglalkoznak **PDM rendszereknek**; míg az ennél általánosabb célú felhasználásra, a termékek teljes életútjának a kezelésére is képes rendszereket **PLM rendszereknek** nevezzük. Az általános célú PLM rendszerek felépítésére a nagymértékű modularitás a jellemző. Egy ilyen PLM rendszer a maga napjaink komplett tervezői környezetének (14.1. ábra).



14.1. ábra. Moduláris PLM rendszerre épülő komplett tervezői környezet

14.1. Konkurens tervezés

14.1.1. Párhuzamosítási lehetőségek a tervezési folyamatokban

A különböző tervezés támogató háttérrendszerek konkrét ismertetése előtt célszerű áttekinteni az ezen rendszereket létrehozó körülményeket, ezek között is elsődlegesen a konkurens tervezés témakörét.

A **Konkurens Mérnöki Tevékenység (Concurrent Engineering** vagy **Simultaneous Engineering)** a termék párhuzamos, integrált tervezésének, gyártás folyamatainak valamint az egyéb támogató folyamatok módszeres megközelítése. Ez a megközelítés arra inspirálja a fejlesztőket, hogy a termék életciklusának minden fázisában figyelembe vegyék (kezdve a koncepcionálástól egészen a kiszállításig), a minőségbiztosítást, az ütemezést, és a felhasználói követelmények elemzését is.

A konkurens tervezés a gyakorlatban a tervezés logikai és időbeli párhuzamosítását jelenti. A **logikai párhuzamosítás** alatt a különböző tervezési részfolyamatok lehetőség szerinti párhuzamos végrehajtását kell érteni. Az **időbeli párhuzamosítás** a rendelkezésre álló erőforrások koncentrált, egy időben történő felhasználását kell érteni. Habár ez a párhuzamosításon alapuló feladat-végrehajtás külön kihívás elé állítja a háttérrendszereket, mégis olyan kimutatható és számottevő előnyökkel jár, amiatt a konkurens tervezés napjainkban széleskörűen elterjedté vált. Az Institute for Defense Analyses intézet szerint ilyen előnyök lehetnek a következők:

- ◆ 30% - 70% -al rövidebb fejlesztési időtartam;
- ◆ 65% - 90% -al ritkábban szükséges utólagos tervezési változtatás;
- ◆ 20% - 90% -al rövidebb piacrekerülési idő;
- ◆ 200% - 600% -al magasabb minőség;
- ◆ 20% - 110% -al magasabb mérnöki produktivitás.

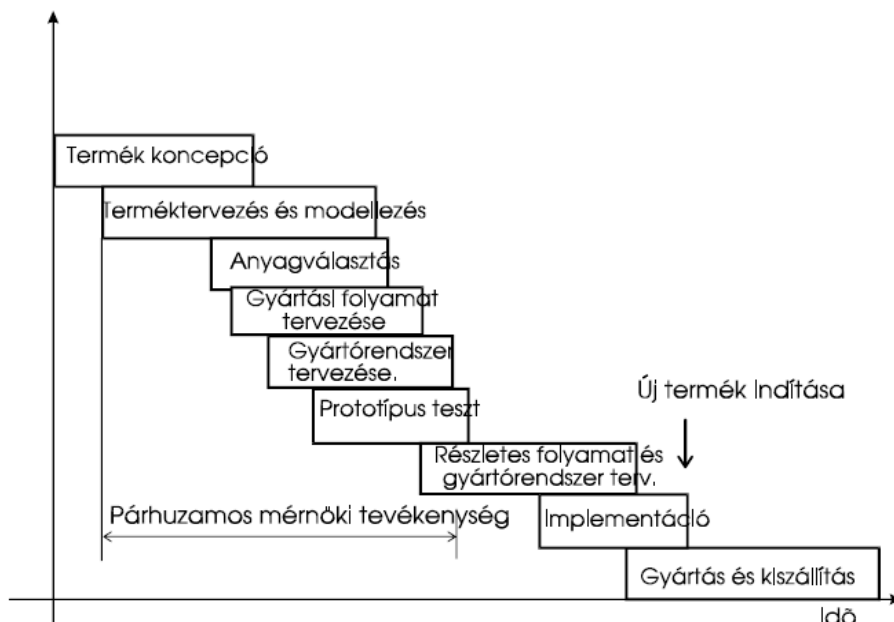
A konkurens tervezés támogatása a következő funkciók megvalósítását követeli meg az informatikai oldalt tekintve:

- ◆ adatok különböző földrajzi helyekről történő szimultán elérése;
- ◆ az adatok szimultán elérése közben az adatváltozások nyomon követése;
- ◆ átfogó, mindenre kiterjedő jogosultságrendszer használata az adatok elérésekor;
- ◆ különböző kapcsolódó folyamatok kezelése kiemelve a változáskezelő folyamatokat.

Könnyen belátható, hogy ezeket a feltételeket, csak korszerű, adatbázis kezelésre épülő informatikai rendszerekkel lehet biztosítani. Ezen felül meg kell említeni, hogy a tervezési folyamatok párhuzamos megoldása nem lenne lehetséges napjaink kifinomult, asszociatív CAD rendszerei nélkül. Például egy tipikus konkurens feladat-végrehajtás az, amikor a tervezőmérnök a formatervezés lezárulása előtt már elkezd elkészíteni a 3D-s testmodellt; valamint ennek a fázisnak a lezárása előtt elkezd készülni a termék dokumentációja; esetleg még a dokumentáció befejezése előtt elkezdik a gyártásra szolgáló eszközök, szerszámok tervezését. Ezeket a folyamatokat csak nagymértékben **integrált és teljesen asszociatív CAD rendszerek** megléte esetén lehet ilyen formában végrehajtani, hiszen csak a **kétirányú asszociáció** tudja biztosítani a különböző tervezési fázisokban történő változások tökéletes átvitelét folyamatok között. Jelleget tekintve a **Top-Down tervezési folyamat** illeszkedik legjobban a konkurens tervezés megvalósításába.

14.1.2. Konkurens folyamatok bemutatása

A konkurens folyamatok relatív elhelyezkedése a termék életciklusában valahol a termék koncepcionális tervezése és a termék gyártásához szükséges eszközök tervezése között található. Ez terméktípusoktól és tervezési folyamat implementációtól is függ, de általánosan a koncepcionális tervezés, részlettervezés valamint a gyártástervezés folyamatait lehet paralellizálni (14.2. ábra).



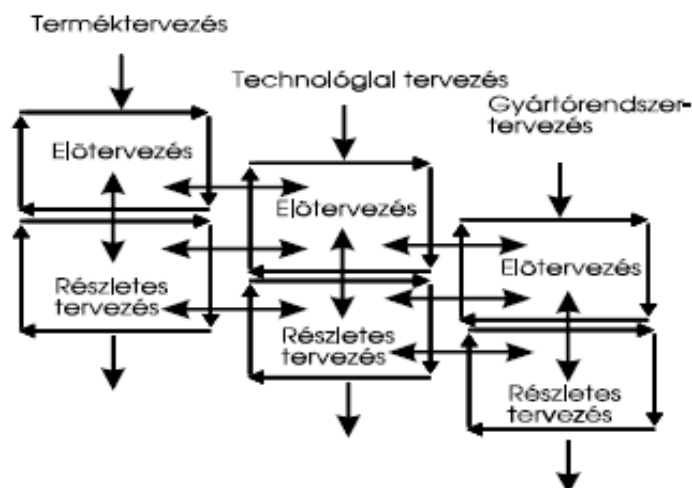
14.2. ábra. A konkurens tervezés relatív időbeli helyzete az életciklusban

A konkurens tervezés a bennfoglalt feladatok párhuzamosítására épül. Az egyik alapvető párhuzamosítási lehetőség a rendelkezésre álló **erőforrások egyidejű kihasználásában rejlik**. Ilyen erőforrások lehetnek a **humán** illetve a **gépi, jellemzően informatikai erőforrások**. Ezen erőforrások párhuzamos kihasználásának a tipikus példája, amikor több tervezőmérnök is ugyanazon feladat megoldásán dolgozik vagy amikor egy tervezőmérnök egyszerre több számítógépet is használ egy feladat megoldására (például az egyik számítógépen időigényes végeselemes szimulációt futtat, míg eközben egy másik számítógépen az ilyen számítás-hoz szükséges előkészítő munkát végzi).

A párhuzamosítási lehetőségek egy másik nagy csoportja az **egymást követő folyamatlépések párhuzamosítása**. A konkurens tervezés alkalmazása ezen a területen már sokkal nagyobb körütekintést igényel és a bevezetése sem olyan magától értetődő, mint az erőforrások párhuzamosított kihasználásakor. Az egymásra épülés miatt külön elemezni kell, hogy logikailag milyen párhuzamos végrehajtási lehetőségek állnak a rendelkezésre. Emellett az informatikai környezetet és a végrehajtási folyamatot is megfelelően kell kialakítani, mert ezek hiányában a párhuzamosítás nemhogy időnyereséget, hanem számottevő idővesztést fog eredményezni. Az informatikai háttér kialakításánál az asszociatív CAD rendszerek valamint a kapcsolódó PDM/PLM rendszerek alkalmazása mellett ügyelni kell a fizikai egységeket összekötő média, jellemzően lokális vagy globális méretű számítógépes hálózat üzembiztos és magas biztonsági szintű kialakítására is.

A folyamatok párhuzamosítás szempontból történő logikai elemzésénél alapvetően az **ismeretáramlás** elemzésére kell nagy hangsúlyt fektetni. Ilyenkor meg kell határozni, hogy

milyen ismeretegységek milyen időbeni ütemezés szerint keletkeznek a folyamat egy adott szintjén. Ezután lehet meghatározni, hogy milyen ütemben lehet ismereteket átadni egy ráépülő folyamatnak, valamint milyen ütemben várhatók visszacsatolt ismeretnek egy magasabb szintű folyamatból (14.3. ábra).



14.3. ábra. A konkurens tervezés ismeretáramlása

14.2. Termékmodellek, információmenedzsment

A konkurens tervezéshez kapcsolódó tervezési folyamatok mind az egységesített termékmodell fizikai megvalósításán alapulnak. Ezen termékmodell és az ezt jellemző termékadatok tárolása, kezelése PDM/PLM rendszerekben történik. Jelen leírás nagyobb hangsúlyt fektet a PDM rendszerek részletes bemutatására, hiszen a PLM rendszerek a PDM rendszerek kibővítésén alapulnak és a két rendszertípus közötti határvonal egyre elmosódottabbá válik az idő előre haladtával.

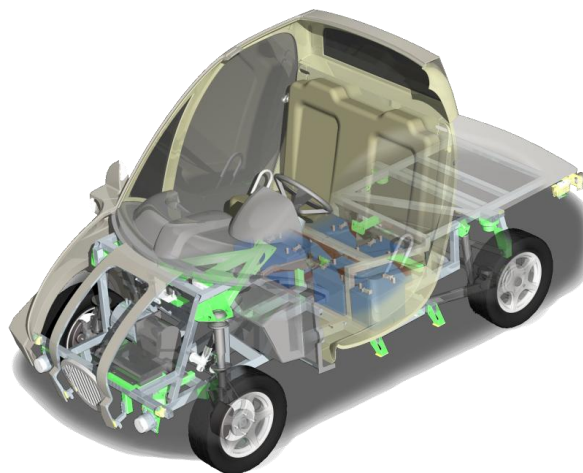
14.2.1. A termékmodell

A termékmodell (**Product Data**): a termék életciklusmodellje és mind tervezési (geometria, anyag, stb.), mind gyártási termékinformációkat tartalmaz. Régebben a termékmodell általában egy olyan, legtöbbször **3 dimenziós CAD modellt** jelentett, amelyhez számtalan termékjellemzőt kapcsoltak jellemzően valamilyen paraméter formájában. Napjainkban a termékmodell már egy olyan, egyre növekvő komplexitású számítógépes modellt jelent, amely nemcsak kapcsolt paramétereiben, hanem egyéb jellemzőiben is egyre jobban megközelíti a megvalósulásra kerülő terméket. Az ilyen modellek gyűjtőneve a **digitális mock-up (Digital Mock-Up)** vagy **virtuális termék (Virtual Product)**.

Az ilyen extrém nagy komplexitású számítógépes modellek létrehozásának az alapvető célja, a valóságban elvégzendő fizikai tesztek, vizsgálatok kiváltása. Ilyen vizsgálatok lehetnek:

- ◆ kinematikai és dinamikai szimulációk;
- ◆ különböző végeselemes módszeren alapuló számítások (szilárdságtani, áramlástani, stb.);
- ◆ ergonómiai vizsgálatok;
- ◆ formatervekkel kapcsolatos vizsgálatok (felületfolytonosság, tükröződés ellenőrzése);
- ◆ alapvető interferencia tesztek a különböző beépülő részegységek között;
- ◆ szerelhetőségi, karbantartási ellenőrzések.

Az ilyen virtuális prototípusok alkalmazása tipikusnak mondható a gépipar húzó ágazataiban úgymint a hadiiparban, repülőgép és járműiparban is (14.4. ábra).



14.4. ábra. Magas komplexitású járműipari digitális mock-up

14.2.2. Termékadatok kezelése

A **termékadat kezelés (Product Data Management, PDM)** definiálható, mint olyan eszköz, amely segít a mérnököknek és másoknak az adatok és a termékfejlesztési folyamat kezelésében. A PDM rendszerek kezelik a tervezéshez, gyártáshoz és a termék támogatásához szükséges adatokat. Továbbá a PDM több rendszeren keresztül és között is integrálja és kezeli a termék definíciójához tartozó folyamatokat, alkalmazásokat és információt.

Ezek a termékadatok kapcsolódhatnak a tervezési vagy a gyártási folyamatokhoz, tartalmazhatnak alanyanyagra, specifikációra vonatkozó információkat is. Ilyen tipikus termékadatok lehetnek:

- ◆ alkatrész azonosító, cikkszám vagy szabványszám;
- ◆ megnevezés vagy beszállító azonosító;
- ◆ alkalmazott mértékegység rendszer;
- ◆ költség vagy beszerzési ár;
- ◆ anyagjellemzők;
- ◆ tervezési utasítások és előírások;
- ◆ technológiai követelmények és előírások;
- ◆ kapcsolódó egyéb dokumentumok (jegyzőkönyvek, fényképek, mérési eredmények, stb.).

14.3. Adatbázisok és Adatbázis-kezelő rendszerek

A szerteágazó termékadatok tárolása megfelelő számítástechnikai háttér megléte nélkül napjainkban már elképzelhetetlen. Ezen rendszerek alapvetően adatok és az azokból kinyerhető információk strukturált tárolására szolgálnak, de emellett az adatok kezelését, változtatását, visszakeresését is nagymértékben megkönnyítik. Az Adatbázis-kezelő rendszerekkel kapcsolatban meg kell ismerkedni a következő fogalmakkal.

14.3.1. Adat

Adatoknak nevezzük az olyan strukturálatlan tényeket, amelyek tárolhatók, visszakereshetők, aktualizálhatók és újra tárolhatók. Ilyen adatok lehetnek tipikusan a mérések összegyűjtött eredményei vagy különböző forrásokból összegyűjtött rendszerezetlen, tények.

Az **adat** az alap építőegysége az információkezelés rendszerének. Ebben a rendszerben az **információ** képviseli a következő szintet, míg a hierarchia legmagasabb fokán a **tudás** áll. Néhány kitüntetett jelentőségű adattípus külön is említést érdemel. A **nyers adat** valamilyen forrásból érkező, de még feldolgozás előtt álló adatforma. Tipikus példája a nyers adatoknak a mérőkészülékből érkező elektromos jelek sorozata. Számítástechnikailag megkülönböztethetők a digitálisan tárolt adatok és az olyan speciális adatok, amelyek ezeken az adatokon végeznek különböző műveleteket. Ezeknek, a jellemzően végrehajtási instrukciókat tartalmazó adatoknak a gyűjtőneve a **program**. Viszont adattárolási szempontból különös figyelmet igényel a **metaadat (metadata)**, amely más adatok leírásának tekinthető. A metaadatok tipikus példája a könyvtári kartonok rendszere, hiszen egy karton pontos leírást ad egy adott könyvről, viszont maga az adat csak a könyvben található meg.

14.3.2. Információ

Információnak nevezzük a jelentéssel bíró tények, értékelt adatok halmazát. Az információ kinyerése az adatokból egy fontos feladata az Adatbázis-kezelő rendszereknek és azokat felhasználó mérnököknek. A kinyert információkon keresztül a rendezetlen adatok könnyebben áttekinthetővé, értelmezhetővé válnak.

14.3.3. Adatbázis

Az adatbázis (**Database DB**) hosszú ideig struktúrát formában tárolt információk gyűjteménye. Olyan integrált adatszerkezet, amely több különböző objektum előfordulási adatait **adatmodell** szerint szervezeten perzisztens módon tárolja olyan segédinformációkkal (metaadatokkal) együtt, melyek a hatékonyság, integritásörzés, adatvédelem biztosítását szolgálják.

Az adatbázisok bizonyos szempontból a különböző adatmodellek fizikai megvalósításai. Az adatmodellek formális nyelven írhatók le, melyek értelmezését az Adatbázis-kezelő rendszerek végzik. Fontos az adatmodellek megismerése, mert enélkül az adatbázisok és az Adatbázis-kezelő rendszerek funkcióinak a megértése igen nehézkes. Jelenleg alapvetően 5 fő adatmodell típust lehet megkülönböztetni. Ezek az adatmodellek az adatok tárolásának és kezelésének és formátumát, valamint struktúráját írják le.

Az első ilyen adatmodell formátum az **egyszerű adatmodell (Flat model)**. Ebben a modellben az adatok táblázatos formátumban kerülnek tárolásra. A sorokban található az egyedi adatok, míg az oszlopokban pedig a különböző letárolt tulajdonságok.

A **hierarchikus adatmodell (Hierarchical model)** az adatokat fa struktúrában tárolja. Külön eszközök segítik a struktúra egy adott szintjén található adatok visszakeresését, listázását. Ilyen struktúrában különösen hatékonyan tárolhatók olyan adatok, melyek egymással szülő-gyermek kapcsolatban állnak, azaz egy-egy reláció áll fent közöttük (például tartalomjegyzékek, darabjegyzékek, stb.).

A **hálózati modell (Network model)** a CODASYL konzorcium specifikációjára épül. A specifikáció szerint ebben az adatmodellben az adatok rekordokban (tulajdonképpen a rekordok egyedi mezőiben) kerülnek tárolásra és ezeket a rekordokat csoportokba lehet szervezni. A csoportok tartalmazzák az egyes rekordok közötti, egy-több alapú kapcsolatok leírását. Egy ilyen kapcsolatban egy adott rekordhoz több más rekord kapcsolódhat, így a leírás hasonlít a fa struktúrához, de itt már bizonyos keresztreferenciák is létrejöhetnek. Ebben a modellben

gyorsan lehet adatokat visszakeresni, de már az adatok kezelése, újrendezése meglehetősen erőforrás igényes.

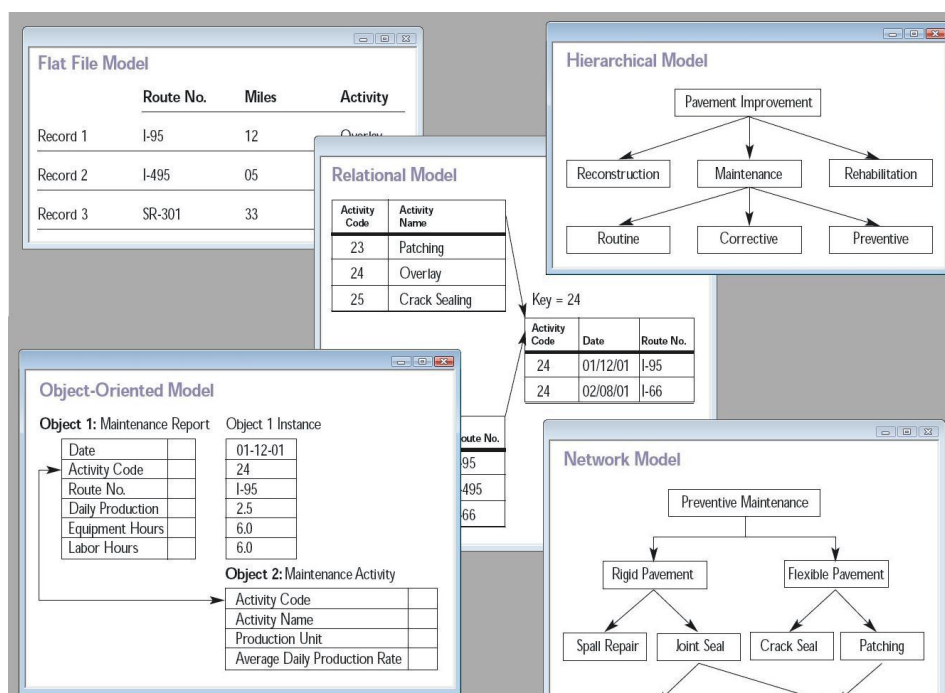
A **relációs adatmodell (Relational model)** az adatok közötti összefüggések tárolására épül. Az egyes adatok egyedi előfordulásait egy olyan táblázatban tárolja a modell, ahol az egyes sorokban az adatok értékeit, míg az oszlopokban specifikus tulajdonságok találhatók. Maga a táblázat az adatok közötti relációk fizikai megvalósulásának tekinthető. A relációs adatmodellben ezek a táblázatok az egyszerű adatmodell táblázataihoz hasonlóak és tetszőleges számban fordulhatnak elő magában az adatbázisban. Azzal, hogy egy adott adat több ilyen táblában is előfordulhat, azzal lehetővé válik több-több kapcsolatok egzakt leírására is. A relációs adatmodell napjainkban a elterjednek számít főképp a kiemelkedő rugalmassága miatt.

Az **objektumorientált adatmodell (Object-oriented model, Objectional model)** a programozásban már elterjedt metódust próbálja átültetni az adatbázis kezelés területére. Ebben a modellben az adatbázis intelligens objektumokból épül fel, amik rendelkeznek az objektumorientált programozás 3 alapvető tulajdonságával:

- ◆ becsomagolás (encapsulation): az objektum adatok és műveletek egységes kezelése;
- ◆ öröklődés (inheritance): az alacsonyabb szinteken lévő objektumokból (szülő) levezetett magasabb szintű objektumok (gyerek) öröklik a szülők tulajdonságait;
- ◆ többalakúság (polymorphism): ugyanazt az utasítást az egyes objektumok saját előírásaiknak megfelelően értelmezik.

Habár ez a modell jelentősen leegyszerűsíti mind a programozó munkát (a programozási és az adatbázis modell nagymértékű hasonlóságából adódóan), mind a felhasználást; jelenleg még teljesítményt tekintve nem hasonlítható össze a relációs modellen alapuló rendszerek teljesítményével.

A különböző adatmodelleket a következő ábra szemlélteti (14.5. ábra).



14.5. ábra. Különböző adatmodellek vizuális megjelenése

14.3.4. Adatbázis-kezelő rendszerek

Adatbázis-kezelő rendszer (DataBase Management System, DBMS): programrendszer, amelynek feladata az adatbázishoz történő hozzáférések biztosítása és az adatbázis belső karbantartási funkcióinak végrehajtása. Ezek a rendszerek biztosítják a háttérrel a következő adatbázis funkcióknak:

- ◆ **indexelés:** az adatbázis teljesítmény növelésének egy hatékony módszere, amely jelentősen felgyorsíthatja az adatok visszakeresésének a sebességét;
- ◆ **tranzakciók támogatása:** ami több adat egyidejű manipulálását teszi lehetővé beépített ellenőrzés mellett;
- ◆ **replikáció:** több adatbázis példány folyamatos frissítése és az automatikus átállás támogatása az elsődleges példány hibája esetén;
- ◆ **biztonsági funkciók kezelése:** hozzáférési jogosultságok és napló kezelése, titkosítás támogatása;
- ◆ **zárolás funkció:** tranzakción alapuló adatmódosítás esetén a rendszer addig zárolja a módosítás alatt álló adatokat, amíg a tranzakció sikeresen le nem zárul.

A DBMS rendszerek az adatbázis kezeléshez kapcsolódó alapfunkciókon kívül számos magasabb szintű kényelmi, biztonsági illetve adatkezelési szolgáltatással is rendelkeznek. A legfontosabb ilyen jellegű szolgáltatások a következők:

- ◆ **összetett lekérdezések támogatása (Query ability)** segítségével nagy bonyolultságú, sokszor egymásba ágyazott lekérdezéseket lehet elkészíteni jelentősen egyszerűsített nyelvezet használatával (például adott gyártótól milyen M10-es méretű kötőelemek találhatók az adott összeállításban);
- ◆ **továbbfejlesztett biztonsági mentés és replikáció (Backup and replication)** segítségével lehetőség van földrajzilag távol eső munkahelyek között is biztosítani az egységes adatbázis szerkezetet;
- ◆ **szabályok támogatásával (Rule enforcement)** lehetőség van például a hibás manuális adatbevitel számának csökkentésére (például egy kötőelemhez rendelt anyag nem lehet gyémánt);
- ◆ **biztonsági funkciók (Security)** lehetővé teszik az adatokhoz való hozzáférés, azok megváltoztatásával törlésével kapcsolatos engedélyek testreszabását mind egyéni, mind csoport szinten;
- ◆ **hozzáférési és változási naplók kezelésével (Change and access logging)** a DBMS rendszerek biztosítják a kapcsolódó műveletek végrehajtásának nyomonkövetését;
- ◆ **automatizált optimalizáció (Automated optimization)** megvalósításával a rendszer a végrehajtott műveletek statisztikai elemzésével el tud végezni magán olyan beállításokat, melyek segítségével növekszik az adott rendszer teljesítménye (például az indexelő szolgáltatás finomhangolásával növelni lehet az adatok visszakeresésének a sebességét).

14.4. PDM rendszerek főbb funkciói

A PDM rendszerek az egységes formátumú, integrált adatkezelésnek köszönhetően számos olyan funkciót valósítanak meg, melyek jelentősen tehermentesítik a mérnököket egyes min-

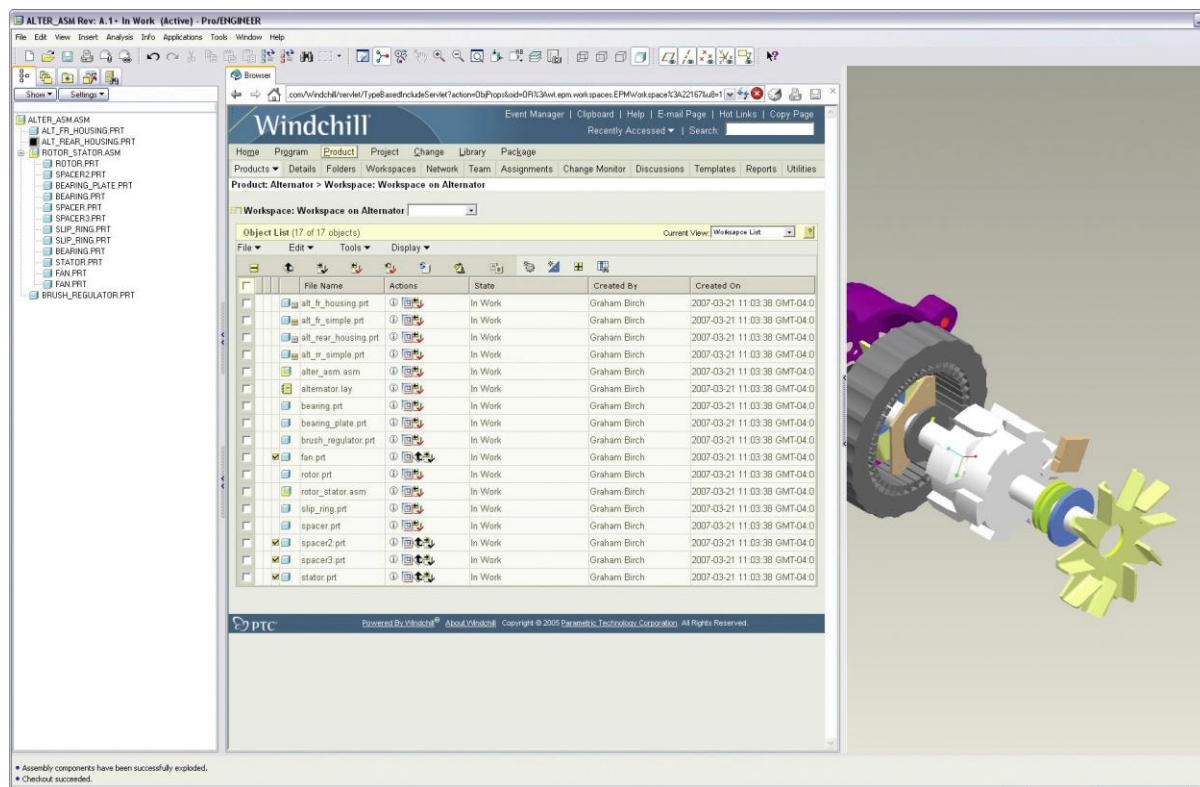
dennapos feladatok elvégzésének a tekintetében, illetve egyszerűbbé teszik az adatok visszakeresését és újrahasznosítását, mindemellett lehetővé teszik nagyméretű és sokszor térben is szeparált tervezőcsoportok együttműködését.

14.4.1. Termékadatok kezelése, vizualizáció

A PDM rendszer egységes forrást biztosít a termékhez kapcsolódó összes adat strukturált tárolására és kezelésére. Ezen felül a következő funkciókat nyújtja még:

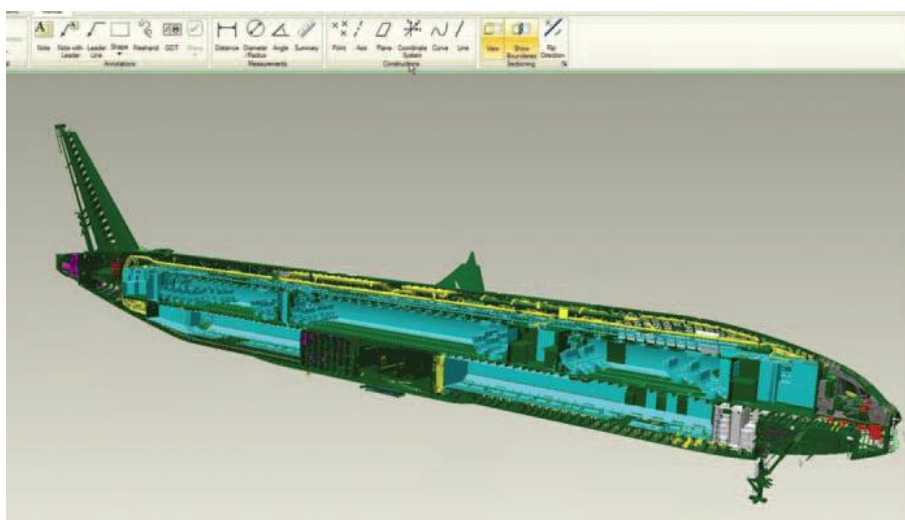
- ◆ **bármilyen adatformátum tárolása** és kezelése (heterogén CAD adatok, office dokumentumok, e-mail-ek, stb.);
- ◆ segíti az **információk** gyors megszerzését, **kikeresését**;
- ◆ biztosítja a legfrissebb CAD dokumentáció pontos megjelenítését (**előnézetek, robbantott ábrák**, stb.);
- ◆ megjeleníti a **termékstruktúrát (Bill of Material lists, BOM)** testre szabott formátumokban is, lehetséges annak importálása valamint exportálása a gyártásirányítási rendszerekkel való adatcsere érdekében.

Mindezekon a funkciókon kívül talán a modern PDM/PLM rendszerek egyik legfontosabb előnye az egységes termékadat kezelés. Itt azt kell érteni, hogy a rendszerek nem csupán adatokat tárolnak, hanem a termékek teljes digitális definícióját, beleértve a geometriai és gyártási adatokat, kapcsolódó dokumentumokat, jegyzőkönyveket és egyéb jellemzőket. Ezt a sokrétű információt egységes környezetben kezelik és jellemzően webes felhasználói interfészen keresztül képesek megjeleníteni a felhasználóknak (14.6. ábra).



14.6. ábra. CAD rendszer integrált WEB böngészőjében megjelenített termékadatok

A PDM/PLM rendszerek nemcsak kezelni tudják mindezeket az termékadatokat, hanem képesek egységes felületen vizuálisan is megjeleníteni azokat. A **vizualizáció** vitathatatlan előnye, hogy a CAD rendszerekben keletkezett alkatrészek és összeállítások megjelenítéséhez nem szükséges az ezen modelleket létrehozó CAD rendszer használata, hanem ehelyett a PDM rendszer felhasználói felületén lehet megtekinteni a modelleket. Természetesen ilyenkor a **3D-s modellek** tetszőlegesen **forgathatók** és **nagyíthatók**, emellett lehetőség van az **összeállítások szétrobbantására**, egyes **alkatrészek elrejtésére** vagy átlátszóvá tételére valamint **metszetek készítésére** is. További lehetőségek vannak a megjelenített modelleken **mérések elvégzésére** illetve, feljegyzések és 3D-s **megjegyzések hozzáadására**. Az ilyen vizualizációs feladatokhoz a PDM rendszerek a legtöbb esetben nem az eredeti CAD formátumot használják, hanem átkonvertálják egy speciális fájl formátumba, ami jelentősen kisebb méretű az eredeti modelleknél, mivel csak geometriai információt tartalmaz. A kisebb méretű fájlok miatt lehetőség van a vizualizáció web böngészőben történő megvalósítására is (14.7. ábra).



14.7. ábra. Nagy komplexitású modell megjelenítése WEB-es felületen

14.4.2. Mérnöki változtatások kezelése

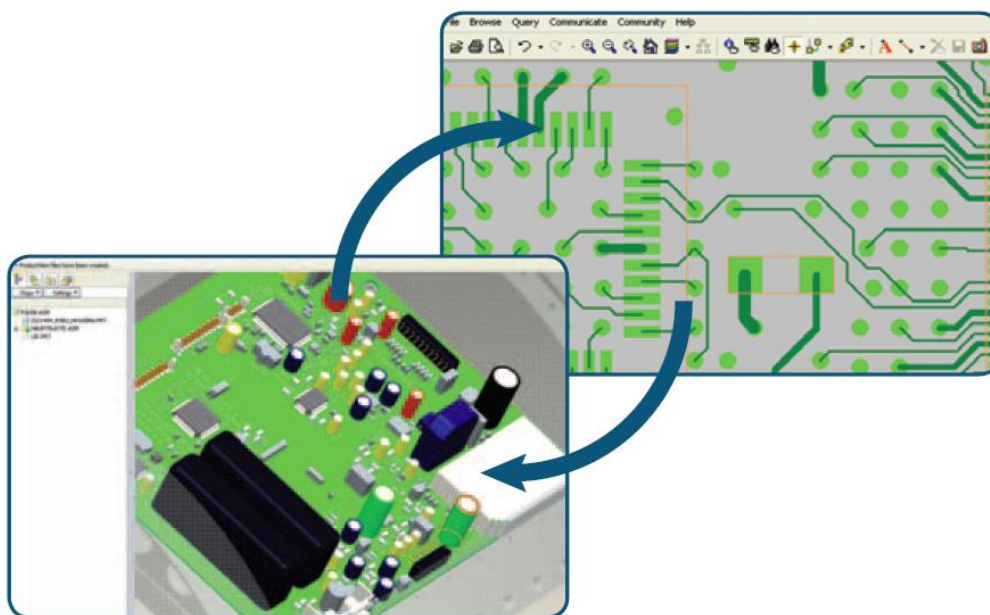
Az egyik legfontosabb funkció az adatok változásának nyomon követése, naplózása. Számos egyéb funkció épül erre a szolgáltatásra. A változások kezelése a következőket foglalja magában:

- ◆ **történetiség nyomon követése** (verziók és iterációk tárolása, lehetőség egy korábbi állapothoz való visszatérésre);
- ◆ **naplózás funkció** (adatváltozások, hozzáférések, tevékenységek rögzítése);
- ◆ **változásmenedzsment** (változaskérések, változási értesítések, kapcsolatos végrehajtási és jóváhagyási folyamatok kezelése).

A mérnökök napi munkája folyamán az egyik legnagyobb figyelmet igénylő feladat a használatban lévő modellek érvényességének ellenőrzése, azok változásainak nyomon követése. Mindezt hatványozottan nehezebb kivitelezni, ha az adott mérnök egy nagyobb csoportban látja el a feladatait. Itt nemcsak a nagy távolság jelent kihívást, hanem sokszor különböző időzónákban dolgoznak a csoporttagok.

Egy másik nézőpontból tekintve a változáskövetés témakörében külön kihívást jelent, hogy olyan **különböző tervezőcsoportoknak kell együttműködniük** ugyanazon a projekten, me-

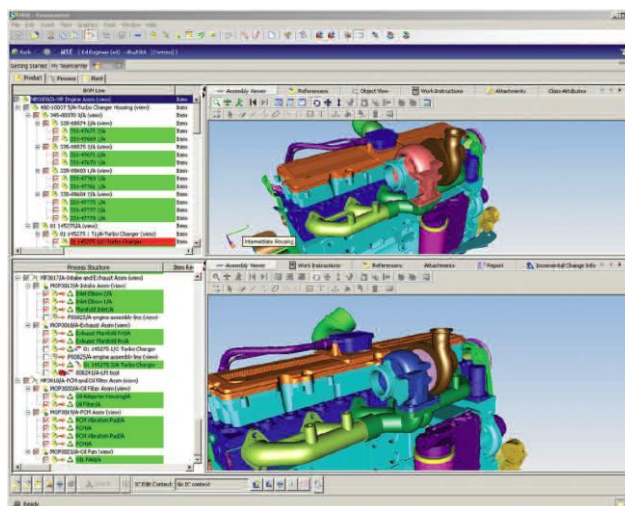
lyek teljesen eltérő tervezőrendszereket használnak. Tipikus példa erre az olyan fogyasztói termékek tervezése, melyek egyaránt tartalmazhatnak mechanikus és elektronikus komponenseket is. Ilyenkor, ha az elektronikát tervező kollégák valamilyen változást kezdeményeznek egy nyomtatott áramkörön, akkor az sok esetben további változásokat generálhat a burkolatokon. Ilyenkor a PDM rendszernek le kell kezelnie a különböző rendszerek (ez esetben az elektronikai ECAD és a gépészeti MCAD) adatait és célszerű külön értesítést is küldeni a változásban érintett mérnököknek is (14.8. ábra).



14.8. ábra. ECAD / MCAD kollaboráció a változásmenedzsment folyamatában

Manapság nemcsak a multinacionális, kifejezetten nagyméretű világcégeknek hanem a kisebb mérnöki szervezetekben is egyre nagyobb teret nyer a **mérnöki változások** megbízható és lehetőség szerint nagymértékben automatizált **követése**. Ezt csak a PDM rendszerek változásmenedzsment funkciójának a megfelelően testreszabott alkalmazásával lehet megvalósítani. Viszont amennyiben ez a funkció bevezetésre kerül egy szervezetnél, akkor lehet definiálni változási folyamatokat.

A változáskezelés témakörébe tartozik a termékek különböző **tervezési változatainak** a kezelése. Itt nemcsak arra kell gondolni, hogy különböző, általában egymáshoz hasonló termékváltozatokat kell tervezni, hanem a arról is, hogy sokszor a tervezés folyamán több egymással párhuzamos változat fut. Sokszor ezekből a változatokból csak egy kiválasztott változat kerül megvalósításra. A helyzetet tovább bonyolítja, hogy előfordul olyan szituáció is, hogy az egyébként megszűnő változatból egyes részmegoldások mégis átkerülnek a megvalósuló változatba. Ezeknek a problémáknak a kezelésére is található megoldás a PDM rendszerekben (14.9. ábra). **Különböző konfigurációkat lehet párhuzamosan futtatni** a tervezés folyamán. Arra is van lehetőség, hogy egyes tervezési ágak a tervezés egy adott fázisában vissza legyenek csatolva a végső változatba, mindeközben a rendszer automatikusan feltérképezi a változatok közötti különbségeket és javaslatokat tesz, hogy a változatok összefűzésekor az egyes részletek kialakítására.



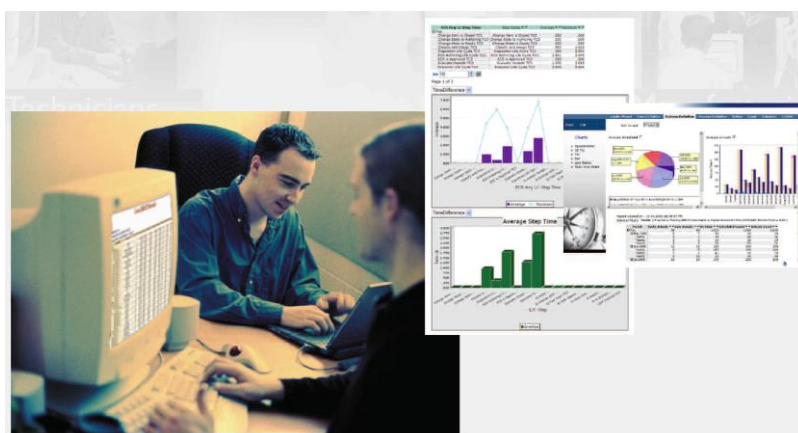
14.9. ábra. Különböző tervezési konfigurációk változásainak összehasonlítása

14.4.3. Csoportmunka támogatása

Fontos funkció a CE támogatása a párhuzamosan tevékenykedő tervezőcsoportok munkájához megfelelő háttér biztosításával. Ehhez a következő funkciók szükségesek:

- ◆ a rendszer garantálja, hogy egy adott modellt vagy dokumentációt **egyszerre csak egy felhasználó módosíthasson**;
- ◆ a jogosultságok szabályozásával **elkerülhetők a jogosulatlan hozzáférések**;
- ◆ **e-mail értesítés küldése** adott esemény esetén (jóváhagyás, módosítás, új verzió, stb.);
- ◆ **elektronikus aláírások támogatása** a változásmenedzsmenthez kapcsolódóan.

A fenti funkciókon kívül a csoportmunka támogatásához lehet sorolni a **döntéstámogató funkciókat** is, hiszen itt általában különböző munkakörben dolgozó munkatársakat kell összekapcsolni és biztosítani közöttük az információk megfelelő áramlását. A PDM rendszerek az egységes adatbázisra épülve képesek egységes módon, naprakész adatokkal ellátni a döntési folyamatban résztvevőket. Ezen támogatás alatt nemcsak a kiválasztott adatok vizualizációját jelenti, hanem különböző más jellegű kigyűjtések, statisztikák vagy egyéb származtatott kimutatások sokrétű megjelenítését is (14.10. ábra).



14.10. ábra. Származtatott adatok megjelenítése a csoportmunka támogatás keretében

14.4.4. Folyamatmenedzsment

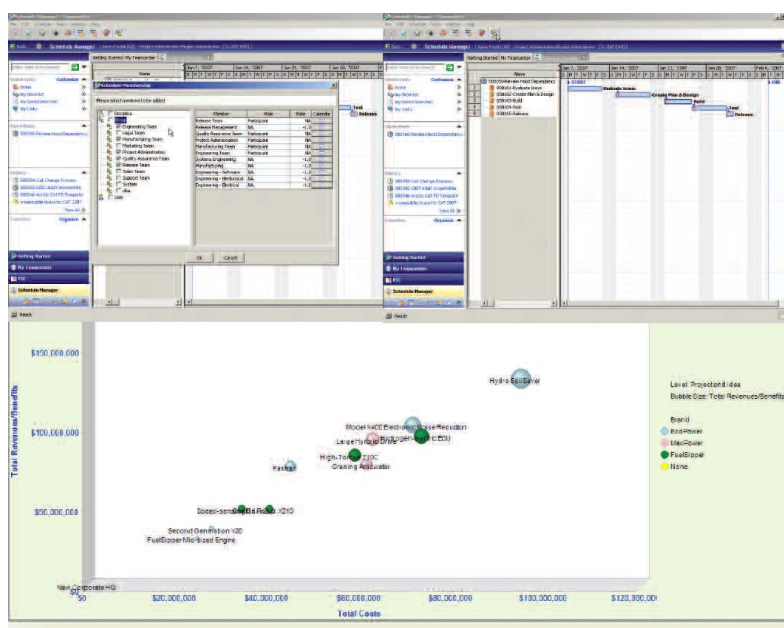
A PDM-mel kapcsolatos tevékenységek magasabb szintű kontrollálásának a támogatását szolgálja a folyamatmenedzsment szolgáltatás. Ennek fő összetevői a következők:

- ◆ folyamatba bennfoglalt szerepkörök és **szereplők meghatározása**;
- ◆ **feladatlisták definiálása** (szereplők, tevékenységek, határidők és értesítések);
- ◆ **folyamatok automatizálására** workflow motor alkalmazásával (feladatlisták automatikus léptetése);
- ◆ **folyamatok nyomon követése** (státusz, döntési pontok megjelenítése);
- ◆ komplex **termék életciklusok építése** az előre definiált folyamatokból (és speciális kapu folyamatokból).

Tipikus példája a folyamatmenedzsmentnek a **változási folyamatok nyomon követése**. Ezekben a folyamatokban ki lehet jelölni a változást kezelő vagy jóváhagyó szerepköröket, ezekhez a szerepkörökhöz konkrét személyeket és helyettesítő személyeket lehet rendelni. Azt is meg lehet határozni, hogy a változási folyamatban mikor és ki kapjon **értesítés a változásokról** illetve a kapcsolódó teendőkről. Ezeknek az értesítéseknek a kiküldését is lehet automatizálni, például úgy, hogy az értesítés küldését automatikusan egy adott eseményhez kötik.

A **folyamatmenedzsment** lehetőségeinek a legmagasabb szintű kihasználását az jelenti, ha egy termék vagy termékcsalád teljes életciklusához kapcsolódó összes nyilvántartási folyamat a PDM rendszeren keresztül fut. Ilyenkor az adott termék tervezéséhez közvetlenül kapcsolódó adatokon kívül még számos egyéb adatot is el lehet tárolni, melyek például a környezetgazdálkodással vagy a szervizeléssel kapcsolatosak.

A folyamatok lefutása is jelentős információtartalmú adatot generál, melyeknek a kinyerése, további elemzése szintén fontos lehet a folyamatok áttekintésénél és elemzésénél (14.11. ábra).



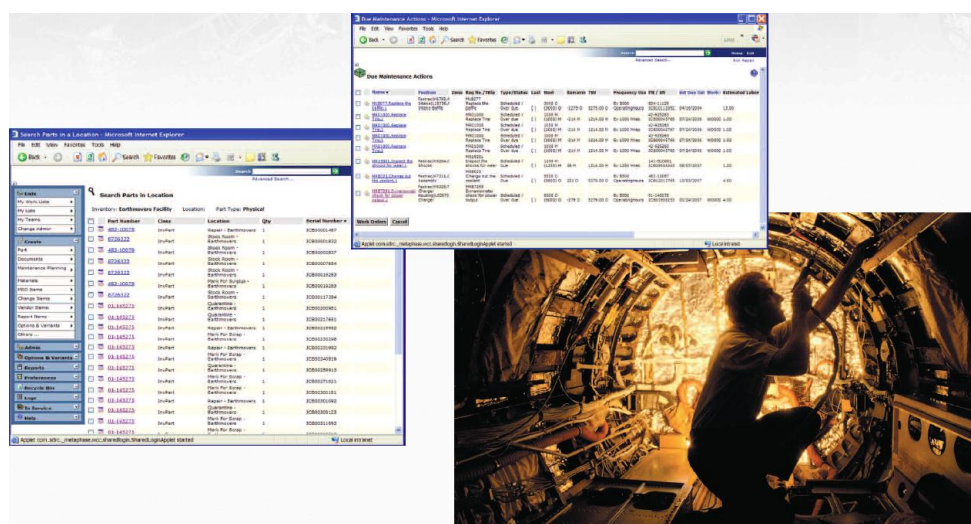
14.11. ábra. Származtatott adatok megjelenítése a csoportmunka támogatás keretében

Az ilyen származtatott adatok jellemzően a folyamat időbeli lefutásával és a hozzárendelt költségekkel kapcsolatosak. Már az is komoly előnyökkel jár, ha a döntéshozóknak lehetőségük van ezeknek a folyamatosan monitorozott adatoknak a megismerésére, de a különböző jövőbeni fejlesztések már túlmutatnak az adatok kizárólagos gyűjtésén és azok további elemzésére és az eredmények alapján magára a folyamatok optimalizálására irányulnak.

14.5. Kitekintés a PLM rendszerekre

A PLM (Product Lifecycle Management) rendszer bizonyos szempontból a PDM rendszer kiterjesztése a termék teljes életútjára. Így a PLM rendszer magában foglalja még a következő területek kontrollálását is:

- ◆ prototípusok készítése;
- ◆ gyártás;
- ◆ utángyártás;
- ◆ alkatrész utánpótlás;
- ◆ szerviz (14.12. ábra).



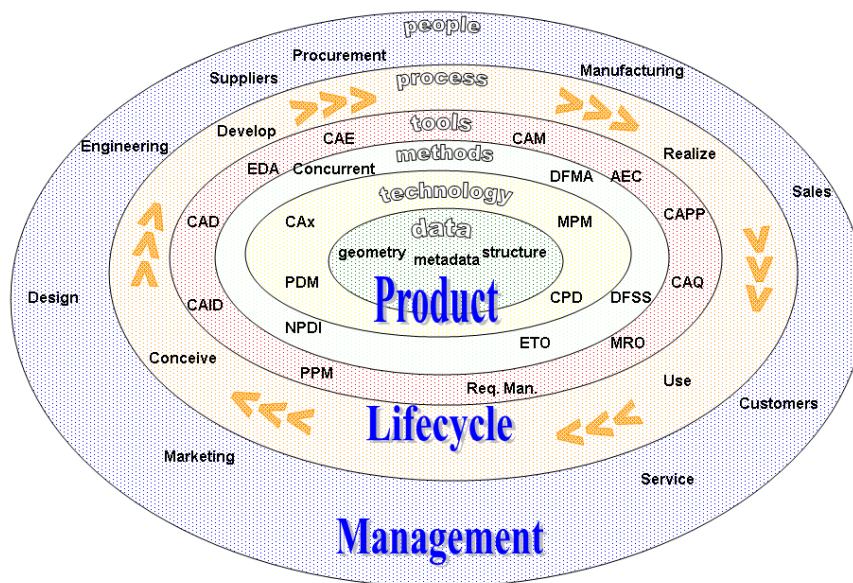
14.12. ábra. PLM rendszerek alkalmazása a termék életciklusának szerviz periódusában

A PLM rendszerek jövőképében egyre fontosabb szerepet kap az **együttműködő csoportmunka támogatása**, amely lehetővé teszi a földrajzi helyzettől független feladatmegosztást, lehetőséget biztosítva a folyamatok további optimalizálására. További cél a termék életciklus során a „digitális termék” előnyeit kihasználva még inkább előtérbe helyezni azt az innováció során a fizikai reprezentálással szemben. Ezeknek a funkcióknak köszönhetően a PLM rendszerek alkalmazása a következő mérhető előnyökkel jár:

- ◆ a termék piacra kerülésének az ideje jelentősen csökken;
- ◆ javul a termék minősége;
- ◆ csökkennek a prototípus költségei;
- ◆ idő- és költségbecslés tekintetében is pontosabb árajánlatok készítése;
- ◆ piacbővítési és bevétel növelési lehetőségek könnyebb felismerése;

- ◆ megtakarítások a már megtervezett termékek újrahasznosításával;
- ◆ keretrendszer a termékoptimalizáláshoz;
- ◆ hulladékok, selejt csökkentése;
- ◆ megtakarítások a teljes tervezési folyamat integrálásával;
- ◆ segítség a különböző szabványoknak történő megfelelési dokumentumok készítésében;
- ◆ lehetőség a szerződött gyártó partnerekkel történő adatmegosztásra.

A fenti előnyök eléréséhez a PLM rendszerek számos speciális szakmodullal segítik a mérnökök munkáját (14.13. ábra). Ezeket a sokrétű programmodulok a következő **5 fő területen** állnak rendelkezésre.



14.13. ábra. PLM rendszerek felépítése és működési területei

Rendszer Tervezés (Systems Engineering, SE). Ez a szakterület a fogyasztói/megrendelői igények felmérésével, kategorizálásával és elemzésével foglalkozik. Az így összegyűjtött és rendszerezett információk alapján a vonatkozó programmodulok segítik a rendszerek tervezését és a termék koncepciók kialakítását.

Portfólió menedzsment (Product and Portfolio Management, PPM). A szakterület célja a futó és felfüggesztett projektek monitorozása, nyilvántartása. Új termékek kifejlesztésénél az ide tartozó szakmodulok figyelik a fejlesztési folyamat előrehaladását és annak az esetleges elmaradását az ütemezéshez képest. Ezek a programmodulok segítséget tudnak nyújtani az olyan döntések meghozatalában, amikor csökkenteni kell a termék valamilyen minőségi jellemzőjét valamilyen más jellemző javítása végett vagy esetleg a rendelkezésre álló erőforrások korlátozottsága miatt (trade-off decisions).

A **Tervezőrendszerek (Product Design, CAx)** biztosítják a technikai háttérrel a termék megtervezésére és virtuális tesztelésére. Itt nemcsak a gépészeti CAD rendszerekre kell gondolni, hanem a más területet lefedő tervezőrendszerekre (például elektronikai tervezőrendszerek, ECAD), vagy szimulációs szoftverekre (szilárdságtani, áramlástan és egyéb szimulációs szoftverekre) is.

A Gyártástámogató Rendszerek (Manufacturing Process Management, MPM) segítségével jelentősen felgyorsítható a termékek előállításához szükséges gyártási folyamatok megtervezése. Ezek a rendszerek segítik a fizikai gyártás folyamatainak az ésszerűsítését és ütemezését is.

Végül a **PDM Rendszerek** fogják össze és kezelik a termékek adatait azok teljes életciklusa alatt a koncepcionális tervezés kezdeti fázisától egy termék életciklusának az utolsó lépéseként is értelmezhető fizikai újrahasznosításig.

Zárszóként elmondható, hogy a PDM/PLM rendszerek fejlődése töretlen és egyre gyorsuló tendenciát mutat. Jellemző a jelenlegi fejlesztésekre, hogy **egyre több szakterületet** kívánnak lefedni ezekkel a rendszerekkel az iparági szereplők. Hacsak a termék életciklusának a két szélső pontját vizsgáljuk, akkor is látható, hogy jelentős fejlesztések vannak például átfogó koncepcionális tervezőkörnyezet kialakítására illetve a karbantartást egyre jobban lefedő szakmodulok kifejlesztésére (14.14. ábra). Mindezek mellett a fejlesztések egy másik alapvető iránya, hogy a PLM rendszereket ne csak a multinacionális szervezetek **alkalmazzák**, hanem az oda beszállító **kisebb cégek is**. A jövőben a PLM rendszerek alkalmazása elkerülhetetlen a mérnöki tervezésben, mert enélkül már nem tud jelentősen javulni a tervezési folyamatok hatékonysága és egyéb ebből származtatott üzleti mutatói.



14.14. ábra. PLM rendszerek alkalmazása repülőgépek karbantartásában

15. PERIFÉRIÁLIS TECHNOLÓGIÁK

Szerzők:

Horváth Richárd, Mikó Balázs

A számítógéppel segített tervezés nem fejeződik be a termék modellezésével és a rajzkészítéssel, további felhasználásra szánjuk azokat. Ezen technikák rövid bemutatása jelenik meg ebben a tananyag részben.

A felhasználás első csoportját a digitális szimulációk jelentik, ebből kerülnek bemutatásra a leggyakrabban alkalmazott technikák.

Az elkészült modellekből valós prototípus is készíthető különféle gyors prototípus eljárások segítségével (SLS, DMLS, SLA, LOM, FDM, 3DP, PolyJet, SGC), mely felhasználása széleskörű a demonstrációtól, az öntőminta készítésen keresztül a valós gyártásig.

Termékfejlesztés során gyakori, hogy a formaterv nem digitálisan születik, hanem valamilyen anyagi modell, makett formájában. Ennek digitalizálására kifejlesztett 3D szkennelési eljárások kerülnek ismertetésre. Ezen módszerek jól alkalmazható alkatrészek digitális reprodukciója során is.

15.1. 3D szkennelés

A bonyolult alkatrészek eredetiről történő modellezése és újragyártása mai napig igen korlátozott módon oldható meg. Legtöbb problémát az okozza, hogy nem ismerjük az eredeti felületet előállító függvényt vagy burkoló görbét. Sok esetben az eredeti alkatrésznek sem ismert az egzakt előállítása, mert a gyártás során egyedi, kézi módszerekkel alakítják ki a felületet. A folyamatot, mely segítségével előállíthatjuk egy már megépített fizikai modell CAD-es modelljét, Reverse Engineering-nek hívjuk. A Reverse Engineering két folyamatból áll, az egyik a 3D-s szkennelés - az adott modell térbeli kiterjedését rögzíti számítógépes fájl formátumba - a másik a szkennelési eredmény feldolgozása egy (speciális) szoftver segítségével.

A digitalizálás műveleti sorrendje

A következőkben bemutatásra kerülnek az eljáráshoz szükséges műveletek, és rövid ismertetésük. Minden pont egyelőre platform független, bármelyik szkennelési eljáráshoz ezt a sorrendet kell követni.

Szkennelés:

Minden esetben rendelkezünk kell magával a munkadarabbal, amit rekonstruálni szeretnénk illetve a szkennér mérőgéppel, ami a 3D szkennelés végrehajtásához szükséges eszköz (15.1. ábra).

Pontfelhő létrehozás:

A szkenneléssel a munkadarab geometriai jellegzetességeit rögzítjük a továbbiakban részletezett eszközök felhasználásával. Az adatgyűjtés eredménye tehát egy digitális pontfelhő, pontfelhő. A megkövetelt pontosság, ill. geometriai „hűség” elérésének érdekében már a folyamat megkezdése előtt pontosan tudni kell a későbbiekben felmerülő igényeket (szkennelési pontosság, pontfelhő „sűrűsége”, szkennelési eljárás kiválasztása stb.) A 15.1. ábrán látható pisztolymarkolat pontfelhő képét mutatja a 15.2. ábra.



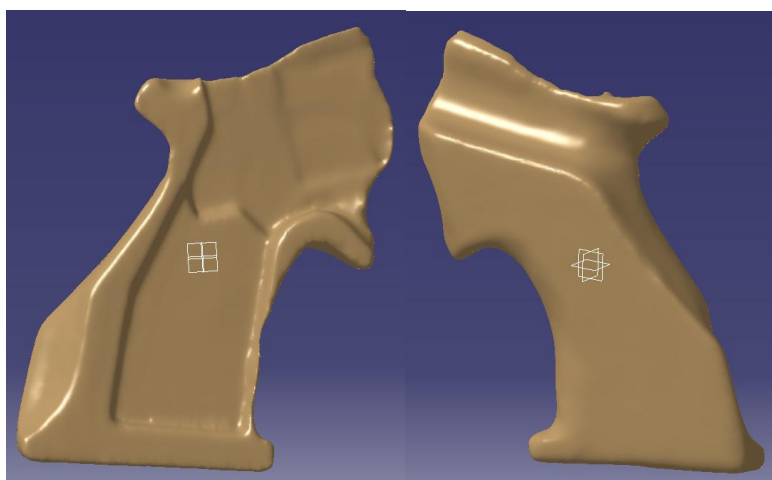
15.1. ábra. Szkennelni kívánt munkadarab (sportpisztoly markolat)



15.2. ábra. Munkadarabról készített pontfelhő PIXFORM programban

Modellépítés, rekonstrukció:

Az „alapanyag” pontfelhő további értelmezéséhez mindenképpen szükség van valamilyen további finomításra, feldolgozásra. Feldolgozás szempontjából egy- illetve többlépcsős eljárást is alkalmazhatunk. Egylépcsős megoldás, ha a pontfelhőt egyből CAD rendszerbe importáljuk. És létrehozuk az alkatrész CAD modelljét (15.3. ábra). A legtöbb CAD rendszer képes pontfelhőre burkoló görbét, felületet generálni. Többlépcsős eljárás, ha a szkennert saját pontfelhő szerkesztő szoftverével hajtjuk végre az első „simításokat”. Több lépésben történő feldolgozás során, a célprogramok sok esetben megkönnyítik a munkát eszköztáruk felhasználásával. Többek között alkalmasak a pontanomáliák kiszűrésére (kiugró pontok, lyukak, nem oda illő pontok, szkennelési hibák, nem szükséges adatok törlése stb.) több szempont alapján, továbbá alkalmasak a több irányból, felfogásból készült felvételek összefűzésére egymás kiegészítésére.



15.3. ábra. Pontfelhőből készített modell CATIA rendszerben

Ellenőrzés, korrekciók:

Érdemes és szükséges összevetni a kapott modellünket és annak geometriai méreteit a valódi szkennelni, modellezni kívánt darabbal.

3D szkennelés típusai

3D szkennelési eljárások alapvetően két fő típusba sorolhatók: léteznek kontakt vagy érintkező eljárások, ahol a darab és a szkennelő berendezés mérőfeje érintkezik, illetve léteznek nem-kontakt eljárások, ahol a mérő elem nem érintkezik a felülettel. A két módszer rövid jellemzését a 15.1. táblázat és a 15.2. táblázat tartalmazza.

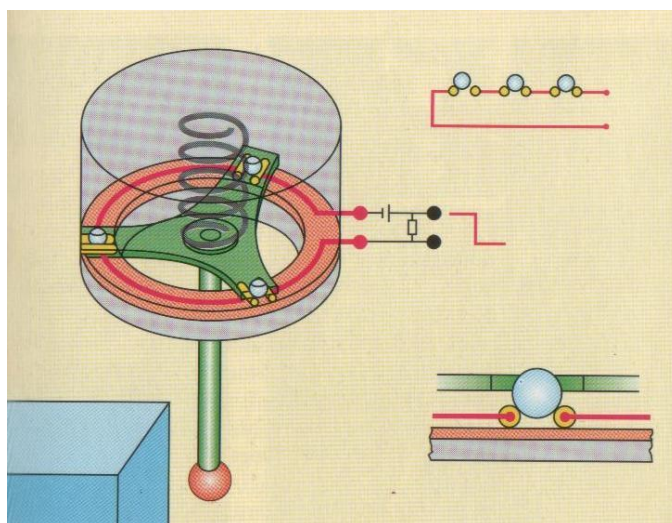
15.1. táblázat. Kontakt szkennelés tulajdonságai

Kontakt: „Tapintós” szkennelés	
touch-trigger (érintő-kapcsolós) fejek	analóg (merev tapintós) fejek
Előnyei: - pontos; - olcsó; - kis tapintási erő.	Előnyei: - pontos; - gyors (sok pont/perc); - nagy sűrűségű letapogatás.
Hátrányai: - lassú (keves pont/perc)	Hátrányai: - nagyobb tapintási erő.

Viszonylag egyszerű szenzor az úgynevezett kapcsoló tapintófej. A kapcsoló fej egy előfeszített tányérból és az azzal egybeépített elmozdulni képes mérőrészből áll. Lehetővé teszi több koordinátairány figyelembe vételét. A mérő rész hordozza magán a tapintót, általában a közvetlenül érintkező elem jó kopásállósággal rendelkező anyagból készül pl. szabályos rubin gömb. Érintésnél a tapintó kimozdul az eredeti helyzetéből, majd visszatér nyugalmi pozíciójába. Egy gyakran alkalmazott megoldás a hengerek és golyók kombinációja. A 15.4. ábra alapján jól látható, hogy egy áramkört alakítottak ki a kapcsolódási pontokon. Érintés esetén az elmozdulás hatására megszakad az áramkör. A szakadás következtében rögzítésre kerül a pillanatnyi hosszkoordináta a 3 fő irányban.



A)

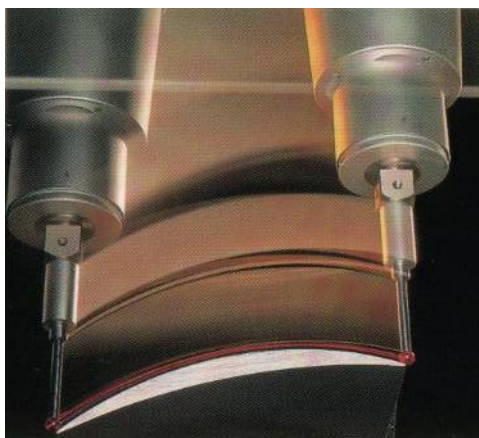


B)

15.4. ábra. Kapcsoló típusú tapintófej (A) TP20 típusú mérőfej, B) Kapcsoló tapintófej elve

Szkenning típusú, azaz folyamatos tapintással végrehajtott mérés (15.5. ábra) során pontról pontra történő tapintás kibővítésre került a felület folyamatos letapogatásával. Az előzőekben említett mérő tapintó fej elektromos vezérléssel kerül beépítésre, így minden a feladathoz szükséges képesség rendelkezésre áll. A folyamatos érintés alatt, a munkadarabon keresztül meghatározott pálya mentén történik az elmozdulás. Ez alatt a hajtás figyelembe véve a geometria változását, folyamatosan szabályoz. Így biztosítható a mérési tartományon belül és érintésben maradás. 0,1 mm felbontás esetén a nagy mérőerő miatt előfordulhat $\pm 200\mu\text{m}$ ingadozás is, ezt a vezérlés észleli és csökkenti az erő értékét. Általában konstans értéken tartja.

A szkennelő letapogatás felhasználása a koordináta mérőgépek számára különösen előnyös. Az alakmérés megvalósítása által képes kiváltani a célgépeket, illetve a már meglévő berendezések által nyújtott lehetőségeket kibővíteni.



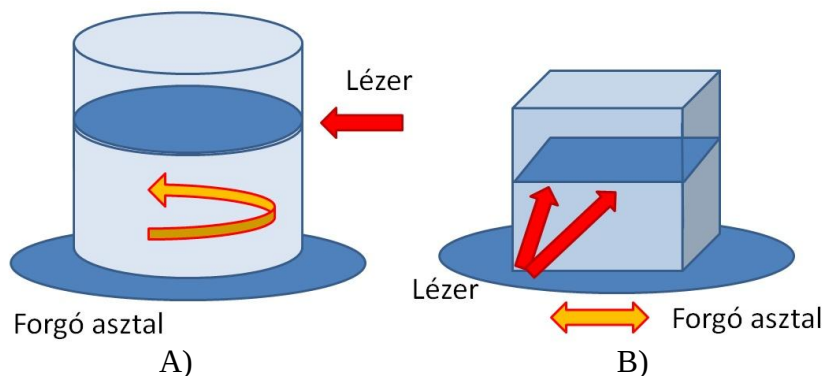
15.5. ábra. Scanning típusú letapogatás

15.2. táblázat. Nem-kontakt szkennelési eljárások tulajdonságai

Nem-kontakt szkennelés	
Lézer fényvel működő letapogató fejek	CCD kamera (plusz lézer)
Előnyei: - érintés nélküli szkennelés (letapogatás); - nagyon gyors; - puha anyagokhoz is használható;	Előnyei: - hordozható - nem kell a munkadarab felfogásával foglalkozni (térskennerek); - gyors; - akár 25000 pont/s.
Hátrányai (6. ábra): - korlátozott mélységek; - reflexiós problémák; - kötött lépéstávolság; - függőleges és alámetszett felületekhez nem/korlátozottan használható; - fényes felületekhez nem használható.	Hátrányai: - drágább eljárás;

Lézer fénnel működő szkennelés

A lézer fénnel működő szkennelő berendezések működési elve, hogy a kibocsátott lézer fény visszaverődési idejéből határozzák meg a távolságot, amely meghatározza az adott pont térbeli helyzetét.



15.6. ábra. Szkennelési módok
A) kör szkennelés; B) sík szkennelés

Zárt 3D szkennelésnél alapvetően két szkennelési módot különböztetünk meg:

- Körszkennelési mód, amely ideális a forgásszimmetrikus vagy sima felületű tárgyak gyors szkenneléséhez. Miután a tárgyat az a szkennер forgó asztalához rögzítik, a lézersugár függőleges pásztázza a felületet a digitális adatok létrehozására. Az eljárás elvi vázlatát a 15.6/A ábra szemlélteti.
- Síkszkennelési mód, amely a lapos vagy furatos, üreges tárgyak, aszimmetrikus formák szkenneléséhez ideális, illetve az aprólékosabb munkákhoz. Minden egyes oldal esetén külön megtörténik a függőleges azaz Z tengely irányú pásztázás. Az oldalakról készült pontfelületet célszoftver külön kezeli. Lehetőség van kézi és automatikus összeillesztésre. Az eljárás elvi vázlatát a 15.6/B ábra szemlélteti.

CCD kamera:

A CCD kamerával végzett szkennelési eljárást 2 vagy több CCD kamera plusz egy lézer végzi szoros szinkronban. A ZScanner térszkennerek (15.7.15.7. ábra. CCD kamera plusz lézeres szkennelő eszközök (ZCorp ZScanner 700)) a teljes beolvasást egy menetben el tudják végezni, ami a folyamat teljes időszükségletét lerövidíti. Szemben más eszközökkel, ebben az esetben nem kell a munkadarab felfogásával foglalkozni, a nehezen elérhető darabok is digitalizálhatóak. Elérhető színes 3D szkennер, amely egy időben olvassa be a test geometriai- és szín-adatait nagy felbontással. Textúra felbontása 50 – 250 DPI-ig terjed, amit 24 bit-es szín-mélységben tud biztosítani. Léteznek kifejezetten nagyméretű tárgyakhoz fejlesztett típusok is.



15.7. ábra. CCD kamera plusz lézeres szkennelő eszközök (ZCorp ZScanner 700)

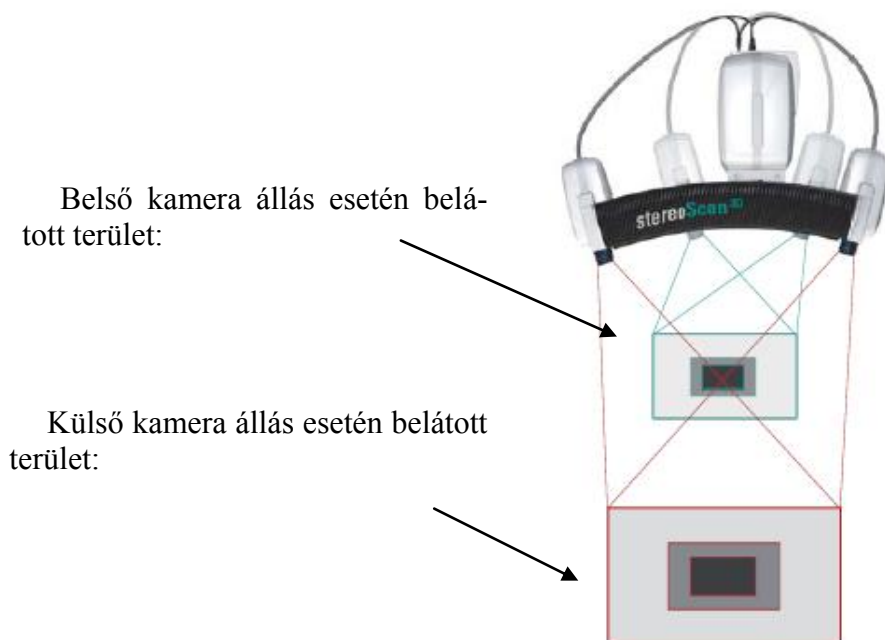
A következő berendezés két nagyfelbontású digitális kamerája a 15.8. ábrán jól láthatóan a befogókeret két szélén helyezkedik el. Középen a projektor (100 W-os halogén fényforrás) található, ami a kellő megvilágításért felel.



15.8. ábra Breuckmann stereoSCAN3D 2 mérési pozíciója

A fizikai elhelyezkedést 2 fix pont között lehet állítani, a kamerák dőlésszögét pedig 3 tagból álló tartományból (10°, 20°, 30°) választhatjuk meg. Ennek következtében egy aszimmetrikus elhelyezkedést kapunk, ami a mérési tartomány többszintes változtatását teszi lehetővé. A 15.9. ábra szemlélteti a kamerák által belátható területet a különböző paraméterpárosítások

mellett. Maga a mérés 380/880 mm távolságból végezhető el. „Z” irányba 2 μm felbontás érhető el, azonban ez függ a mérési tartomány méretétől. Az adatgyűjtési idő kevesebb, mint 1 másodperc.

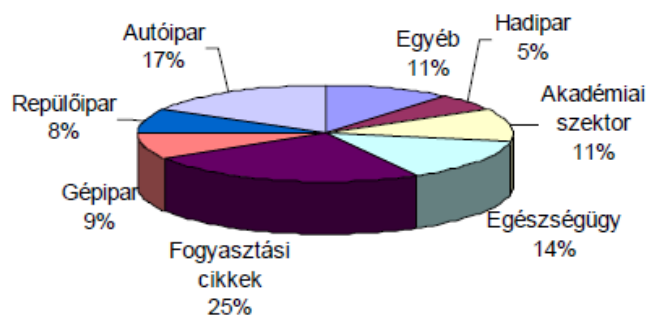


15.9. ábra Mérési tartományok alakulása stereoSCAN 3D berendezés esetén

15.2. Gyors prototípus gyártás

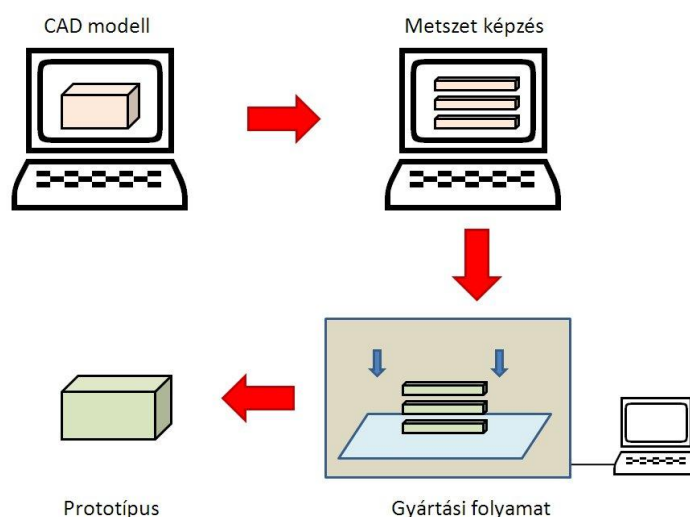
A mai modern szimulációs programok segítségével számtalan fontos vizsgálat végezhető el a virtuális modellterben. Azonban, ezeken a vizsgálatokon kívül egyre inkább megjelent annak az igénye, hogy ne csak „monitoron” keresztül, hanem fizikai formájukban is vizsgálhatóak legyenek a 3D-s modellek, a tervezés viszonylag korai stádiumában is. Az 1980-as évek végén kezdtek megjelenni az első 3D-s nyomtatási eljárások, melyeket Rapid Prototyping (RP), azaz gyors prototípusgyártási eljárásnak neveztek el. A gyors prototípusgyártás olyan eljárások halmaza, amelyekkel fizikai értelemben vett tárgy hozható létre közvetlenül egy háromdimenziós CAD modellből.

Az RP technológiák fejlesztése, és térhódítása napjainkban jelentős mértékű. Nemcsak a prezentációs célokat szolgáló 3D-s modellek készítése vált elérhetővé, hanem funkcionális prototípusok gyártására is kivitelezhető bizonyos eljárásokkal. A teljesség igénye nélkül a modellek alkalmasak szemrevételezésre, szilárdsági ellenőrzésre, próbákra, az orvosi gyakorlatban vagy a régészetben csontprotézisekként, a szerszámgyártásban műanyag-alakító szerzőként (Rapid Tooling) is. Az RP eljárások széleskörű alkalmazási területeit a 15.10. ábra szemlélteti.



15.10. ábra. RP technológiák alkalmazási területei

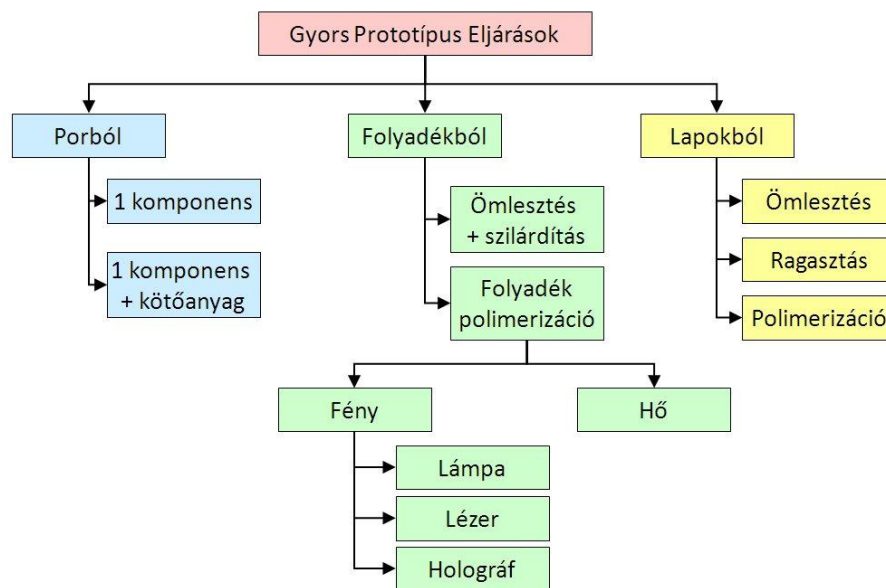
A gyors prototípusgyártási technológia általános modellgenerálási lépéseit mutatja a 15.11. ábra. Kiindulási pontként, valamely CAD rendszerrel történő virtuális modell szerkesztése, és egy megfelelő (STL fájlformátum), RP vezérlés számára feldolgozható fájlba történő konverálása történik.



15.11. ábra. Az RP technológia általános modellgenerálási lépései

A létrehozott .stl kiterjesztésű modell szeletelésével folytatódik a feldolgozás. Ezt követően a rétegek kialakítása és valamilyen RP eljárással, a létrehozott keresztmetszetek, szeletek összekötésére kerül sor. Az elkészült prototípus az RP technológia függvényében további eljárásokra (felületkezelés, utólagos kikeményítés, támaszanyag eltávolítás) szorulhat.

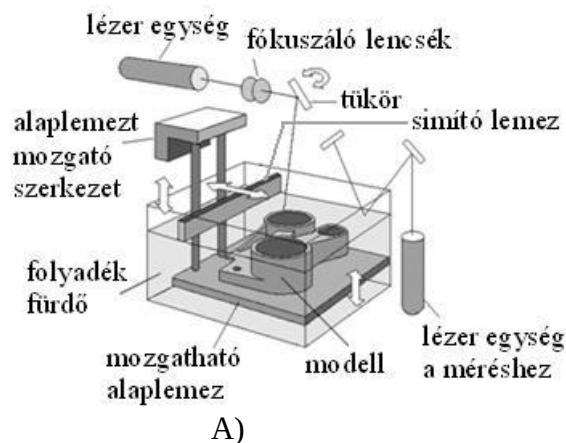
A továbbiakban bemutatjuk a gyakorlatban használt RP technológiákat. A 15.12. ábra a gyors prototípus gyártási eljárások működési elveit foglalja össze.



15.12. ábra Gyors prototípus gyártási eljárások osztályozása

SLA (Stereolithography) - Sztereolitográfia

A működési elve azon alapszik, hogy a számítógéppel vezérelt lézersugár energiájának segítségével lehetőség van bizonyos folyadék halmazállapotú monomerekből (pl.: epoxi-akrilát, uretán-akrilát) rétegenként szilárd, polimerizált anyagú, térbeli modellt létrehozni. Hőkezeléssel a modell szilárdsága tovább növelhető. A folyamat során az asztal a rétegvastagságnak megfelelően, automatizált vezérléssel, fokozatosan süllyed. Működési elvét 15.13. ábra szemlélteti.



15.13. ábra. Sztereolitográfia
A) Működési elv, B) Mintadarab

Az eljárás előnyei:

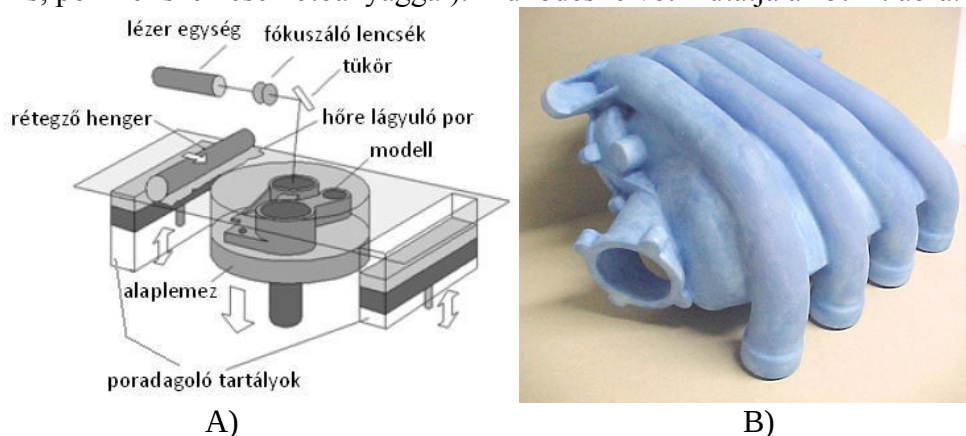
- pontos eljárás,
- részmodellekből is felépíthető a modell,
- az elkészült modellek tovább munkálhatóak, forgácsolhatóak.

Hátrányai:

- csak fotopolimer anyagok használhatóak,
- 95%-os az elkészült darab szilárdsági foka, további kikeményítést igényel,
- támasztékot kell készíteni,
- tisztításra szorul az elkészült modell,
- 0,5 mm falvastagságnál vékonyabb fal nem készíthető.

SLS (Selective Laser Sintering) - Szelektív Lézer Szinterezés

Ez a gyártási eljárás nagyon hasonlít a lézer sztereolitográfiához. Itt is egy mozgó asztalon, rétegenként, lézersugár segítségével épül fel a modell. Azonban ennél az eljárásnál térhálósítás nem történik, hanem az egyes rétegeket egy nagy teljesítményű lézersugár olvasztja össze. A felhasznált alapanyag sem folyadék, hanem hőre lágyuló polimer por szemcsék (használható fémpor is, polimer szemcse kötőanyaggal). Működési elvét mutatja a 15.14. ábra.



15.14. ábra. Szelektív lézer szinterezés
A) Működési elv, B) Mintadarab

A lefelé elmozduló asztalon rétegről rétegre épül fel a modell. Az egymást követő rétegeket egy henger viszi fel a félkész termékre. A felvitt réteget lézersugár olvasztja rá az előző rétegre. A folyamat addig ismétlődik, míg el nem készül a modell. Gyártás során nincs szükség a prototípus alaplemezhez történő kötésére, mivel az össze nem olvasztott, tömörített por alapanyag így megfelelő rögzítést biztosít. Az SLA eljárással szemben, utókezelésre nincs szükség, mivel térhálósítás nem történik.

Az eljárás előnyei:

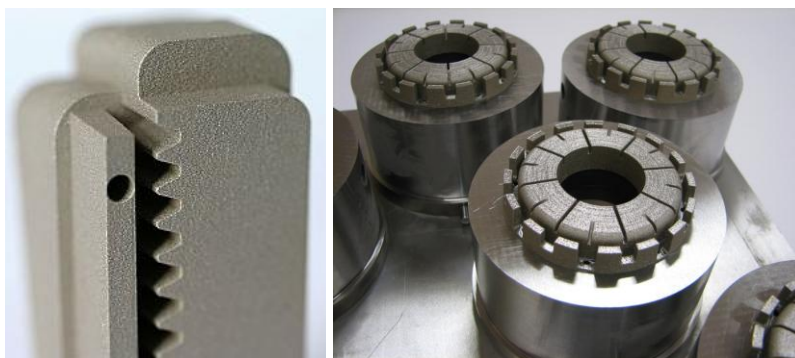
- működő modellek is készíthetőek;
- a fel nem használt alapanyag újra felhasználható;
- homokfúvással tisztítható, azonnal felhasználható.

Hátrányai:

- a porszemek nagyságától függő pontosság;
- a belső üregek tisztítása nehézkes;
- a szélső porszemek könnyen leválhatnak;
- olvadási hőmérséklet közelében kell tartani a porágyat;
- nitrogén atmoszféra szükséges az oxidáció elkerülésére;
- hosszú felfűtési és lehűtési idő.

DMLS (Direct Metal Laser Sintering) – Közvetlen Fém Lézer Szinterezés

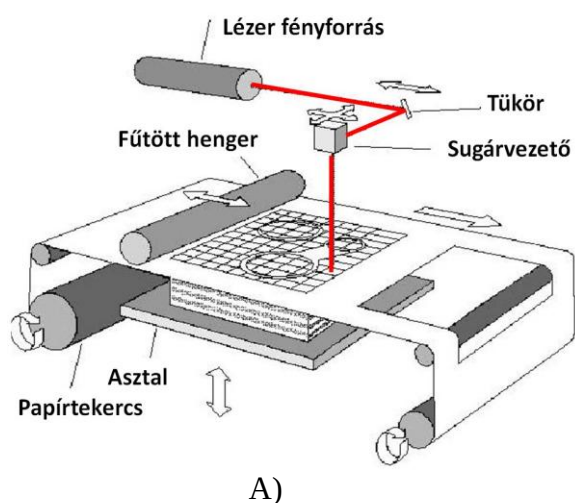
Az SLS eljárás továbbfejlesztésével hozta létre az EOS cég a közvetlen fém lézer szinterelési (DMLS - Direct Metal Laser Sintering) eljárást, mely során 0,4 – 0,6 mm szemcsenagyságú fém (bronz, acél) szemcsékből épül fel a prototípus, melyet hőkezelní kell a végleges keménység eléréséhez. Acél prototípus esetén akár 50 HRC feletti keménység is elérhető, így az elkészült darabok közvetlenül felhasználhatók végleges alkatrészként is. A 15.15. ábra ilyen szerszám elemeket mutat.



15.15. ábra. DMLS eljárással gyártott alkatrészek

LOM (Laminated Object Manufacturing) - Rétegelt darabgyártás

A technológia elvi vázlatát a 15.16. ábra szemlélteti. Ennél az eljárásnál általában speciális papírból készül a modell.



15.16. ábra. Rétegelt darab gyártás
A) Működési elv, B) Mintadarab

A LOM eljárás során használt speciális papír egyik oldala hőre érzékeny ragasztóval van bevonva, melyet egy fűtött, simító henger aktivizál. A modell elkészítésének kezdetén az első réteget (a legalsó réteget) a függőlegesen mozgatható asztalhoz ragasztják, valamint néhány réteget felvisznek a tényleges modell gyártásának megkezdése előtt. Egy új réteg felvitelét követően a lézersugár belevágja a számítógépes rendszer által létrehozott külső (és belső kontúrt), illetve a fennmaradó anyag rész eltávolításának megkönnyítése érdekében berácsozza azt. Egy réteg elkészülte után a munkaasztal egy rétegvastagságnnyit lesüllyed, és újabb papír-

réteg kerül felhelyezésre a félkész modellre. A folyamat addig ismétlődik, amíg a prototípus maximális „Z” irányú méretét el nem éri. A modellt elkészülte után a papírtömbből kibontják, és utókezelik. Az utókezelés lehet csiszolás, festés, védőanyaggal történő felületbevonás.

A LOM eljárás előnyei:

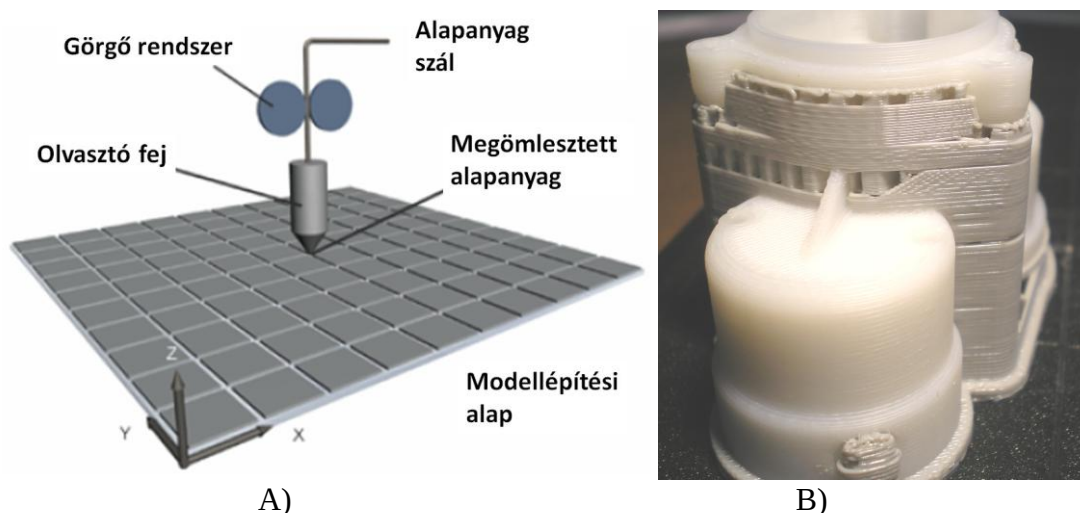
- olcsó alapanyag;
- nagy modellek készíthetők;
- támaszra nincs szükség, mert a fennmaradó papír rögzíti a modellt,
- a kész darab után munkálható.

Hátrányai:

- a merőleges és a rétegirányú mechanikai tulajdonságok eltérőek;
- a nem szükséges, belső modell részek, nehezen távolíthatók el.

FDM (Fused Deposition Modelling) - Huzalleolvasztásos modellépítés

A technológia lényege: egy hőre lágyuló polimer szál megolvasztása, majd újra megszilárdítása a kívánt modell geometriájának megfelelően. A technológia elvi vázlatát a 15.17. ábra szemlélteti.



15.17. ábra. Huzalleolvasztásos gyorsprototípus gyártás
A) Működési elv, B) Mintadarab (BASS)

Egy $x - y$ síkban mozgatható, elektromosan fűtött olvasztófej a bele táplált szálformájú anyagot kevésbé az olvadáspontja fölé hevíti („Z” - magassági helyzetet pedig a többi gyorsprototípus gyártó eljáráshoz hasonlóan az asztal süllyesztése adja). Ezáltal az anyag könnyen alakíthatóvá válik, illetve hozzátapad az előzőleg felvitt réteghez. Az alapanyag néhány tized másodperc alatt megszilárdul. Egy réteg felvitele után az alaplappal rétegvastagságnyi egységgel lesüllyed, megkezdődik a következő réteg felvitele. Alapanyagként főként ABS (Akrilnitril-Butadién-Sztirol), ABSi (ütésállóbb ABS), PC (Polikarbonát) anyagokat használnak. Ennél az eljárásnál is szükséges a támaszanyag használata. A támaszanyag ridegebb, törekenyebb az alapanyagnál, ezért az elkészült modelltől kézzel letörhető, vagy leoldható. A támaszanyag kitöréssel történő eltávolítását BASS (Break Away Support System), oldással pedig SST (Soluble Support System) rendszernek nevezik. A modell térkitöltését vizsgálva készülhet

szoros, vagy ritkított térkitöltésű (a kész modell sűrűsége egyharmada a szoros térkitöltésűnek) modellek.

Az eljárás előnyei:

- kis gépméret;
- káros gázok nem keletkeznek;
- egyszerű technológia.

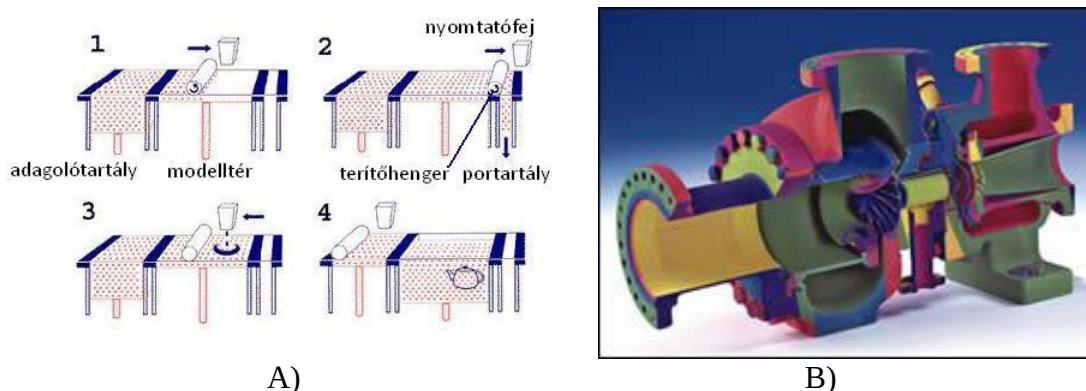
Hátrányai:

- keskeny rések és bordák nem állíthatóak elő;
- pontatlanság, főként z irányban;
- durva felületminőség.

3DP (3 Dimensional Printing) – 3D nyomtatás

A szelektív lézer szinterezéshez hasonlóan itt is por alapanyagot kötünk meg, csak nem lézersugár segítségével, hanem ragasztóanyag felhordásával. Az eljárás elve hasonló a tintasugaras nyomtató technológiájához, csak ebben az esetben nem tintát lövell ki a nyomtató fej, hanem ragasztó anyagot. A modell elkészítése itt is rétegről rétegre történik. Az egymásra épülő rétegek megszilárdítása a fűvókák által kilövellt ragasztóanyaggal van biztosítva. Egy réteg elkészülte után a porfürdő egy rétegvastagságnival lesüllyed. Ezt követően a terítő henger a portartályból szétteríti a következő réteg elkészítéséhez szükséges por alapanyagot. Ezek a lépések ismétlődnek a végleges geometria eléréséig. Ennél az eljárásnál sincs szükség külön támaszték készítésére, mivel a porágy megfelelő stabilitást biztosít. A modell elkészülte után a felesleges por eltávolításra kerül. Lehetőség van színes nyomtatásra is, mivel a ragasztó mellett színes festék is felvihető a rétegekre.

Nyomtatást követően az elkészített modell részben porózus szerkezetű, törékeny, ezért telíteni kell. A telítő anyag lehet például: műgyanta, viasz. A 3DP nyomtatás elvét a 15.18. ábra mutatja.



15.18. ábra 3D nyomtatás
A) Működési elv, B) Mintadarab

Felhasznált anyagok tekintetében egyre szélesebb skála jelenik meg. Alkalmazott alapanyagok tekintetében a következők különböztethetők meg: keményített cellulóz por, gipszpor, kerámia por, nagy teljesítményű kompozit alapanyagok (kompozit műanyag). Különböző fantázianevű anyagokat más-más alkalmazásokhoz lett kifejlesztve, például [1]:

- Elastomeric (gumi-szerű tulajdonsággal rendelkező anyag),
- Direct casting (nem vas fémöntvények formakészítéséhez),
- Investment casting (viaszkiolvasztásos precíziós öntéshez, mintakészítéshez).

Az eljárás előnyei:

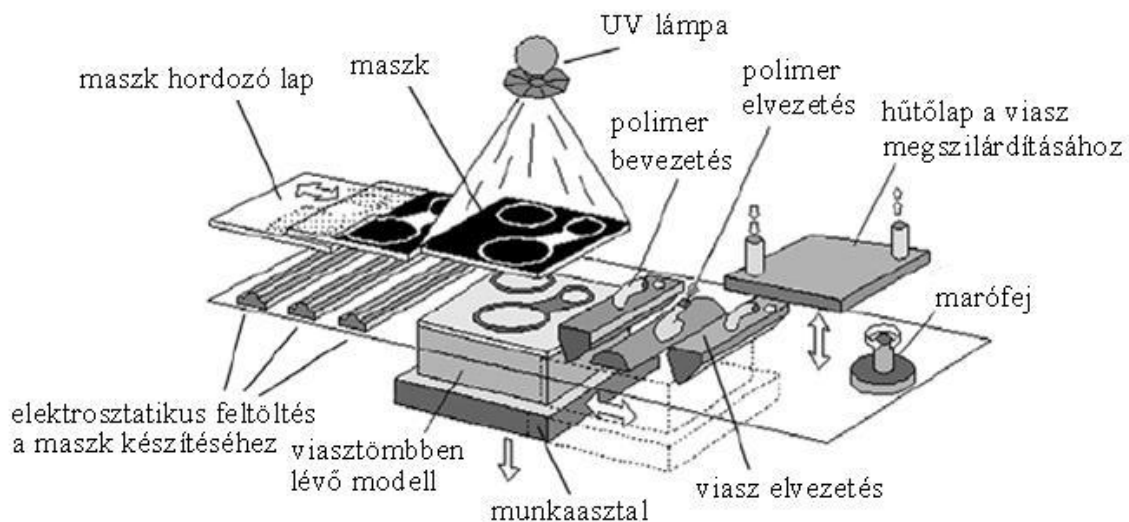
- előállítási sebesség;
- egyszerű, megbízható eljárás;
- nem igényel támaszanyagot a modell.

Hátrányai:

- utólagos keményítés szükséges;
- pontossága, felület minősége korlátozott;
- belső felületekhez nem lehet hozzáférni.

SGC - (Solid Ground Curing) - Réteges fotopolimerizáció

Ez a legbonyolultabb az eddig ismertetett eljárások közül. Gyakorlatilag egy réteg kialakítása egy lépésben történik. A folyamat az egyes rétegekhez tartozó, úgynevezett maszk elkészítésével kezdődik. A maszk egy üveglap, melyre elektrosztatikus elven készül el a rétegek negatív mintázata. Ez azt jelenti, hogy a mintázat ott ereszti át a fényt, ahol meg kell keményíteni a réteget. Ahol az UV fény nem érte a vékony polimer réteget, halmazállapota folyékony állapotú marad. Ez a folyékony polimer eltávolításra kerül, és helyét viasszal töltik ki, melyet hűtőlappal szilárdítanak meg. Méretre marást követően egy rétegvastagságnival süllyed az asztal. A folyamat a kész modell elkészültéig ismétlődik. Működési elvét a 15.19. ábra szemlélteti.



15.19. ábra. Réteges fotopolimerizáció

Az eljárás előnyei:

- gyors technológia;
- nincs szükség támasztékra;
- bonyolult geometria is előállítható;
- jó felületi minőség;
- a kész modell nagy tömörségű (mechanikai tulajdonságai jók).

Hátrányai:

- bonyolult szerkezet;
- zajos;
- nagy mennyiségű hulladék keletkezik;
- a kész modell nagy tömörségű (precíziós öntés miatt hátrány).

PolyJet - Polimer nyomtatás

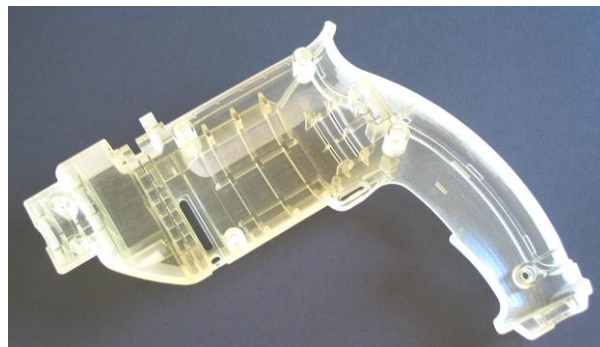
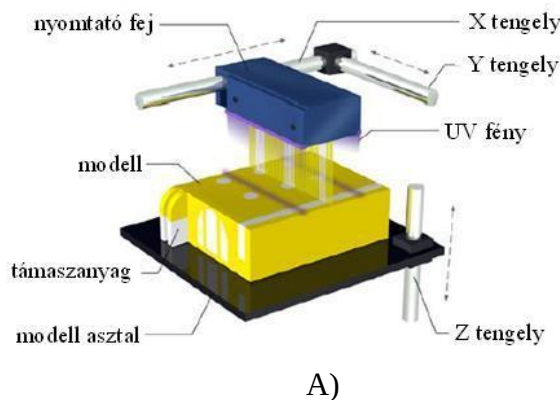
Több RP technológia előnyét egyesítették a PolyJet módszerrel. Az eljárás elve itt is a tintasugaras nyomtatás technológiájához hasonló, úgymint a 3DP nyomtatásnál. Azonban ez esetben nem ragasztóanyagot lövell ki a nyomtatófej, hanem közvetlenül a végleges modell anyagát (15.20. ábra). A prototípus felépítése ennél az eljárásnál is rétegről rétegre történik. Az alapanyag fényérzékeny polimer, melynek kikeményítése, megszilárdítása UV fény segítségével történik. Nyomtatás során támaszanyag létrehozásra is szükség van, ami a nyomtatás befejeztével vízzel oldható, eltávolítható. Az eddig ismertetett eljárások közül ezzel az eljárással lehet a legkisebb rétegvastagságot nyomtatni (16µm).

Az eljárás előnyei:

- a rétegvastagság ultravékony (16 µm);
- erős és rugalmas alapanyag;
- vékony falvastagságú modell gyártható (0,6 mm);
- sima felület.

Hátrányai:

- viszonylag drága berendezés;
- támaszanyag szükséges;
- csak fotopolimerek használhatóak, (tartós 40°C (napsütés) hatására kilágyulnak).



15.20. ábra. Polimer nyomtatás
A) Működési elv, B) Mintadarab

Az eljárás lehetővé teszi a több komponensű modellek készítését is. A második (vagy harmadik) komponens lehet eltérő színű, de eltérő anyagú is. Az anyagválaszték rugalmas, gumi jellegű anyagot is tartalmaz (15.21. ábra).



15.21. ábra. PolyJet eljárással készített több komponensű és rugalmas prototípus

15.3. CAM rendszerek

A CAM (computer aided manufacturing) rendszerek feladata, hogy kapcsolatot teremtsenek a CAD rendszerek virtuális világa és a valós alkatrészek gyártása között. Egy alkatrész gyártási folyamatának megtervezése számos lépésből áll, melynek ismertetése túlmutat jelen tananyag keretein. A CAM rendszerek ezen tervezési feladatok közül két részfeladatot oldanak meg, a szerszámpálya tervezést, valamint az NC program elkészítését.

A CAM rendszerek tehát NC, vagyis számjegy vezérlésű szerszámgépek vezérlő programjainak előállítására képesek. Az NC vezérlésű gép technológiai szempontból sokféle lehet: esztergagép, marógép, huzal elektródás szikraforgácsoló gép, tömbelektródás szikraforgácsoló gép, lézer / plazma / vízsugaras vágó gép, köszörű gép, lemezmegmunkáló gép stb. A CAM rendszerek legjelentősebb alkalmazási területe a marógépek, megmunkáló-központok NC programjainak előállítása.

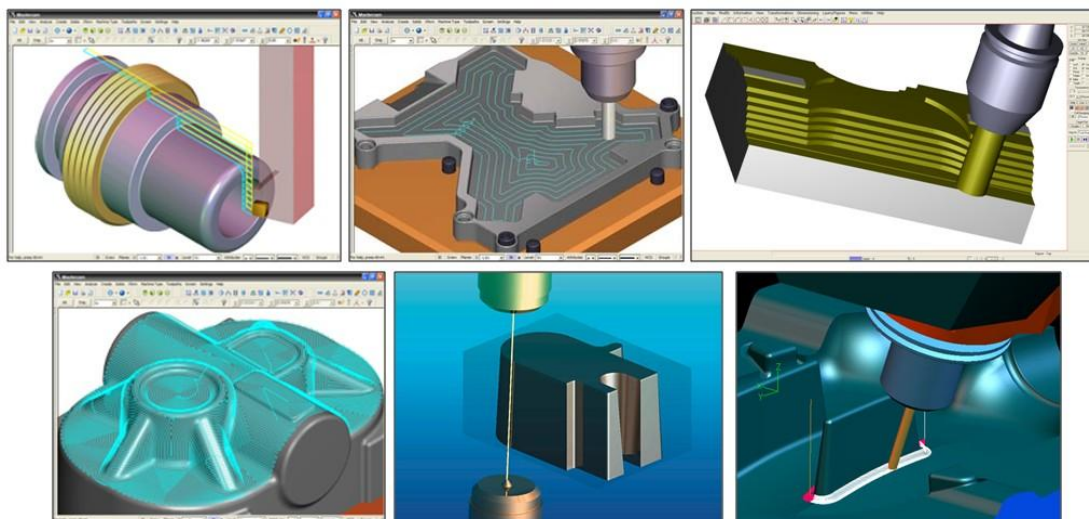
CAM rendszerek képességének jellemzésére a megmunkálás típusa mellett a megmunkálás dimenzióját használjuk. A megmunkálás – vezérlés – dimenzió száma az egyidejűleg mozgott tengelyek, lineáris vagy forgó elmozdulási lehetőségek számát adja meg.

E felosztás szerint léteznek 2D-s CAM mozgáspálya típusok, melyek két koordináta tengely mentén történő egyidejű forgácsoló megmunkálást tesznek lehetővé. 2D-s mozgáspályákat tipikusan esztergálás esetén alkalmazunk vagy vágó gépek esetén (lézer, plazma, vízsugár, huzal elektródás szikraforgácsolás).

2.5D-s mozgáspályák esetén két tengely mentén történik megmunkáló mozgás, a harmadik tengely mentén pedig fogásvételt végzünk, majd egyszerűbb esetben ugyan azt a szerszámpályát ismételjük meg, vagy egy eltérő kontúr mentén végzünk mozgást. 2.5D-s mozgásciklusok közé tartoznak a síkmarási ciklusok, a teraszoló nagyoló marási ciklusok, vagy a teraszoló simító marási ciklusok.

3D-s mozgáspályák esetén három tengely mentén történik forgácsoló megmunkálás. Szoborszerű felületek simító marásának mozgásciklusai tartoznak ebbe a körbe.

Huzalelektródás szikraforgácsolás esetén beszélhetünk 4D-s megmunkálásról, amikor az alsó és a felső huzalvezető különböző síkgörbe mentén mozoghat, így tetszőleges vonalfelületet lehet elkészíteni.



15.22. ábra. CAM alkalmazások (nagyoló hosszesztergálás, zsebmarás, teraszoló nagyoló marás, simító felület marás, huzalelektrodás szikraforgácsolás, 5D-s felület marás)

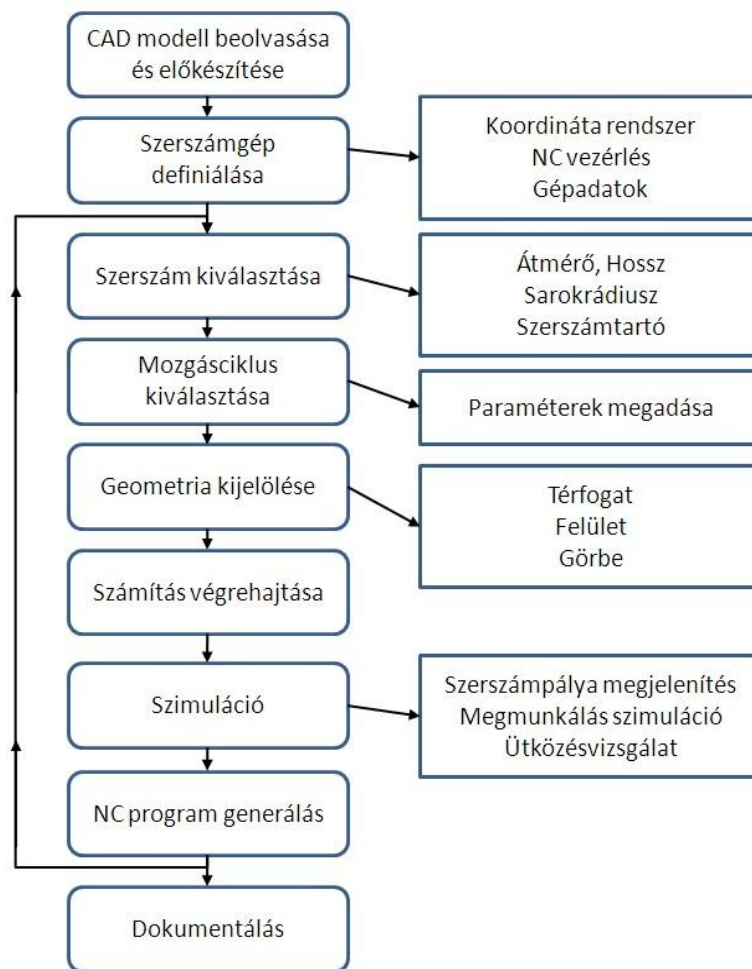
5D-s mozgásciklusokat elsősorban 5D-s marás során alkalmaznak, ahol az XYZ lineáris tengelyek menti elmozdulás mellett további két tengely menti elfordulást (billentést) lehet megvalósítani.

További sok dimenziós, sok tengely menti egyidejű elmozdulási lehetőség megvalósítására alkalmas mozgáspályákat, vezérléseket elsősorban bonyolult megmunkáló gépeken (pl. többorsós eszterga központok, szerszámköszörű) illetve ipari robotok esetén alkalmazhatunk.

A 15.23. ábra az általános CAM folyamatot mutatja. Egyes rendszerekben a különböző információ elemeket eltérő sorrendben adhatjuk meg, azonban ez a lényegi lépéseket nem érinti.

Az első lépés a CAD modell beolvasása a CAM rendszerbe, melynek problémáiról a 13. fejezetben szóltunk. Gyakori feladat a CAD modell módosítása, mely során elfedjük vagy eltüntetjük azon geometriai elemeket, melyeket nem kívánunk megmunkálni az adott szerzőgépen, felfogásban és zavaróak lehetnek a megmunkálás tervezése során (pl. felületen lévő furatok). Ezt a geometriai előkészítés vagy a beolvasás előtt a CAD rendszerben kell megtenni, vagy a CAM rendszer biztosít rá lehetőséget. A modell előkészítésének utolsó lépése az előgyártmány definiálása, vagyis a művelet² végrehajtása előtti alkatrész állapot definiálása.

² Művelet a gyártási folyamat önmagában befejezettnek tekinthető, megszakítás nélkül végzett szakasza. A művelet a gyártási folyamat tervezési és szervezési egysége, amely több *műveletelemből* áll. Forgácsolástechnológiában műveletnek nevezzük az egy gépen, egy felfogásban végrehajtott magmunkálások összességét. [4]



15.23. ábra. CAM folyamat

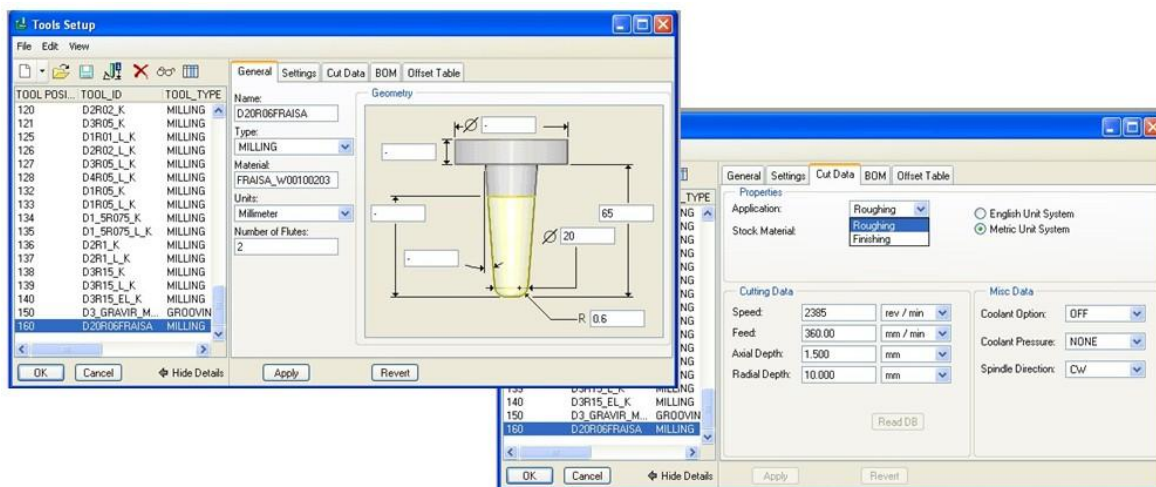
A következő lépés a szerszámgép és a gyártási környezet definiálása, ami több részből áll. Egyrészt definiálni kell a megmunkálás munkadarab koordináta rendszerét, melyben az NC program értelmezhető illetve ehhez kapcsolódó biztonsági síkokat. Általában kétféle biztonsági sík adható meg. Az egyik azt a szintet határozza meg, ameddig a szerszámpálya tervezés során az összekötő mozgások során a szerszám kiemelése történik. A másik típusú biztonsági sík a 3D-s gyorsjáratú mozgásokat határolja, e sík alatt ilyen mozgások tiltottak. Sok CAM rendszerben a két típus nem válik el, csak egy biztonsági sík definiálható. A gyártási környezet definiálása során másrészt ki kell választani az NC vezérlés típusát, mivel a különféle típusú vezérlők NC programnyelve eltérő lehet. Harmadrészt megadhatók azon szerszámgép adatok, melyek hatással lehetnek a generált mozgáspályára, mint például a gép mozgástartománya vagy a fordulatszám és előtolás tartománya.

Ezen előkészítő tevékenységek után kezdődik az egyes műveletelemek³ definiálása.

Első lépésként meg kell adni a kiválasztott szerszám adatait. A szerszámpálya tervezés szempontjából releváns szerszámadatok marás – mint legelterjedtebb alkalmazás - esetén a következők: szerszám átmérő, sarokrádiusz, szerszám hossz. A többi adat (pl. élgeometria, fogszám, felépítés, anyag, bevonat) nem játszik szerepet a szerszámpálya számítás során. A

³ Műveletelem a művelet különválasztható és külön elemezhető, tervezhető eleme. Forgácsolástechnológiában az egy szerszámmal geometriailag és technológiailag összefüggő ráhagyási alakzat eltávolítását nevezzük műveletelemnek. [4]

CAM rendszerekben lehetőség van a szerszámgépen alkalmazott szerszámokból szerszám adatbázist szervezni, amely a geometriai paraméterek mellett a forgácsolási paramétereket is tartalmazza akár többféle anyagra és megmunkálási fokozatra (nagyolás, simítás).



15.24. ábra. Szerszám adatainak megadása a Pro/Engineer rendszerben

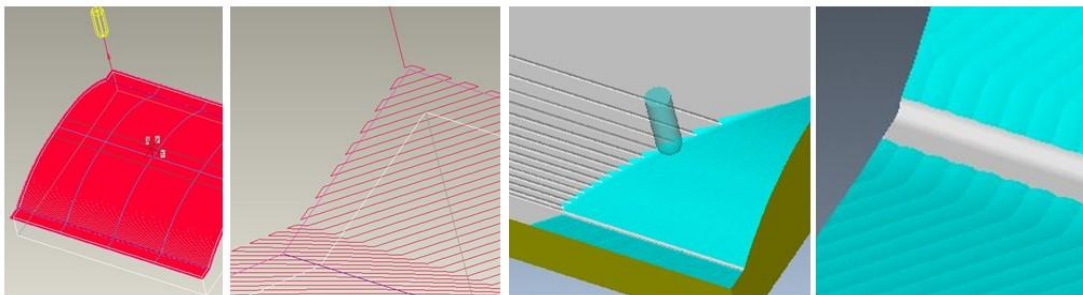
A következő lépés a mozgáspálya stratégia kiválasztása, mely meghatározza a mozgásciklus alapvető tulajdonságait. A kiválasztás után meg kell adni a stratégia paramétereit, melyek meghatározzák a szerszám mozgáspályájának geometriai és technológiai részleteit. Egy marási feladatokra kifejlesztett CAM rendszer általában a következő mozgáspálya típusokat tartalmazza:

- Nagyoló térfogat marás
- Teraszoló simítás (meredek felületek simítása)
- 3D felület simítás
- Maradékanyag eltávolítás
- Síkmarás
- Zsebmarás
- Gravírozás
- Trajektória marás
- Fúrás

A stratégia kiválasztása után meg kell adni azon geometriai elemeket, melyeken a stratégiát értelmezni szeretnénk. A geometriai elem típusa függ a kiválasztott stratégiától:

- Görbe: trajektória marás, gravírozás;
- Tengely: fúrás;
- Felület: 3D felület simítás, teraszoló simítás, síkmarás, zsebmarás, nagyoló térfogat marás;
- Térfogat: nagyoló térfogat marás, zsebmarás.

CAM rendszertől függően a geometriai elemeket kijelölhetjük a CAD modellen, vagy külön megmunkálási geometriai elemeket hozhatunk létre.



15.25. ábra. Mozgáspálya szimuláció szerszámpálya megjelenítésével és geometriai szimulációval

Az adatok megadása után végrehajtjuk a számítást, majd szimulációval ellenőrizzük az eredményt (15.25. ábra). A szimuláció legegyszerűbb módja a szerszámpálya megjelenítése, ahol a szerszám vezérelt pontjának útvonalát láthatjuk. Ennél több információt nyújt a geometriai szimuláció, ahol láthatóvá válik a létrejövő munkadarab geometria, ellenőrizhető a megmunkált felület és az adott szerszámmal nem hozzáférhető régiók. A szimuláció során a munkadarab és a szerszám mellett lehetőség van a teljes szerszámgép megjelenítésére is, amely különösen 5D-s marási feladatok esetén nélkülözhetetlen. A szimuláció további aspektusát jelenti az ütközés vizsgálat, amely során azt ellenőrizzük, hogy a szerszám és szerszámbefogó rendszer ütközik-e a munkadarab nem megmunkált felületeivel, a munkadarab befogó készülékkel illetve a szerszámgéppel.

A számítás eredményeként a mozgáspálya NC vezérlés független leírása jön létre, melyet át kell fordítani, konvertálni az NC vezérlésnek megfelelő NC programmá. Ez a folyamat a posztprocesszálas, vagyis utófeldolgozás. Az így előállított program már alkalmas a szerszámgép vezérlésébe való betöltésre és futtatásra. A posztprocesszálas után egy újabb műveletelem megadásával folytathatjuk a művelet programozását. A 15.3. táblázat ugyan annak a mozgáspálynak a vezérlés független és a vezérlés függő változatának egy részletét mutatja.

15.3. táblázat. Vezérlés független és vezérlés függő program részlet

<pre> \$\$\$* Pro/CLfile Version Wildfire 4.0 - C000 \$\$-> MFGNO / TET_SURF_MILLINGPARTNO / TET_SURF_MILLING \$\$-> FEATNO / 13MACHIN / MILL, 1 \$\$-> CUTCOM_GEOMETRY_TYPE / OUT- PUT_ON_CENTERUNITS / MMLOADTL / 160 \$\$-> D20 R0.6 Fraisa \$\$-> CUTTER / 20.000000 \$\$-> CSYS / 1.000, 0.000, 0.000, 0.000, \$ 0.000, 1.000, 0.000, 0.000, \$ 0.000, 0.000, 1.000, 0.000 SPINDL / RPM, 2385.000000, CLW RAPID FROM / 110.300, 0.000, 10.000 \$\$-> SETSTART / 110.300, 0.000, 10.000 RAPID GOTO / 110.300, 0.000, -6.000 FEDRAT / 180.000000, MMPM GOTO / 110.300, 0.000, -9.500 FEDRAT / 360.000000, MMPM GOTO / 5.000, 0.000, -9.500 GOTO / 5.000, 7.200, -9.500 GOTO / -4.700, 7.200, -9.500 GOTO / -4.700, -7.200, -9.500 GOTO / 5.000, -7.200, -9.500 </pre>	<pre> N10 (=====) N20 (= cPost Standard PP for FANUC 11M =) N30 (=====) N40 G90 G17 G40 N50 (===== TOOL CHANGE =====) N60 (DESC :D20 R0.6 Fraisa) N70 (=====) N80 T030T0M6 N90 G91 G28 Z0. M6 N100 G0 G90 S2385 M3 N110 G0 X110.3 Y0.0 Z10.0 N120 G0 Z-6.0 N130 G1 Z-9.5 F180 N140 G1 X5.0 F360 N150 Y7.2 N160 X-4.7 N170 Y-7.2 N180 X5.0 </pre>

Valamennyi műveletelem definiálása után az utolsó lépés a technológiai dokumentáció elkészítése, melyben a szerszámgép kezelője számára meg kell adnunk a nullpont helyzetét, a koordináta tengelyek irányát, az egyes NC programok sorszámát, nevét, a szerszám azonosítóját, esetleg a forgácsolási paramétereket és a műveletelem idejét. A különböző CAM rendszerek a dokumentálás folyamatát eltérő módon támogatják, a teljesen automatikus dokumentum készítéstől az egyszerű adatlekérésig és manuális dokumentum készítésig terjed a kínálat.

15.4. Irodalom

- [1] 3D printer - alapanyagok a 3D nyomtatáshoz. Digit Számítástechnikai Kereskedelmi Bt; <http://digit.hu/3d/3d-anyagok.html>
- [2] Andres Gebhardt: Rapid prototyping: Werkzeug für die schnelle Produktenwicklung; Carl Hauser Verlag München 1996.
- [3] Czvikovszky Tibor, Nagy Péter, Gaál János: A polimertechnika alapjai; Műegyetemi kiadó, Budapest, 2003.
- [4] Szegh Imre: Gyártástervezés; Műegyetemi kiadó, Budapest 1996.