



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS

VARGA BÁLINT

Szabadformájú mart felületek mikro- és makro pontosságának vizsgálata

Témavezető: Dr. habil. Mikó Balázs

ANYAGTUDOMÁNYOK
ÉS TECHNOLÓGIÁK
DOKTORI ISKOLA

Budapest, 2023. 05. 06.

Komplex vizsga bizottsága:

Elnök:

Professzor Dr. Ruzinkó Endre, egyetemi tanár

Tagok:

Dr. Palásti Kovács Béla, nyugalmazott címzetes egyetemi tanár

Dr. Takács Erzsébet, emeritus kutató professzor, MTA EK

Dr. Czifra György, mestertanár

Nyilvános védés bizottsága:

Elnök:

Dr. Réger Mihály, DSc egyetemi tanár

Titkár:

Dr. Varga Péter, PhD egyetemi adjunktus

Tagok:

Dr. Takács Márton, PhD egyetemi docens

Dr. Gonda Viktor, habilitált egyetemi docens

Dr. Czifra Árpád, PhD egyetemi docens

Bírálok:

Dr. Felhő Csaba, PhD egyetemi docens

Dr. Gyurika István, PhD egyetemi docens

Nyilvános védés időpontja

2023.

TARTALOMJEGYZÉK

RÖVIDÍTÉSEK ÉS JELÖLÉSEK JEGYZÉKE.....	6
1 BEVEZETÉS	8
2 SZABAD FORÁMJÚ FELÜLETEK JELLEMZÉSE.....	11
2.1 Szabad formájú felületek definiálása	11
2.2 Szabad formájú felületek általános gyártási eljárásai	15
2.3 Szabad formájú felületek elemzési szempontjai	17
2.3.1 Felület alakja.....	17
2.3.2 Szerszám tulajdonságok.....	18
2.3.3 Szerszám pálya	19
2.3.4 Forgácsolási paraméterek	22
2.3.5 Forgácsleválasztás	23
2.3.6 Pontosság	30
3 FELHASZNÁLT ESZKÖZÖK ÉS MÓDSZEREK.....	36
3.1 Kísérletek megvalósításának folyamata.....	36
3.2 Tesztalkatrész anyaga.....	39
3.3 Szerszám pálya tervezése.....	39
3.4 A megmunkáló szerszám	39
3.5 Teszt felület előkészítése és gyártása.....	40
3.6 Érdesség, alakpontosság és erőmérés.....	45
3.6.1 Felületi érdesség mérése	45
3.6.2 Méret és geometria mérése	46
3.6.3 Erő mérése	47
4 FORGÁCSALAK CAD MODELLEZÉSE GÖMBVÉGŰ MARÓVAL TÖRTÉNŐ MARÁS ESETÉN	49
4.1 Forgácsalak geometriai meghatározása.....	49
4.2 Eredmények.....	53

4.3	Regresszió analízis	58
4.4	Következtetések	63
5	A MINTAVÉTELEZÉSI PONTOK SZÁMÁNAK MEGHATÁROZÁSA A GEOMETRIAI HIBÁK MÉRÉSÉHEZ	64
5.1	A pontok számának meghatározása	64
5.2	Eredmények.....	68
5.3	Következtetések	72
6	A SZERSZÁMPÁLYÁK HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA A FELÜLETPONTOSSÁGRA	74
6.1	Különböző simító szerszámok, marási stratégiák vizsgálata	74
6.2	Eredmények.....	78
6.3	Következtetések	89
7	A FORGÁCSOLÓERŐ ÉS A FELÜLETI PROFIL HIBÁJÁNAK VIZSGÁLATA	91
7.1	A forgácsolóerő vizsgálata.....	91
7.2	Eredmények.....	93
7.3	Következtetések	98
8	ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK – TÉZISEK.....	100
9	ÖSSZEFOGLALÁS	103
	KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	105
	PUBLIKÁCIÓK	106
	IRODALOMJEGYZÉK	108
	TÁBLÁZATJEGYZÉK.....	114
	ÁBRAJEGYZÉK.....	115
	MELLÉKLET.....	1

RÖVÍDÍTÉSEK ÉS JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

CAM	Computer Aided Manufacturing – Számítógéppel segített gyártás
CAD	Computer Aided Design – Számítógéppel segített tervezés
CNC	Computer Numerical Control – Számítógépes vezérlés
CWE	Cutter-Workpiece Engagement – Munkadarab szerszám érintkezés
FFSM	Free Form Surface Milling – Szabad formájú felület marás
BPNN	back-propagation neural network – neurális háló egyik fajtája
NoP	mérési pontok száma a mintavételezés során
DOF	Degree Of Freedom – Szabadságfokok száma
CMM	Coordinate Measuring Machine – Koordináta mérőgép
x, y	szerszám helyzetének koordinátái
v_c	Forgácsoló sebesség [m/min]
v_f	Előtoló sebesség [mm/min]
f	Előtolás [mm]
f_z	Fogankénti előtolás [mm]
z	Fogszám [db]
a_e	Oldallépés [mm]
a_p	Fogásmélység [mm]
N, n	Fordulatszám [1/min]
D_c	Szerszámátmérő [mm]
F_c	Főforgácsolóerő [N]
F_f	Előtolás-irányú erő [N]
F_p	Fogásvétel-irányú erő [N]
F	Eredő erő [N]
F_x	X tengely irányú erő

F_y	Y tengely irányú erő
F_z	Z tengely irányú erő
CX	Konvex
CV	Konkáv
R_a	Átlagos felületi érdesség [μm]
R_z	Egyenetlenség magasság [μm]
V	Térfogat [mm^3]
A	Felület [mm^2]
h_m	Átlagos forgácsvastagság
A_f	Marás irányának szöge [$^\circ$]
R	Hengeres felület sugara [mm]
Cyl	Hengeresség
SP, SPR	Felület profilhibája
rR	Mért sugár értéke és a referenciaérték aránya
MilDir	Marási útvonal iránya
D	Egyenirányú marási szakasz
U	Ellenirányú marási szakasz

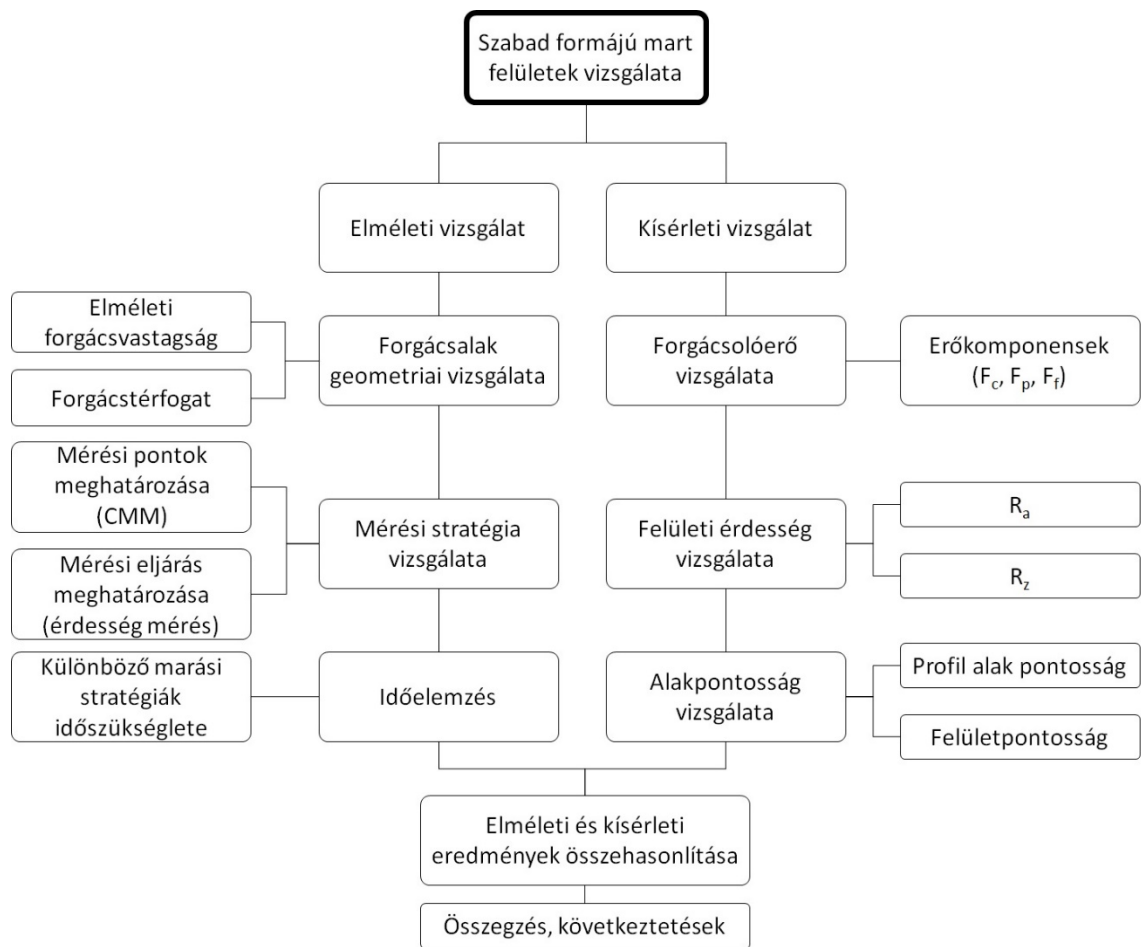
1 BEVEZETÉS

Értekezésem témája a szabadformájú mart felületek mikro- és makro pontosságának vizsgálata. A mai életben nagyon sok helyen találkozhatunk szabadformájú felületekkel, a gépjármű alkatrészektől kezdve a mindennapi használati tárgyakig bezárólag szinte bárhol. A szerszámtervezésben az öntőformák kialakításán keresztül a szél- és vízerőművek turbina lapátjának alakján át a szárnyfelületek aerodinamikai kialakításáig rengeteg területen használják ezeket a felületeket. Ugyanakkor a szabad formájú felületek megmunkálása a forgácsoló ipar számára az egyik legnagyobb kihívást jelentő terület. A legyártott alkatrészeknek rengeteg felhasználói igénynek, technológiai- és egyéb követelménynek kell megfelelnie. Ilyen lehet például esztétikai, ergonómiai, áramlástechnikai vagy formatervezési igény. A műszaki követelmények folyamatosan nőnek, egyre nagyobb pontossággal kell elkészíteni ezeket a felületeket mind érdesség, mind pedig alakpontosság szempontjából. Az eddig felsorolt elvárások mellett természetesen termelékenységi és gazdaságossági szempontoknak is meg kell felelni.

A gyártási folyamat megtervezése összetett feladat. Figyelembe kell venni a gyártáshoz és a minőségellenőrzéshez rendelkezésre álló eszközöket. Egyes termékek gyakran nehezen megmunkálható anyagból készülnek, és bonyolult geometriával rendelkeznek. Ezek a tényezők megnehezítik a gyártás tervezését.

A szabad formájú felületek forgácsolással történő előállítása gömbvégű marószerszámmal, 3 vagy 5 tengelyes marással történik. A gyártáshoz szükséges szerszám pályák létrehozásához minden esetben elengedhetetlen egy CAM (Computer Aided Manufacturing) szoftver alkalmazása. Különböző megmunkálási stratégiával különböző szerszám pályák állíthatók elő, melyek hatással vannak a termelékenységre és a pontosságra. Egy felület pontosságát három szempont szerint szokás vizsgálni, ezek a méretpontosság, az alakpontosság és a felületi érdesség.

Az értekezés a gömbvégű marószerszám segítségével előállított szabadformájú felületek pontosságának elméleti és kísérleti vizsgálatát tárgyalja (1. ábra). A felületek ilyen módon történő megmunkálásának számos szempontja van, melyek nagy része vizsgálatra is került. A vizsgált szempontok kiválasztása a hazai és a külföldi szakirodalom kutatásán alapult.



1. ábra: A vizsgálat folyamata

Az értekezésben ismertetem a szabad formájú felületek geometriai jellemzőit. Ebben a részben azok tulajdonságai, létrehozása és ipari felhasználása van részletezve. Ezt követi az ilyen felületekkel rendelkező alkatrészek előállításának, az alkalmazható technológiák jellemzése. Az irodalmi áttekintésben, egy csoportosítást követően részletesen vizsgálom a szakirodalomban található különböző, szabad formájú felületek megmunkálásával, mérésével, pontosságával kapcsolatos szempontokat, kutatási irányokat és eredményeket. A kutatás során elvégzett vizsgálatok ismertetése, a kapott adatok elemzése és azok alapján a következtetések levonása a következő rész.

Elméleti vizsgálatok során elemzem a geometriai modellezéssel előállítható elméleti forgács tulajdonságokat, az alakpontosság megállapításához szükséges és elégséges mérési pontok számát. A kísérleti vizsgálatok során a CAM rendszerben beállítható szerszám pályák, technológiai paraméterek vizsgálata volt a fő kutatási szempont. Elemeztem továbbá a marás során ébredő erőket és azok hatását. Mindezeket a felületi pontosságra gyakorolt hatása tekintetében értékeltem. A kísérleti szakasz, több fázisban,

hosszabb idő alatt valósult meg, ezek bemutatása nem időrendben történik, hanem logikai sorrend alapján. A kísérleteket a Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Gépészeti és Technológiai Intézetében (korábban Anyag- és Gyártástudományi Intézet) folytattam. A tézisek ismertetése, az összefoglalás és a további kutatások ismertetése zárja az értekezésem.

A kutatás célja szabad formájú felületek gömbvégű maróval történő megmunkálásának technológiai vizsgálata, mely kiterjed a felületek dimenzionális és geometriai pontosságára, a felületi érdességre. A technológiai szempontú megközelítés azt jelenti, hogy a kutatás során olyan vizsgálatokat és elemzéseket végzek, melyek segítik a technológiai tervezés folyamatát, támogatják a technológus mérnök CAM rendszerben végzett szerszámpálya tervezési munkáját. A kutatás eredményei támogatják a CAM rendszerek hatékonyabb használatát, segítenek olyan szerszámpályákat kiválasztani, melyek pontosabb és hatékonyabb megmunkálás tesznek lehetővé.

2 SZABAD FORMÁJÚ FELÜLETEK JELLEMZÉSE

A mindennapi életben szinte mindenki találkozhatott már szabad formájú felületekkel. Gondoljunk csak egy autó karosszériájára vagy egy ergonomikusan megtervezett irodai székre. A szabad formájú felületek vagy ilyen felületekkel határolt tárgyak használata folyamatosan bővül (2. ábra). Egyes termékek alkalmazása során felmerülő igényeknek, melyek lehetnek aerodinamikai, áramlástechnikai, ergonómiai vagy éppen esztétikai igények, csak a szabad formájú felületek alkalmazásával lehet eleget tenni. Ilyen felületeket kell létrehozni az öntő-, sajtoló- és műanyag fröccsöntő szerszámok legyártása során. A gépgyártás számos területén, jármű-, repülő- vagy éppen a műanyagiparban egyre jobban előtérbe kerülnek a szabad formájú felületek.

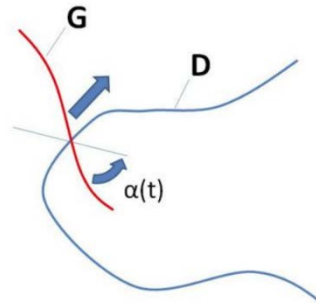


2. ábra: Szabad formájú felületek felhasználásának példái

2.1 Szabad formájú felületek definiálása

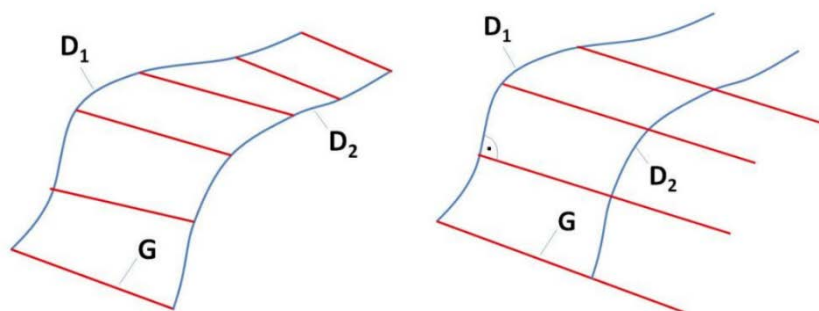
A műszaki gyakorlatban a szabad formájú felületeknek többféle értelmezése is elterjedt. Amikor analitikus felületek (matematikailag egyszerűen megadható felületek, mint a sík, gömb, henger vagy kúp) segítségével nem tudjuk leírni a bonyolult alkatrészek határolófelületeit, akkor kell alkalmazni az úgynevezett bonyolult vagy szabad formájú felületeket. Ezeknek három csoportja van: translációs felület, vonalfelület vagy szoborfelület [1].

A translációs felületek síkbeli nyitott vagy zárt görbe (D) mentén elmozduló másik görbe (G) segítségével hozhatók létre. Az ilyen felület megadásához tehát két görbét kell megadni. Analitikus felületek is megadhatók ezzel a módszerrel, mint például a sík, gömb, henger, kúp stb. [1].



3. ábra: Transzlációs felület létrehozása [1]

Vonalfelület egy generátor (G) térgörbe és két másik térgörbe (D1, D2) segítségével generálható. Előállításának több módja lehetséges, melyet a 4. ábra szemléltet. Az ábra bal oldalán látható esetben az egyenes generátorgörbe a két másik görbén úgy halad át, hogy D1 és D2 kezdőpontjából egyszerre indul és a végpontokba egyszerre érkezik meg. A jobb oldalon látható esetben az egyik görbének kitüntetett szerepe van (jelen esetben D1), melyre a generátoregyenes mindig merőleges. További típusok is előállíthatók, ha a generátorgörbe nem egyenes vagy ha a generátorgörbe a másik görbe mentén folyamatosan változtatja alakját [1].



4. ábra: Vonalfelület generálása [1]

A szoborszerű felület sem analitikusan-, sem pedig görbék mozgásával nem állítható elő. Az ilyen felület létrehozására többféle módszer is létezik, melyekben az a közös, hogy térbeli ponthálóra simítják a felületet [1].

Parametrikus felületek polinomok segítségével írhatók le:

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

ahol:

$\vec{r}(u, v)$: vezérlőpontok

u, v : paraméterek

Ezek a polinomok súlyfüggvények és vezérlő pontok segítségével állíthatók elő.

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

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

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

A legismertebb ilyen matematikai függvény a Pierre Bézier által meghatározott görbe (Spline).

$$p(u) = p_0(1 - 3u + 3u^2 - u^3) + p_1(3u - 6u^2 + 3u^3) + p_2(3u^2 - 3u^3) + p_3(u^3)$$

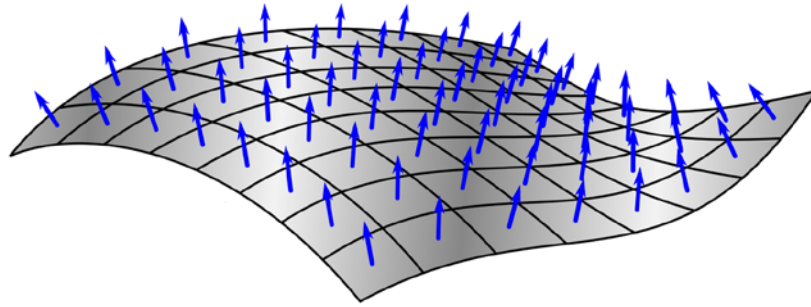
ahol:

p : a sokszög ellenőrzési pontja

u : 0-1 paraméter

Számos egyenlet létezik a Spline-ok létrehozására, melyből talán a NURBS (non-uniform rational Bspline) a legismertebb. A 3D-s felületek létrehozása nagyon hasonló, csak eggyel több tengelyt kell használni, mint a görbénél [1].

A szabad formájú felületek jellemzése a felület adott pontjára állított, a felületre merőleges irányú vektor segítségével is történhet, ami egy nullvektortól eltérő vektor. Ez a felület „normálisa”, azaz a felület normálvektora (5. ábra). Az ilyen felületeknél a vektor iránya minden egyes pontban más és más lehet. Egy síkfelület esetében ez az irány a felület minden pontjára nézve ugyanaz. Az értekezésemben a felületek jellemzése a normálvektoruk segítségével történt [4].



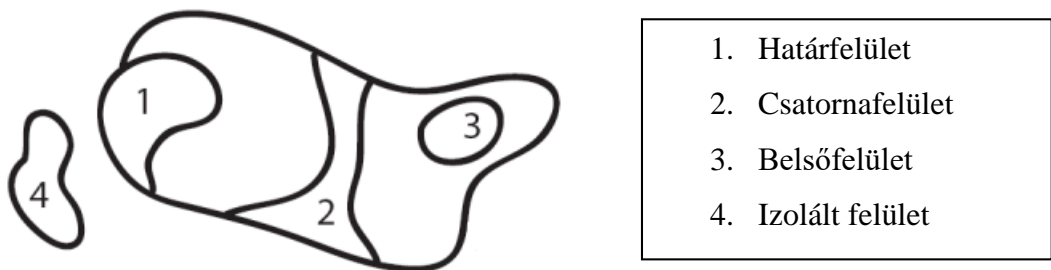
5. ábra: A felületek normálvektora¹

A szabad formájú felületeket különböző szempontok szerint lehet jellemezni, mellyel több kutató is foglalkozik. Poldermann és társa a szabad formájú felületeket négy osztályba sorolta funkciójuk szerint:

1. Elsődleges felület
2. Módosító vagy másodlagos felület
3. Segédfelület
4. Átmeneti felület

Az elsődleges felületi jellemző globális alakot ír le, míg a másodlagos felületi jellemző módosíthatja azt. A segédfelületi jellemzők közé tartoznak a mechanikai jellemzők. Az átmeneti felületi jellemző pedig a folytonosságot vizsgálja [2].

Nyirenda és társai egy általános taxonómiát mutatnak be a szabad formájú felületek jellemzésére. Objektum és jellemzőorientált hierarchiákat használnak az egyedi jellemzők bemutatására, majd tovább osztályozzák őket jellegük alapján. Így a szabad formájú felületek felbonthatók összetevőkre, melyek a következők [3]:



6. ábra: Szabad formájú felületek felosztása [3]

¹ https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Normal_vectors_on_a_curved_surface.svg

A szabad formájú felületek létrehozása az ipari formatervezés egyik legnagyobb kihívást jelentő területe. A felületeket előállítására CAD rendszerek segítségével történik, melyek a korábban leírt matematikai összefüggéseket használják. Az 1960-as évek közepétől a CAD rendszerek robbanásszerűen terjedtek el a világban. Használatuk vitathatatlan előnyökkel járt, mert egzakt módon tudták leírni és tárolni a szabad formájú felületeket [5].

Nem mindegyik CAD rendszer rendelkezik felületmodellező modullal, ha igen, akkor sem egyszerű feladat a bonyolult geometriák létrehozása. Szabad formájú felületekkel rendelkező tárgyak definiálásához nem elég síkbeli görbékkel létrejövő felületeket létrehozni, valódi térbeli görbéket kell alkalmazni. Görbék teljes hálózatát kell megalkotni, majd ezekre kell felületeket illeszteni [6][7].

A CAD rendszerek megjelenése nagymértékben megkönnyítette a felhasználók munkáját, mivel a felületek létrehozásához csak a programot kellett tudni kezelni, a mögöttes matematikai műveleteket a számítógép végzi el. Ma és társai [8] bemutatják a szabad formájú felületek konstrukciójának és rekonstrukciójának problémáit. Vizsgálják a felületek valós és az elméleti pontjai közötti különbségeket, a geometriai hibát.

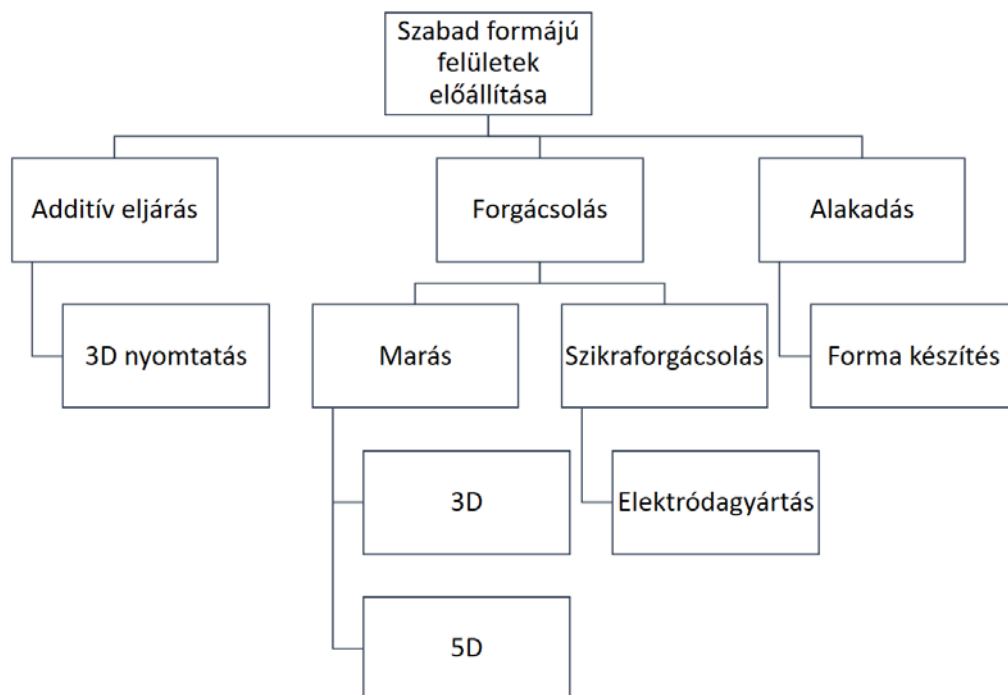
A szabad formájú felületek létrehozásának másik módja a szkenneléses eljárás. A szkennelés során egy már meglévő tárgy felületének pontjait letapogatjuk és digitalizáljuk. Az így kapott pontfelhőre felületet lehet illeszteni megadott tőrésel. A létrejött felületet CAD szoftver segítségével tovább tudjuk alakítani, amennyiben erre szükség van.

2.2 Szabad formájú felületek általános gyártási eljárásai

Szabad formájú felületek előállítására történhet additív vagy szubtraktív eljárás segítségével. Additív (felépítő) eljárásról akkor beszélünk, amikor a készítendő alkatrészt vékony rétegek létrehozásával és ezek egymásra építésével állítjuk elő. Az 1980-as években fejlesztették ki ezt a technológiát, a gyors prototípusgyártást. Mivel az alkalmazás túllépett a prototípus gyártás keretein, manapság ezeknek a technológiák általánosságban 3D nyomtatásnak vagy pedig additív gyártási eljárásoknak nevezik. Sokféle egymástól nagyon különböző additív gyártási technológia létezik [9]. Az alapanyaga leggyakrabban polimer, de fémet és kerámiát is lehet nyomtatni. Alkalmazásuk még nem ipari méretekben történik, inkább prototípusalkatrészek gyártására alkalmazzák, de jelentőségük és alkalmazási területük rohamosan fejlődik

[10][11]. Szubtraktív vagy lebontó eljárás esetén anyagelvétellel hozzuk létre az alkatrészt. Ide tartoznak a különböző forgácsoló eljárások [12]. A forgácsolás mellett az alakadás a másik nagy terület, ahol szabad formájú felületeket alkalmaznak. Alakadás során többségében porkohászati termékek előállítása történik sajtolás segítségével, de ide sorolható az öntés vagy a képlékenyalakítás is. Ezeknél az eljárásoknál, magát a gyártást minden esetben megelőzi egy formaszerszám előállítása, amely forgácsolás segítségével történik. (7. ábra). Elmondható, hogy szabad formájú felületek alakadással történő előállítása során a forgácsolás művelete megkerülhetetlen. Forgácsolás történhet marással vagy pedig szikraforgácsolással. A szikraforgácsolás megkezdése előtt létre kell hozni egy réz vagy grafit elektródát, mellyel a kívánt formát ki lehet munkálni. Ehhez a művelethez marásra is szükség van, legyen az három vagy öttengelyes megmunkálás. Így kijelenthető, hogy a marás műveletét a szabad formájú felületek ipari körülmények között történő előállításához mindenképpen alkalmazni kell.

A szabad formájú felületek marással történő előállításának részletes ismertetése a következő fejezetben kerül kifejtésre.

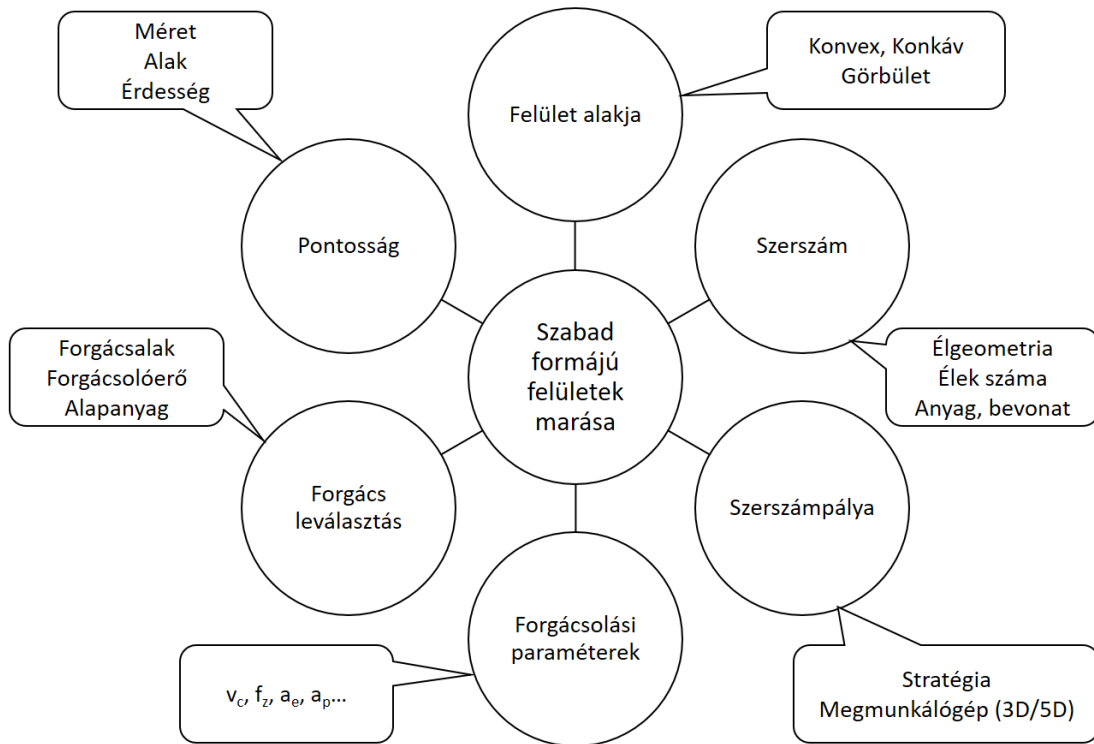


7. ábra: Szabad formájú felületek előállítása

2.3 Szabad formájú felületek elemzési szempontjai

A szabad formájú felületek vizsgálatát a szakirodalom sok szempont alapján tárgyalja (8. ábra). Ezeket a szempontokat a következők alapján lehet csoportosítani.

Minden egyes szempont más és más megközelítés szerint vizsgálja a felületeket és mindegyik szempont egy nagy témakört ölel fel. A következőkben ezeknek a részletes ismertetése következik.



8. ábra: Vizsgálati szempontok csoportosítása

2.3.1 Felület alakja

A szabad formájú felületek alakja nagyon változó lehet. Az egyes részeit fel lehet bontani konvex vagy konkáv részekre.

Egy testet határoló felületet akkor nevezünk konvexnek, ha bármely két tetszőleges pontját összekötő egyenes a testen belül halad. A konkáv felület esetén van olyan két pontot összekötő egyenes, ami a testen kívül halad.

A konvexitás mellett a felület görbületét is figyelembe kell venni. A görbület egy matematikai fogalom. Egy görbe mentén haladva, annak érintő-vektorai folyamatosan változnak és különböző irányúak. A görbület egy mérőszám, mely a görbe egyenestől való eltérését mutatja [13]. A görbület definíciója:

$$\lim_{a \rightarrow s_0} \frac{\Delta\alpha}{\Delta s} = \kappa(s_0)$$

ahol

κ	görbület
s, s_0	ívhossz szerinti paraméter
$\Delta\alpha$	a t_0 és t vektorok szöge
Δs	egyenlő a $s-s_0$ abszolút értékével

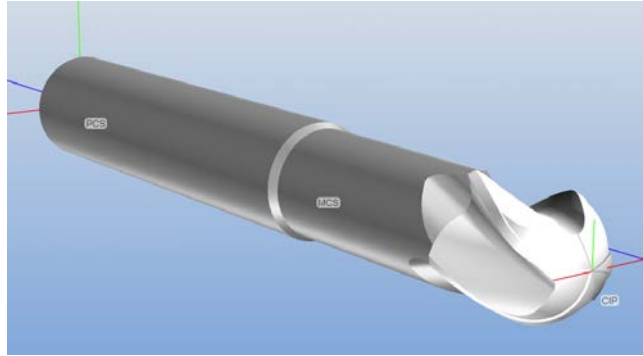
Egy egyszerű esetet figyelembe véve azt jelenti, hogy az R sugarú kör bármely pontjának a görbülete $1/R$.

Huo és társai [14] a felület alakja és normális vektora alapján határozzák meg az ideális szerszám pályát, amelyhez áramlástani módszert használnak. Käsemödel és társai [15] egy CAD/CAM algoritmus interfészt alkalmaznak egy szabadformájú felület vizsgálatára. Az alkalmazott algoritmus csökkenti a forgácsolóerőt, az érdességet és a megmunkálási időt.

2.3.2 Szerszám tulajdonságok

Ez a kutatási terület a szerszámokat vizsgálja szabad formájú felületek marása során, azok anyagát, élgeometriáját, éleinek számát, átmérőjét, bevonatát, a szerszámkopást és az éltartamot. Célja a legkedvezőbb szerszámkonstrukció létrehozása.

A marószerszám sokféle terhelésnek van kitéve forgácsolás közben, amely lehet mechanikai, termikus és kémiai igénybevétel. Mechanikai igénybevétel lehet statikus vagy pedig változó. A termikus igénybevétel alatt a szerszám hőterhelését értem, míg a kémiai igénybevétel lehet oxidáció és diffúzió.



9. ábra: Gömbvégű marószerszám²

A szerszám a következő anyagokból készülhet:

- ötvözetlen szerszámacél
- gyorsacél (HSS)
- keményfém
- kerámia

A szerszámbevonat a szerszámra felvitt vékony réteg, melynek fő feladatai az éltartam növelése, a súrlódás csökkentése, a kopás elleni védelem, a hőállóság növelése, a forgácsolóerő és a hőfejlődés csökkentése. A bevonatok alkalmazása nagymértékben javítja a szerszámok alkalmazhatóságát.

A szerszámok kopásának jelentős hatása van a felületi minőségre. A kopás során a szerszám elhasználódik, az ékhatása romlik, ezért a forgácsolóképesége gyengül. Ennek következtében a forgácsolás alatt a passzív erő növekszik, a munkadarab pontossága csökken, az élkopás miatt a felületi érdessége romlik.

Scandiffio és társai [17] a szerszám dolgozó részének változását vizsgálták megmunkálás közben. A szerszám dolgozó része a változó felületi dőlés miatt folyamatosan változik. Ez a paraméter jelentősen befolyásolja a munkadarab felületi minőségét.

2.3.3 Szerszámpálya

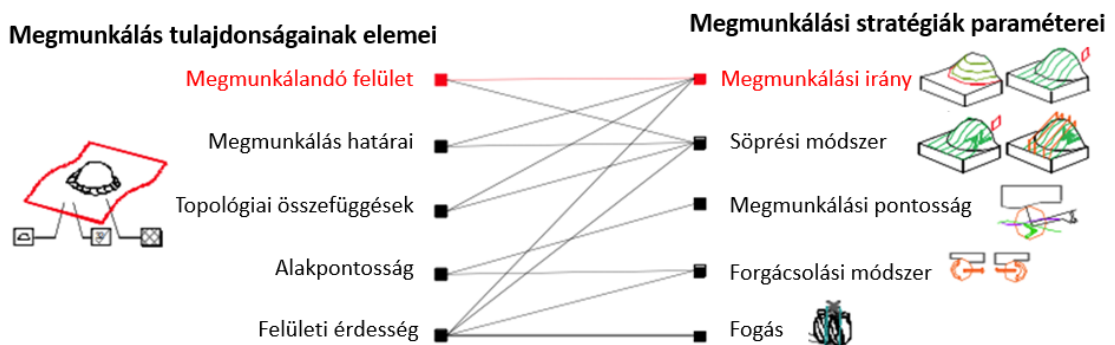
A CAM rövidítés jelentése számítógéppel segített gyártást takar. A CAM rendszerek olyan szoftverek, melyek segítségével CNC szerszámpályákat lehet generálni CAD

² <https://www.toolsunited.com/App/Article/ArticleDetailsPage/25076780922586590>

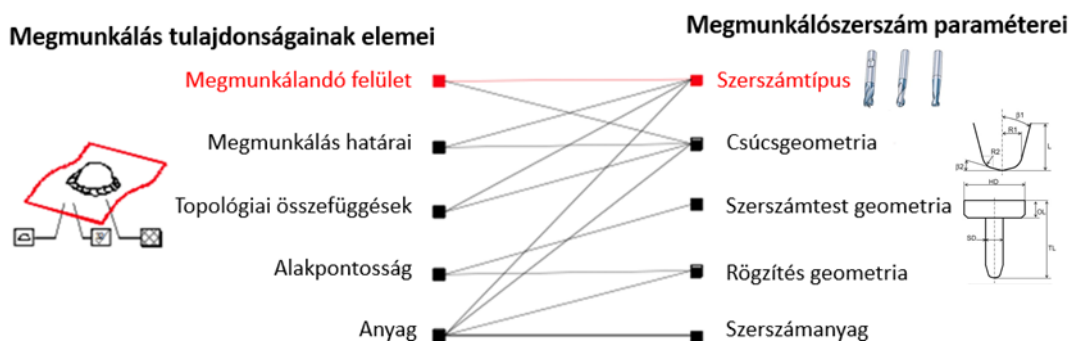
modellek alapján. Ezek alkalmazása nélkül a felületek marása nem lenne megoldható. A szabad formájú felületek előállításához általában három-, vagy öttengelyes megmunkálást alkalmaznak. A CAM szoftver lehetőséget ad különböző stratégiák kiválasztásához, melyekkel különböző szerszámpályák állíthatók elő [18][19][20]. Ezen a területen a CAM rendszerekben rejlő lehetőségeket vizsgálják [21].

Egy CAM-es szerszámpálya előállításához elengedhetetlen feltétel egy CAD modell, mely tartalmazza az előgyártmányt és a kész munkadarabot. Definiálni kell a megmunkáló szerszámot, a technológiai paramétereket, a megmunkálás adott fázisában a megmunkálni kívánt felületeket, a végén pedig illeszteni kell egy megmunkáló gép vezérlésére a szerszámpályát, vagyis posztprocesszálni kell [22][23].

Mawussi és Tapie [24] a CAM rendszer nyújtotta lehetőségeket vizsgálják szabad formájú felületek gömbvégű marószerszámmal történő megmunkálása során. Elemzik a különböző megmunkálási jellemzők és stratégiák (10. ábra), valamint a jellemzők és a szerszám egymásra hatását (11. ábra).



10. ábra: Marási jellemzők és stratégiák egymásra hatása [24]

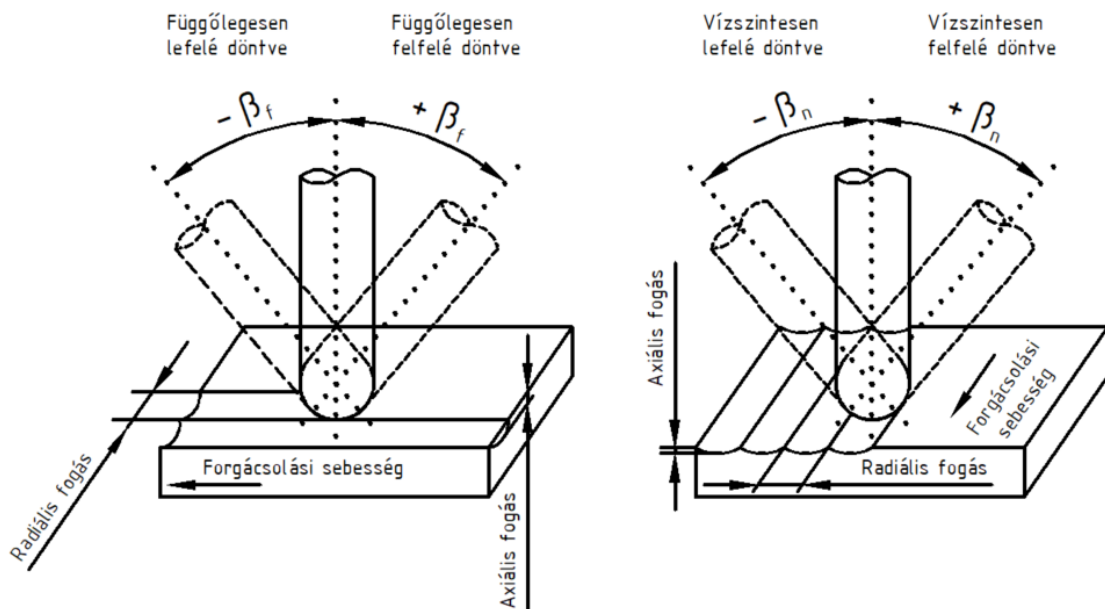


11. ábra: Marási jellemzők és a szerszám egymásra hatása [24]

A CAM programban beállítható marási stratégia ugyanolyan nagy hatással van a megmunkálási pontosságra, mint a technológiai paraméterek, a szerszámgeometria a felület jellege miatt. Izol és társai [25] összehasonlítják az elméleti barázdamagasságot

(geometriai modell) és a valós felületi érdességet egy domború tesztfelület esetén, amelyet négy különböző marási stratégiával munkáltak meg. Azt tapasztalták, hogy a valós felületi érdesség jobb, mint az elméleti barázdamaagasság. Fountas és Vaxevanidis [26] a különböző szerszám pályák optimalizálását javasolják genetikusan algoritmusok segítségével. Vizsgálják ennek hatását a szabad formájú felületek minőségére és a termelékenységre. Magalhães és Ferreira [27] három marási stratégiát vizsgál a felületi érdesség és a termelékenység szempontjából egy konvex gömb alakú próbatest esetében. Eredményeik szerint a radiális stratégia biztosítja a legjobb felületi minőséget és a legrosszabb megmunkálási időt. Pena és társai [28] úgy írják le a marási folyamat optimalizálási modelljét, hogy figyelembe veszik a marási stratégiát is. Varga és Spisak [29] a különböző marási stratégiák hatását vizsgálja egy kör alakú zseb alakpontosságára alumínium-ötvözet esetén.

Az öttengelyes marás új lehetőségeket biztosít, amint azt Sadilek és társai [30] bemutatják. Háromféle 3D geometria megmunkálását vizsgálják három- és öttengelyes marással. Megállapították, hogy az öttengelyes marás jobb alakpontosságot és felületi érdességet biztosít. C. K. Toh [32] a különböző marási technológiák alkalmazása során a CAM rendszerben beállítható szerszám pályákat és szerszám irányokat (12. ábra) vizsgálja és azok hatását a szerszám élettartamára és a termelékenységre.



12. ábra: Négy különböző szerszám pályája orientáció [32]

2.3.4 Forgácsolási paraméterek

A kutatás ezen területe a forgácsolás során beállítható technológiai paraméterek hatásának vizsgálatával foglalkozik. Ezen paraméterek hatásait elsősorban a megmunkáló gép és a szerszám határozzák meg, melyek helyes megválasztása is nagy hatással van a létrehozott felület tulajdonságaira.

A forgácsolási folyamatot meghatározó és vizsgált technológiai paraméterek a következők:

1. Forgácsolási sebesség - v_c [m/min]

$$v_c = \frac{D_c * \pi * n}{1000}$$

ahol: n – főorsó fordulatszám [1/min], D_c – szerszámátmérő [mm].

Szabad formájú felületek marása esetén a forgácsoló sebesség folyamatosan változik. A megmunkálás alatt a fordulatszám adott, előre beállított paraméter, de a marószerszám dolgozó átmérője folyamatosan változik. Ebből következik, hogy a forgácsoló sebesség is folyamatosan változik, ahogy a szerszám végighalad pályáján. Ez a felület jellegéből adódik. Számos tanulmány foglalkozik a dolgozó átmérő változásával [33][31], a forgácsoló sebesség modellezésével [34] és a forgácsoló sebesség optimalizálásával [35][36].

2. Előtolási sebesség – v_f [mm/min]

$$v_f = f_z * z * n$$

ahol: n – fordulatszám [1/min], f_z – fogankénti előtolás [mm/fog], z – fogszám

Az előtolási sebesség is nagyban befolyásolja a leválasztott forgács térfogatát. Nagyobb előtolás alkalmazása esetén az eltávolított forgács térfogata is nagyobb, és nagyobb forgácsolóerők ébrednek, amelyek befolyásolják a kapott felület pontosságát. Az előtolás vagy fogankénti előtolás optimalizálásával is számos tanulmány foglalkozik szabad formájú felületek esetén [37][38][39].

3. Oldallépés vagy fogásszélesség – a_e [mm]

Az oldallépés szintén egy fontos technológiai paraméter, mely befolyásolja a felületi érdességet, a leválasztott forgács térfogatát.

4. Fogásmélység – a_p [mm]

Szabad formájú felületek megmunkálásánál a befejező simító műveletnél kijelenthető, hogy a fogásmélység közel állandó és célszerűen 0,5 mm alatti tartományban mozog, amit elősimítás beállításával érhetünk el. A fogásmélység elsősorban a forgácsolás során ébredő erők nagyságának változására van hatással sok más tényező mellett.

Wojciechowski és társai [40] a változó bemeneti paraméterek hatását vizsgálják a forgácsolóerő mérésén keresztül. Abainia és Bey [41] a forgácsolóerők várható értéke alapján optimalizálja az előtolási sebességet, a lehető legjobb felületi minőség elérése érdekében.

2.3.5 Forgácsleválasztás

A forgácsolhatóság az anyag azon tulajdonságainak összessége, melyek hatással vannak a megmunkálási folyamatra. Ide értjük a szívósságot, a szakítószilárdságot, keménységet és a hővezető képességet, valamint a forgácsolás során tapasztalható jelenségeket, mint például a forgácsolási erő és a szerszám kopása. A tesztadarabok anyagának kiválasztása fontos szempont. Az olyan termékek, mint a formaszerszámok vagy a turbinalapátok, összetett alakúak és nagyon pontos méretekkel rendelkeznek. Ezeket a munkadarabokat általában nehezen forgácsolható anyagoknak nevezett ötvözetekből készítik. Az ilyen anyagoknak több típusa különböztethető meg, a tulajdonságaiktól függően. A legismertebb típusok az alacsony hővezető képességű és nagy hőállóságú anyagok, mint a nikkel bázisú szuperötvözetek és a titán; a képlékeny anyagok, mint a tiszta nikkel; a nagy keménységű és rideg anyagok, mint a kerámiák [42][43][44].

A forgácsolási folyamat részletes megismerése szempontjából fontos a forgácsolás során fellépő erő részletes vizsgálata. Mou és társai [45] a forgácsolás során keletkező erőösszetevőket vizsgálták. Ennek során a forgácsolóerők három komponense mellett a forgácsolóerő nagyságát is elemezték, mely szintén fontos információt szolgáltat a szabad formájú felület megmunkálásáról. Beňo és társai [46] a forgácsleválás körülményeit befolyásoló tényezőket vizsgálták a Khattree-Niak többváltozós módszerrel.

A forgácsolóerő a forgács leválasztásához szükséges, szerszámra ható térbeli erő. Három összetevőre lehet bontani:

- főforgácsoló erő (F_c)
- előtolás-irányú erő (F_f)
- fogásvétel-irányú erő (F_p)

A három erőkomponens nagysága általában a következő módon alakul:

$$F_c > F_p > F_f$$

A forgácsolóerő eredőjét a következő képlettel kaphatjuk meg:

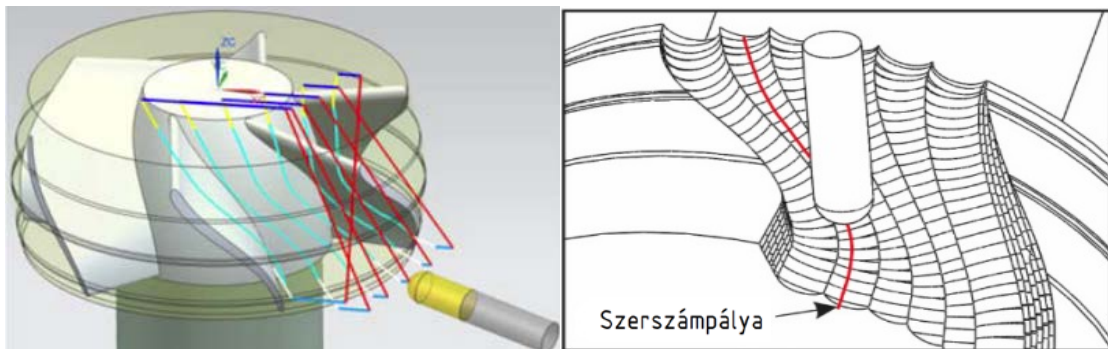
$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}$$

A forgácsolóerő és a megmunkálás során keletkező forgács szoros kapcsolatban van egymással és hatással vannak a létrehozott felület pontosságára. Ahhoz, hogy a forgácsolás körülményeit jobban megismerjük, elengedhetetlen a szerszám és a munkadarab helyzetének, elhelyezkedésének (CWE – Cutter-Workpiece Engagement) pontos ismerete [39].

A Cutter-Workpiece Engagement meghatározása, leírása, illetve figyelembe vétele számítások, szimulációk során a szakirodalomban található kutatások alapján négy típusra bontható:

1. Logikai halmaz műveleteken alapuló testmodellező módszer [38][47]

Yigit és társai [48] testmodellező-alapú szimulációkat használnak a szerszám és a munkadarab kapcsolatának kiszámítására egy testmodellező kernel, a Parasolid segítségével. A modell pontosságát a kiszámított beavatkozásokon alapuló szimulált forgácsolóerők és a kísérletileg mért forgácsolóerők összehasonlításával validálják.



13. ábra: Forgácsolak testmodellezéssel történő előállítása [48]

2. Diszkrét elemeken alapuló módszer [50][51] a szerszám és a munkadarab kapcsolat tulajdonságait a munkadarab véges elemű szabályos intervallumú halmazára történő diszkrétizálásával nyeri ki. Ezt a modellezési elvet négy csoportra lehet felosztani:
- Z-buffer [52][53][54]
 - Z-map [49][55][56]

- c. Octree [57][58]
- d. Dixel [59]

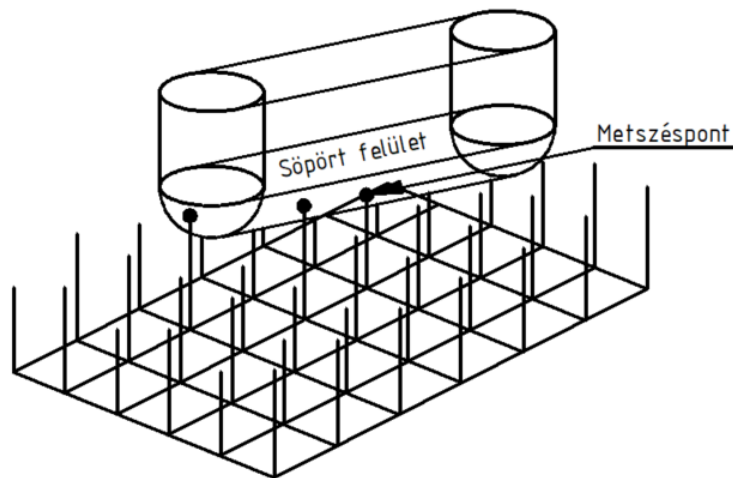
A módszerek a következők:

a. Z-buffer

Fussell és társai [52] egy kiterjesztett Z-buffer modellt mutatnak be a szerszám-munkadarab kapcsolódási terület meghatározására. A Z-buffer módszer a szerszám-pálya burkológörbe söpört felületeivel való vonalmetszésponatok, míg a szilárdtest-modellezéses megközelítés a felület-felület metszésponatok megtalálását igényli. A vonal-felület metszésponatok számítási szempontból eleve hatékonyabbak, mint a felület-felület metszésponatok, de az utóbbi megközelítés elve pontosabb a pontos geometriai ábrázolás miatt. A Z-buffer megközelítésben a nagyobb pontosságot úgy lehet elérni, hogy a vonalak között kisebb távolságot kell tartani, ami természetesen hosszabb számítási időt eredményez.

b. Z-map

Maeng és társai [60] a CNC vezérelt megmunkálás szimulációjában a munkadarab ábrázolására gyakran használt Z-map technikát alkalmazza. Mivel a Z-map-et általában a „z”-tengelyhez igazított vektorok halmaza reprezentálja, a megmunkálási folyamat a vektorok és a megmunkáló szerszám által söpört felület metszésponatainak kiszámításával szimulálható.

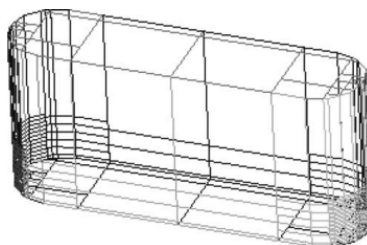


14. ábra: Z-map módszer [60]

c. Octree

Kim és társai [58] az Octree modellt használták a forgácsolási körülmények szimulálására. Az Octree a 3D-s objektumok hatékony reprezentációs eszköze. Legfőbb előnye, hogy egyszerű kockaelemekkel képes komplex objektumokat ábrázolni. Az Octree térbeli rendezési tulajdonsága lehetővé teszi a modell hatékony frissítését, mivel bármely nyolcszög mérete és helye közvetlenül lekérhető az Octree hierarchikus adatszerkezetéből.

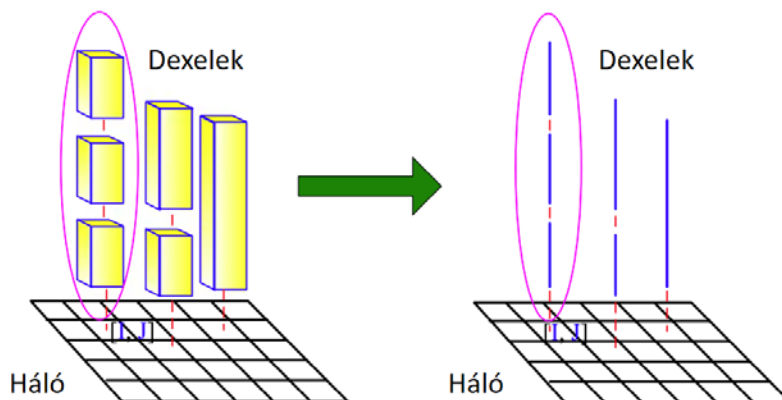
Li és társai [57] egy kibővített Octree modellt használnak a munkadarab és a szerszám átfedésének ábrázolására. Ez által nagy pontossággal meg tudják határozni a fogásmélységet és az oldallépés nagyságát, hogy a forgácsolóerő pontosan előre jelezhető legyen.



15. ábra: Kibővített Octree modell a munkadarab és a szerszám átfedésének ábrázolására [57]

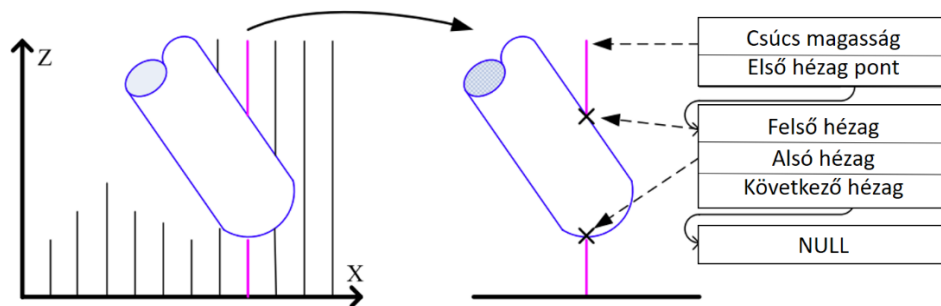
d. Dixel

Zhang és társai [59] egy Dixel modellt használnak az előtolás optimalizálására. Ez egy olyan térfogatmodell, amely egy objektumot hosszú oszlopokból álló rácshálóval ábrázol tömörítve. Minden egyes Dixelt vektorként kezel (16. ábra).



16. ábra: Objektumok Dixel ábrázolása [59]

Az anyageltávolítás szimulációja e vonalak és a söpört szerszám pálya burkológörbe metszéspontjainak kiszámításával történik (17. ábra).



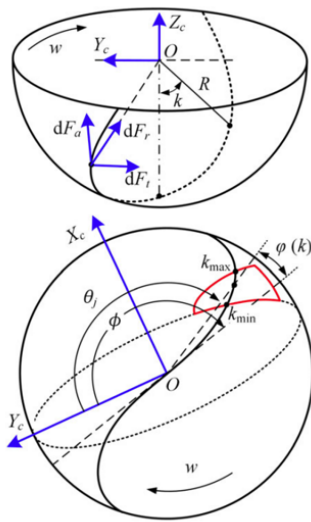
17. ábra: Többszörös metszéspontok a szerszám pálya burkológörbe és a dixel elemek között [59]

3. Analitikus- és numerikus számításokon alapuló határmódszerek [61][62][63][64]

Gupta és társai [61] a forgácsparaméterek meghatározására 2,5D-s marás esetén geometriai algoritmust írnak le. Ez az analitikus megközelítés pontosabb értékeket ad, mint a diszkrét módszer. Az analitikus technikáknak két fő előnye van:

- függvényeket állít elő a marási útvonal bármely pontján Boole műveletek nélkül
- nincs szükség mintavételezésre.

Wei és társai [64] szabad formájú felületek megmunkálása során a forgácsolóerő meghatározására alkotnak meg egy analitikus módszert, hogy optimalizálják a CNC megmunkálási folyamatot. A szabad formájú felületet egy sor végtelenül kicsi ferde síkra bontja fel, amelyek megfelelnek a maró helyének. A szerszámtengely, az előtolási irány és a ferde sík geometriai összefüggéseit parametrikusan határozzák meg. A munkadarab szerszám kapcsolata és a tényleges pillanatnyi dolgozó él alapján meghatároz egy síkot (X_c - Y_c) (18. ábra) és ezek segítségével egy forgácsolóerő előrejelzési modellt alkotnak meg.

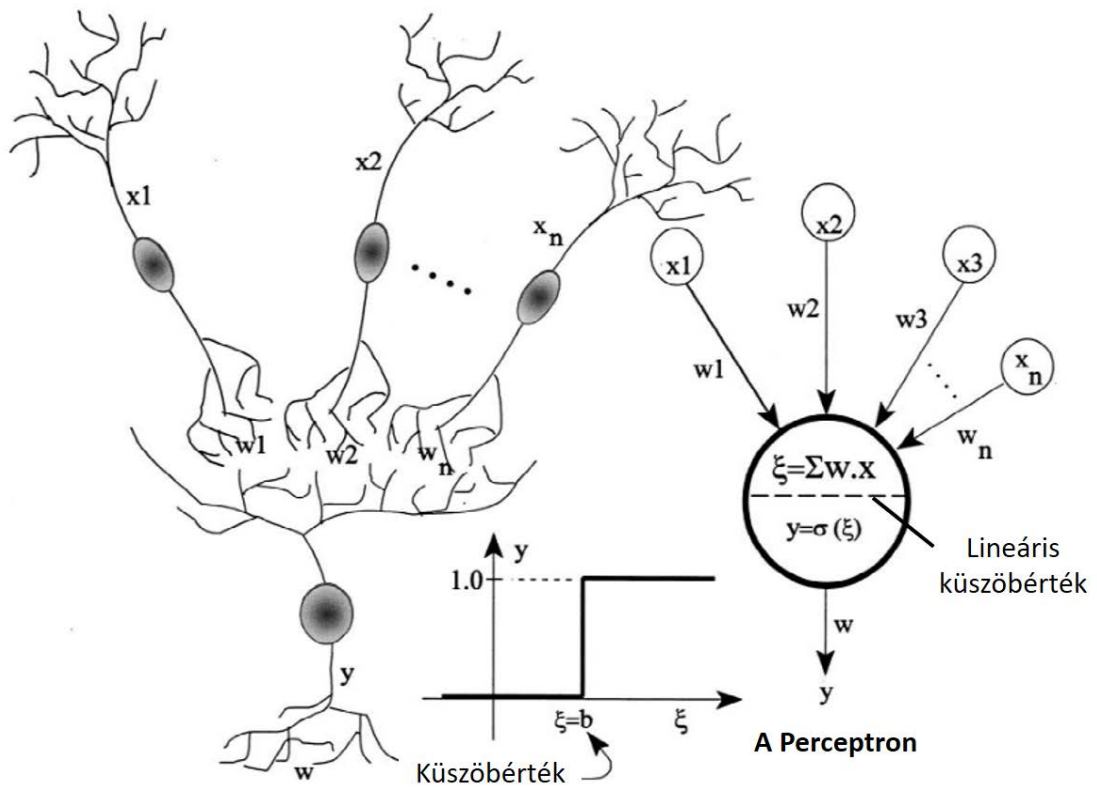


Jelölés	Megnevezés
O-X _c Y _c Z _c	Szerszám koordináta rendszer
W	Szögsebesség [rad]
R	Szerszám rádiusz [mm]
k	Tengelyirányú szögpozíció [rad]
k _{min} , k _{max}	Felső és alsó határ [rad]
dF _a , dF _r , dF _t	Axiális, radiális, tangenciális mikroelem forgácsolóerő [N]
ϕ	Vágóél helyzetszöge [rad]
θ _j	Radiális helyzetszög [rad]
φ	Spirál késleltetési szög

18. ábra: Szerszám élgeometria gömbvégű maró esetén [64]

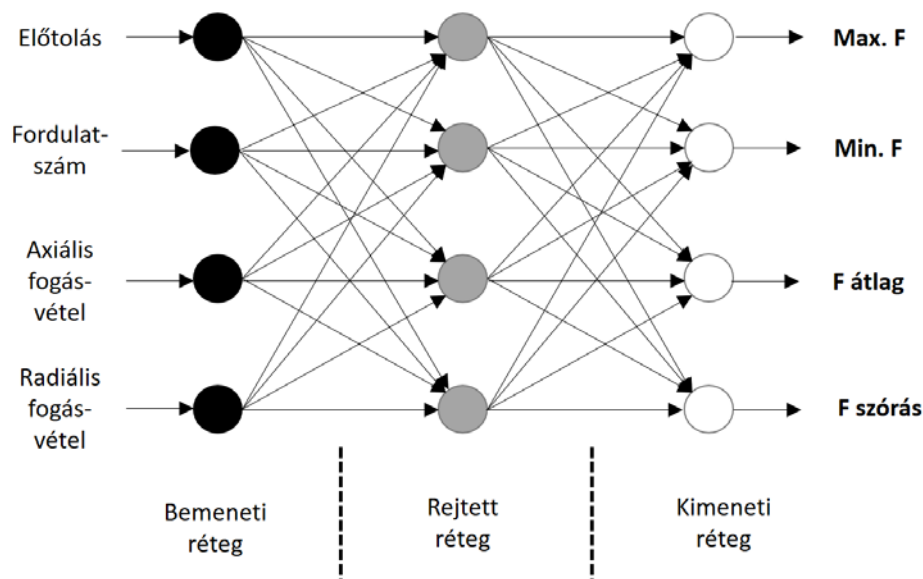
A forgácsolási paraméterek optimalizálása és a forgácsolóerők előrejelzése nem csak az előzőekben leírt módszerek segítségével lehetséges. A szakirodalomban található további más technikák is, mint például a neurális hálók [65][66][67] vagy a fuzzy logikán [68][69] alapuló módszerek.

A neurális háló vagy ANN (Artificial Neural Network) egy biológiai ihletésű szimuláció (19. ábra). Ez egy gráf alapú modell, melyben különböző számítási rétegek találhatók. Ezeken a rétegeken a neuronok nemlineáris aktivációs függvények segítségével kommunikálnak egymással, felépítésük visszacsatolásokat és ismétlődéseket is tartalmazhat. A háló működését tanítással finomítják, így képes megoldani szinte bármilyen problémát, például alkalmas a forgácsolóerők előrejelzésére is [70].



19. ábra: Egyszerű, biológiai ihletésű neurális háló ($x_1 \dots x_n$ - bemeneti paraméterek; y - kimeneti érték; $w_1 \dots w_n$ - súlyparaméterek) [70]

El-Mounayri és társai [65] neurális hálót használnak a szabad formájú felületek gömbvégű szerszámmal történő marás során fellépő erő előrejelzésére. Egy már meglévő 2D-s probléma megoldására fejlesztett neurális hálós modellt fejlesztettek tovább, hogy képes legyen a 3D-s megmunkálás leírására. Az általuk használt neurális háló egy BPNN, azaz back-propagation neural network (20. ábra).



20. ábra: Neurális hálózat felépítése [65]

A fuzzy logikát, amely a Boole-logika továbbfejlesztése Lotfi Zadeh dolgozta ki 1965-ben. Matematikai halmazokon alapul, és a klasszikus halmazelmélet általánosítása. A fokozat fogalmának bevezetésével egy elem nem csak „Igaz” vagy „Hamis” lehet, hanem a kettő között is elhelyezkedhet. Ettől lesz a fuzzy logika nagyon flexibilis, és lehetővé teszi a pontatlanság és a bizonytalanság figyelembevételét [71].

Nijiri és társai [68] a szabad formájú felületek marásakor, egy fuzzy logikán alapuló vezérlőt alkalmaznak, amely képes a forgácsolás során fellépő maximális erők korlátozására. A szabályzó adaptív módon maximalizálni tudja az előtolási sebességet a szerszámra ható megengedett forgácsolóerő függvényében. Előtolósebesség valós idejű változtatásával képesek voltak stabil megmunkálást biztosítani és a marási folyamat teljesítményét javítani.

2.3.6 Pontosság

A gyártás során a megmunkált felületekkel szemben támasztott elvárások folyamatosan nőnek, ezért a felület minőségi jellemzőinek vizsgálata egyre jobban előtérbe kerül. Ezek a jellemzők a felületi érdesség és a felület pontossága. A pontosságnál megkülönböztetünk dimenzionális pontosságot (méretpontosság) vagy geometriai pontosságot (alak- és helyzetpontosság), mely jellemzőket mérés segítségével lehet meghatározni.

Az érdesség a felületen lévő mikro-méretű jellegzetes mintázat, mely általában egy ismétlődő szabálytalanság. Ennek jellegét, értelmezését és mérőszámait szabványok rögzítik, pl. MSZ EN ISO 21920-2:2002 és az MSZ EN ISO 21920-3:2022 [72][73].

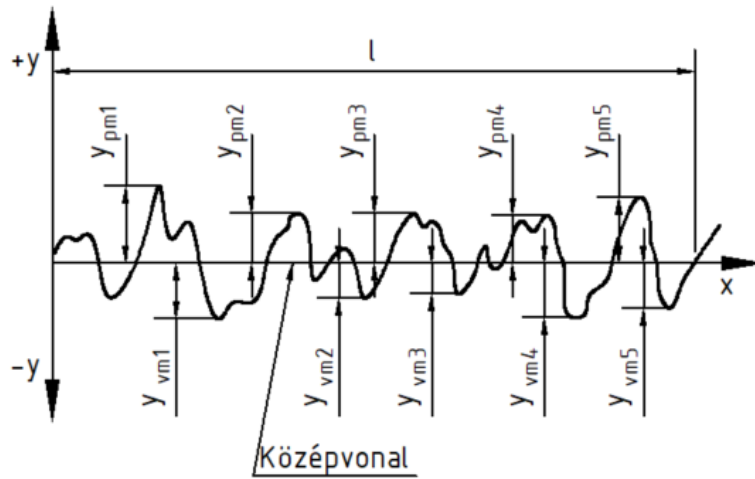
A megmunkálási folyamat tervezésének szempontjából szükséges a felületi érdesség becslése. Benardos és Vosniakos négy módszert különböztet meg. Az első a megmunkálás elméletén alapuló megközelítés analitikus modellek vagy számítógépes algoritmusok segítségével. A második módszer a különböző tényezők hatását kísérletek elvégzésével és az eredmények elemzésével vizsgálja. A harmadik a tervezett kísérletek módszere. A negyedik pedig mesterséges intelligencia alapú megközelítés, például a korábban említett neurális háló alapú becslés [74].

Vyboishchik [75] egy tisztán geometriai megközelítést mutat be a felületi topográfia leírására konvex és konkáv felületű gömbvégű marószerszámmal történő megmunkálás esetén. Sekulic és társai [76] egy olyan statisztikai módszert mutatnak be, amelyben a regressziós modell együtthatóit genetikai és grey wolf optimalizáló algoritmusok határozzák meg (az evolúciós algoritmusok egy fajtája). Felhő és Kundrák [77] kombinált módszert mutat be, kétféle forgácsolóbetéttel végzett homlokmarás esetén. A felület jellege és a marási irány nagy hatással van a felületi érdességre, ahogy Rybicki [78] bemutatja. A vízszintes felület a legrosszabb minőségű. Bilek és társai [79] bemutatják a gömbvégű marószerszám különböző élgeometriájának hatását a felületi érdességre. A pozitív élgeometria és a kisebb előtolás kedvező az 1.2379-es edzett szerszámacél esetén. Mgherony és társai [80] a felületi érdességet elméleti geometriai módszer segítségével határozzák meg és méréssel támasztják alá eredményeiket.

A felület jellemzésére leggyakrabban az átlagos felületi érdességet (R_a) és az egyenetlenség magasságot (R_z) alkalmazzák. Mind a két tulajdonság ellenőrizhető a gyártás során. Ezeket a jellemzőket nem a teljes felületen mérik, csak egy úgynevezett alaphosszon. [81]

Az egyenetlenség-magasság (R_z) egy alaphosszon belül a profil öt legmagasabb és öt legmélyebb pontjának távolságából határozható meg a következő ábra szerint [82]:

Mértékegysége: [μm]

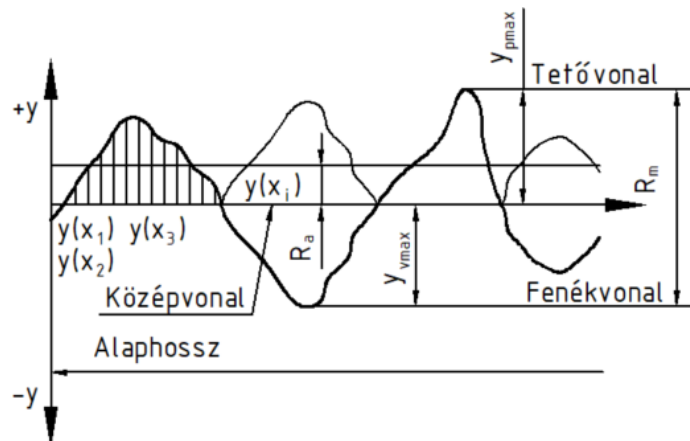


21. ábra: Egyenetlenség magasság [82]

Az átlagos érdesség egy alaphosszon belül a profil pontjainak a középvonaltól mért átlagos távolságát jelenti. Ha a középvonal alatti és feletti ordinátákat összeadjuk (az előjelek figyelembe vétele nélkül) és az összeget elosztjuk azok számával, akkor kapjuk az átlagos érdesség értékét [82].

Mértékegysége: [μm]

$$R_a = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + \dots + y_n}{n}$$



22. ábra: Átlagos felületi érdesség [82]

A két érték közötti arány a gyártási eljárástól függ, általában az R_z érték 4-8 szorosa az R_a -nak.

A felületi érdességmérési folyamatának tervezése során számos tényezőt kell figyelembe venni. Farkas és Drégelyi-Kiss [83] a felületi érdességmérési bizonytalanságának vizsgálatán keresztül mutatja be az esztergált és mart felületek érdességvizsgálatát.

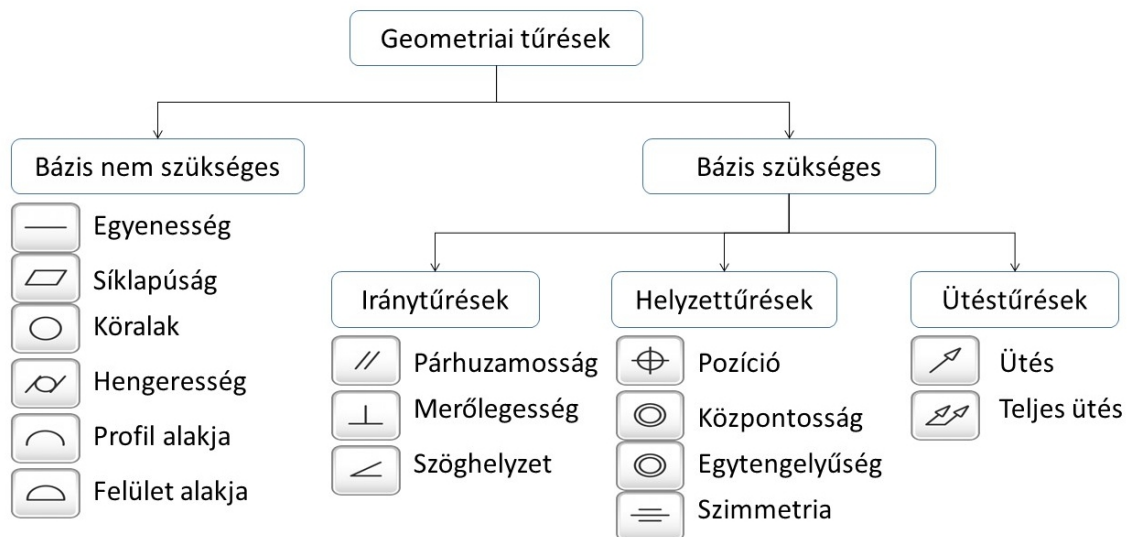
A felület mikrogeometriájának vizsgálatára a felületi érdesség mellett a 3D topográfia is segítségünkre lehet, a felület térbeli egyenetlenségeinek valóságosabb kiértékelését teszi lehetővé. 3D-s, térbeli paraméterek segítségével alkalmas olyan tulajdonságok bemutatására is, amelyekre a 2D-s paraméterek nem [84].

Ezek a paraméterek négy csoportba sorolhatók:

1. Egyenetlenségmagasság irányú amplitudó jellemzők
2. Egyenetlenségmagasság vízszintes irányú térközi jellemzők
3. Mikrotopográfia alakját leíró hibrid jellemzők
4. Mikrotopográfia működési tulajdonságait leíró funkcionális jellemzők

A jelölésükben a 2D-s jellemzőnél használt R (roughness) helyett a 3D-s jellemzőknél az S (surface) használata a térbeliségre utal [81].

Egy alkatrész makrogeometriája dimenzionális (méret) és geometriai (alak és helyzet) paraméterekkel jellemezhető. A gépészetben a geometriai méréseknek növekvő szerepük van. Az alak- és helyzetűrések ellenőrzése fontos feladat, mert az alkatrészek felületei, geometriai elemeinek jellemzői és egymáshoz való viszonyuk sokkal teljesebben írható le geometriai tűrésekkel, mint dimenzionális méretekkel és tűrésekkel. Az alak- és helyzetűrések a munkadarab alakjára, formájára, a geometriai elemek egymáshoz való viszonyára vonatkozó információk. Az alak és helyzetűrésekkel kapcsolatos előírásokat – egyéb szabványok mellett - az ISO 1101:2017 szabvány írja le [85]. A geometriai tűrések fő sajátossága a tűrésmező szabadságfoka, ami a tűrés típusától, a tűrésezett elem jellegétől, valamint a bázisok számától és jellegétől függ. A geometriai tűrések csoportosítását a 23. ábra mutatja [86].



23. ábra: Alak- és helyzettűrések ISO 1101 szerint [85]

A koordinátamérés alkalmas egy alkatrész méreteinek és geometriai tulajdonságainak meghatározására. A mérési folyamat során számos paraméter hatással van a mérési eredményre. A mérési módszer (érintkezéssel vagy érintésmentes), a pontmintavételi módszer, az adatfeldolgozás matematikai módszere a leginkább vizsgált paraméterek [87].

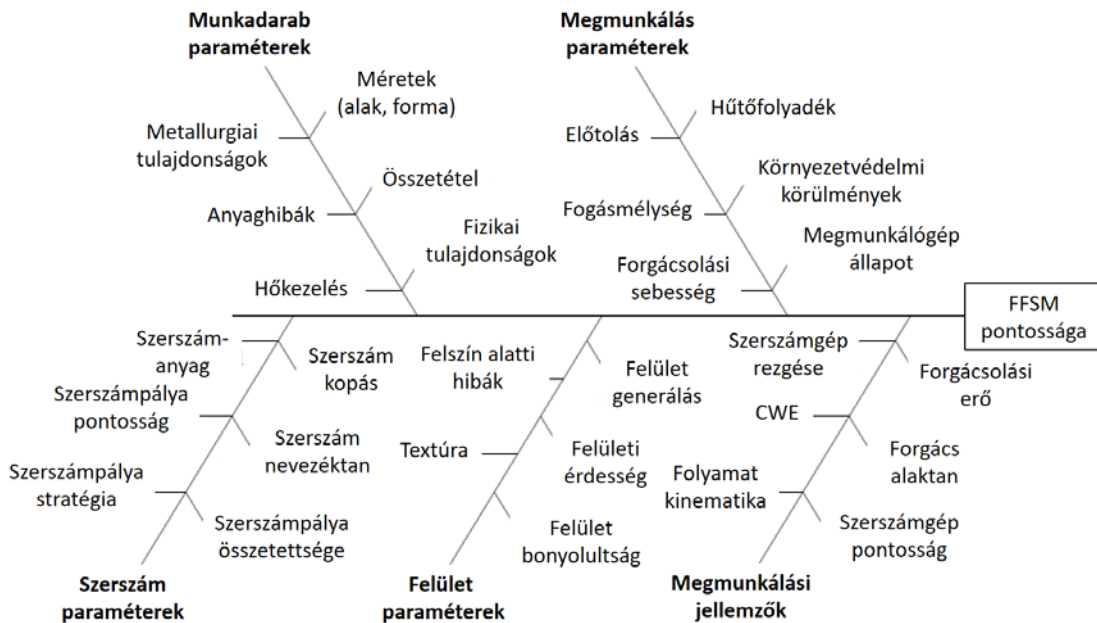
Gosavi és Cudney [88] az alakhibák kiértékelésének matematikai módszereit vizsgálja, amelyek módosíthatják az eredményeket. Kawlec és Magdziak [16] a görbe rekonstrukció pontosságát vizsgálja a mért pontok számának függvényében. A numerikus szimuláció azt mutatja, hogy a pontosság csak kis mértékben változik 50 pont felett. Zhao és társai [89] hasonló megközelítés alapján vizsgáltak négy tanulmányt. Megállapították, hogy 50 pont felett az elméleti és a létrehozott felület eltérése csökken.

Zahmati és társai [90] egy új adaptív pontmintavételi módszert javasolnak, amely figyelembe veszi a szabad formájú felület CAD-modelljét. A pontok pozícióit egy swarm (raj) algoritmus segítségével határozzák meg. Rajamohan és társai [91] egyenletes és adaptív pontelosztási módszereket vizsgálnak. 25 pont esetén patch size ranking módszer biztosította a legkisebb hibát az újjáépített felületnél.

Kawalec és Magdziak [16] egy fuzzy következtetési rendszert használnak a mérési pontok számának és eloszlásának meghatározására.

Mali és társai [92] az elmúlt évtized cikkeit elemezték a szabad formájú felületek megmunkálása (FFSM – Free Form Surface Milling) témakörben. Az egyik fő vizsgálati

szempontjuk a pontosság volt. Megalkottak egy átfogó Ishikawa diagramot a pontosságot befolyásoló tényezőkről (24. ábra).



24. ábra: Az FFSM (Free Form Surface Milling) pontosságát befolyásoló tényezők [92]

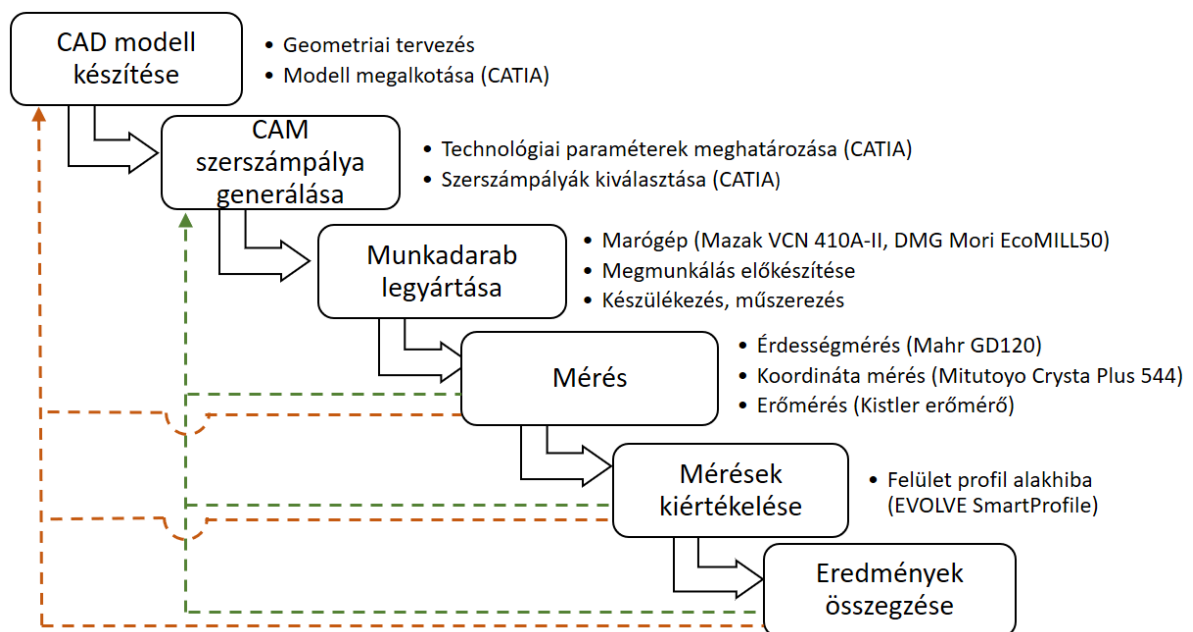
Az irodalmi áttekintés alapján a kutatási témát szabad formájú felületek megmunkálásának technológiai vizsgálatában határoztam meg, mely során a szerszám-pálya és technológiai paraméterek hatását vizsgálom a felület mikro és makro pontosságára. Foglalkozom a különböző simító marási stratégiák a felület alakpontosságára és a felületi érdességére gyakorolt hatásával.

A következő fejezetben az irodalomkutatás alatt szerzett ismeretek és a rendelkezésemre álló eszközök alapján összeállított kutatási módszerek kerülnek részletes ismertetésre.

3 FELHASZNÁLT ESZKÖZÖK ÉS MÓDSZEREK

A fejezetben a kutatás során alkalmazott eszközök és módszerek kerülnek bemutatásra. Ismertetem a teszt darabok kialakítását és az alkalmazott kísérlettervet, a megmunkálások és a mérések során használt műszereket és gépeket.

A kísérletek megtervezése, értékelése, az adatok feldolgozása nagyon fontos, mert csak így tudunk levonni pontos és hasznos következtetéseket. Ezért a kísérletek végrehajtása előtt kidolgozásra került egy kísérleti terv, mely lehetővé teszi a kapott eredmények összehasonlíthatóságát. Ezt a folyamatot a 25. ábra mutatja.



25. ábra: A kísérletek folyamata

A kísérleteket több szakaszban végeztem el, a korábbi eredmények alapján tovább fejlesztve, kiegészítve a kísérlettervet, bővítve vagy szűkítve a paraméterek körét, illetve a mérési, kiértékelési módszereket. A vizsgált paraméterek körét és értékét a kutatás elején kitűzött célok, a rendelkezésre álló lehetőségek, az ipari gyakorlat és az irodalomkutatás eredményei alapján határoztam meg.

3.1 Kísérletek megvalósításának folyamata

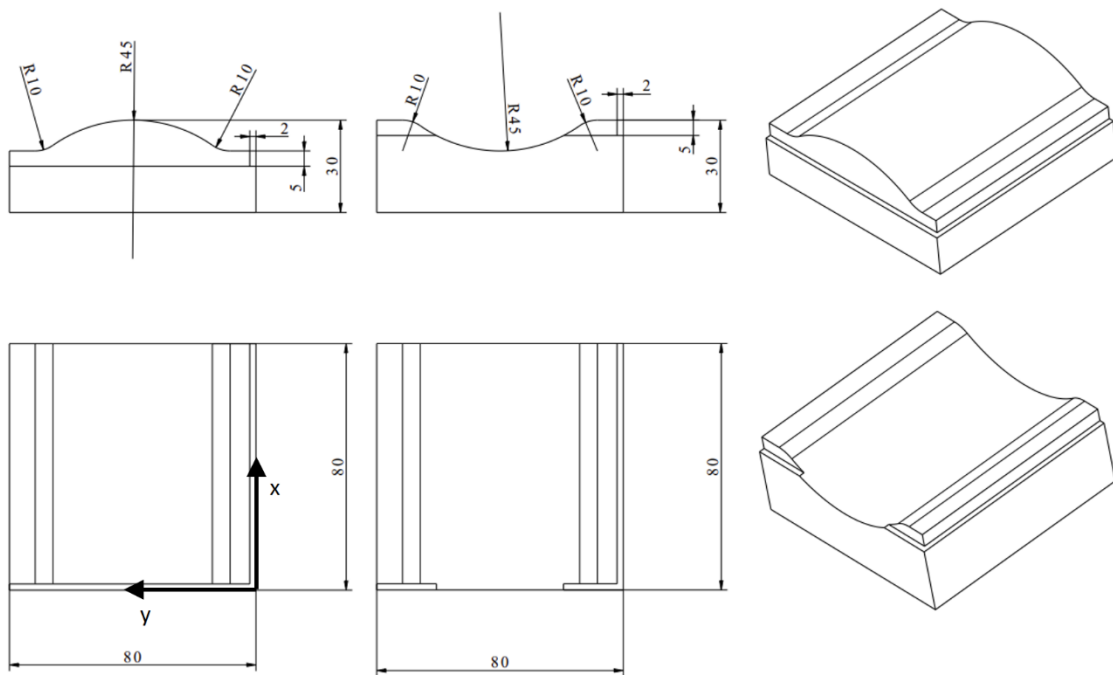
A tesztalkatrész körültekintő megtervezése nagyon fontos feladat, hiszen nagyban befolyásolja a vizsgálatok eredményességét. A szabad formájú felületek nem

rendelkeznek sem lineárisan változó, sem mintázatos felülettel, nem lehet egzakt módon leírni. A vizsgálatok és a tesztdarabok megalkotása ezért is volt bonyolult feladat.

A CAD modell geometriai kialakítása során olyan geometriát kellett létrehozni, amely rendelkezik a szabad formájú felületekre jellemző elemekkel. Olyan felületeket tartalmaz, melyek felületi normálisa folyamatosan változik (ez az egyik alapvető tulajdonsága a szabad formájú felületeknek). Ugyanakkor a tervezés során az alak és méret kialakításánál figyelembe kellett venni az érdességmérés adta korlátokat is. Egy homorú, konkáv és egy domború, konvex próbadarab készült így el. A konkáv darab esetében a felületi normális az egyik, míg a konvex darab esetén a másik irányba változik. A változás mértéke egyforma, ami megkönnyíti az összehasonlítást. A két tesztdarab gyakorlatilag egymásba illeszthető.

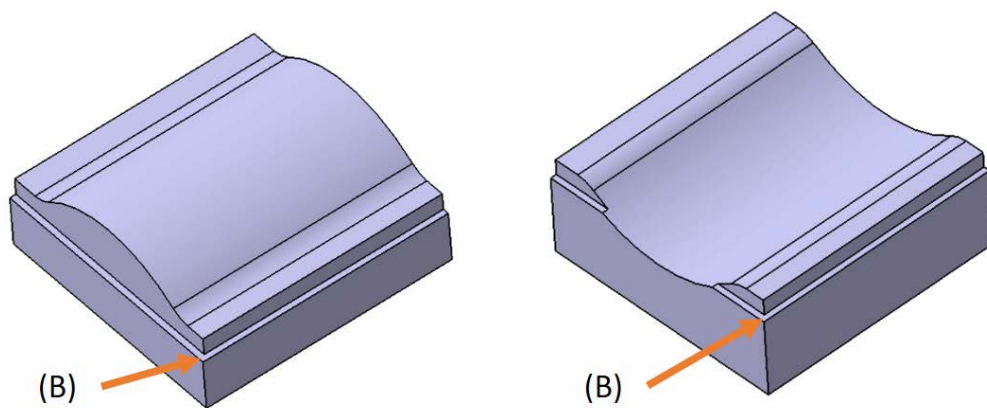
Összességében elmondható, hogy a vizsgált munkadarabok felülete nem szoborfelület, de a megmunkálás szempontjából rendelkezik a szabad formájú felületek jellemzőivel.

Az elkészült munkadarabok geometriája a következő ábrán láthatók (26. ábra). A teszt munkadarabok befoglaló mérete 80x80x30mm, melyen egy 45 mm sugarú hengeres felület található. Ez a rész egy 10 mm széles vízszintes síkhoz csatlakozik, 10 mm sugarú rádiusszal. Egy homorú (CV) és egy domború (CX) alkatrészt hoztunk létre a felületek jellegének összehasonlítására. A hengeres rész magassága, illetve mélysége a geometria miatt 9,2 mm.



26. ábra: Domború (konvex) és homorú (konkáv) munkadarab

A CAD modellek létrehozása CATIA v5 szoftver segítségével történt. Ez a program alkalmas bonyolult felületek létrehozására, de a későbbi CAM-es feladatokat is el lehet végezni vele, ezért esett a választás erre a CAD/CAM szoftverre. Az elkészült CAD modellek képei a következő ábrán láthatók (27. ábra):



27. ábra: Domború és homorú munkadarab CAD modellje

A gyártás után, az alakpontosság ellenőrzése koordináta mérőgép segítségével történik. Mindkét munkadarab két-két oldalán látható egy perem. Az itt kialakított felületeket lehet bázisfelületként (B) használni.

3.2 Tesztalkatrész anyaga

A vizsgálati alkatrészek anyaga minden kísérlet során 42CrMo4 (1.7225; Rm = 1000 MPa) alacsonyán ötvözött acél volt (1. táblázat), amely a szívósságáról, jó torziós szilárdságáról és jó fáradási szilárdságáról ismert króm, molibdén, mangán alacsonyán ötvözött acélok egyike. Ezt az acélfajtát gyakran használják járművek, motorok és gépek statikusan és dinamikusan igénybevett alkatrészeihez, valamint nagyobb keresztmetszetű alkatrészekhez, forgattyús tengelyekhez és fogaskerekekhez, de formaszerszámok is készülnek belőle. A 42CrMo4 anyag jó megmunkálhatósággal, jó kopásállósággal rendelkezik, de rossz a hegeszthetősége. Hőkezelés nélküli, szállítási állapotban történt a megmunkálása.

Ötvözőanyag	C	Si	Mn	Mo	S	Cr	Ni
[%]	0,38- 0,45	≤ 0,4	0,60- 0,90	≤ 0,025	≤ 0,035	0,9- 1,2	0,19

1. táblázat: 42CrMo4 összetétele³

3.3 Szerszámpanya tervezése

A CAM-es szerszámpanyák generálása a CATIA v5 szoftver segítségével történt. A szoftver lehetőséget nyújt sokféle szerszámpanya megalkotásához. Nagyoláshoz elősimításhoz valamint simításhoz különböző megmunkálási stratégiákat tudtam alkalmazni. A végső felület minőségét azonban az utolsó, azaz a simító megmunkálás befolyásolja döntő módon.

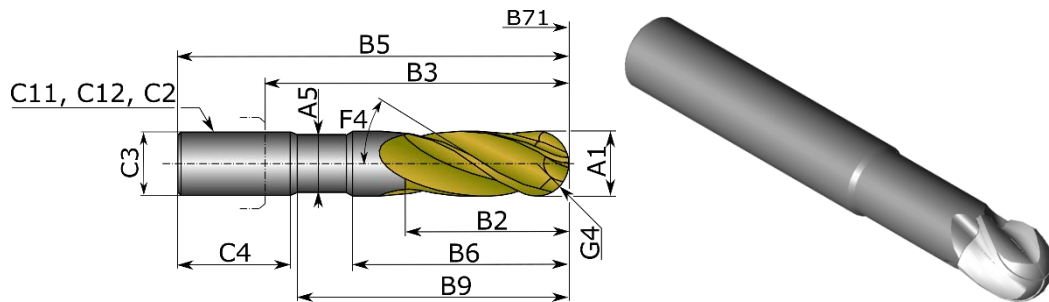
A stratégia mellett a technológiai paraméterek beállítása is nagymértékben befolyásolja a felület tulajdonságait, ezért ezek megválasztását is körültekintő módon kell elvégezni. A CAM-es szerszámpanyák részletes bemutatására később kerül sor..

3.4 A megmunkáló szerszám

A szabad formájú felület végleges tulajdonságainak kialakítása gömbvégű marószerszám alkalmazásával történt. A gyártás során egy nagyoló, egy elősimító és egy simító megmunkálást alkalmaztunk. A simítás során az alkalmazott marószerszám egy 10 mm átmérőjű ($D_c = 10$ mm), négy élű ($z = 4$), bevonatolt (X-AL bevonat), Fraisa X7450.450,

³ /<https://www.loksacel.hu/wp-content/uploads/2018/10/42crmo4.pdf>

mely egy tömör keményfém gömbvégű marószerszám. A szerszám geometriai méreteit lásd a következő ábrán (28. ábra).



28. ábra: Fraisa X7450.450 gömbvégű marószerszám⁴

A1	Szerszámátmérő (névleges átmérő)	10 [mm]
A5	Nyakátmérő	9,2 [mm]
B2	A dolgozó rész hossza, max.	11 [mm]
B3	Gallér hossza	32 [mm]
B5	Teljes hossz	72 [mm]
B71	Funkcionális hossz	72 [mm]
B9	Nyak hossza	30,2 [mm]
C11, C12	Szerelési típus, gép felőli oldal	Hengeres rögzítés
C12	Felvételi méret, gépi oldal	0100
C3	Szerelési átmérő, gép felőli oldal	10 [mm]
C4	A tengely hossza	41 [mm]
F4	Csavarási szög	30°
G4	Profil sugara	5 [mm]

2. táblázat: Fraisa X7450.450 gömbvégű marószerszám geometriai tulajdonságai⁵

3.5 Teszt felület előkészítése és gyártása

A tesztdarabok legyártása a 3 tengelyes megmunkálások esetén egy MAZAK Nexus 410 A-II típusú háromtengelyes CNC vezérlésű megmunkálóközponton (29. ábra) készültek. A szerszámok rögzítése EMUGE-FRANKEN SK40 típusú hidegsugor befogóval történt (PowerGrip). A tesztdarabok precíziós megfogó segítségével lettek rögzítve, mely a

⁴ <https://www.toolsunited.com/App/Article/ArticleDetailsPage/25076780922586590>

⁵ <https://www.toolsunited.com/App/Article/ArticleDetailsPage/25076780922586590>

gépasztra volt felszerelve. A gyártás során mindhárom gyártási fázisban (nagyolás, elősimítás, simítás) hűtő-kenő folyadékot alkalmaztunk elárasztásos módszerrel (Aquamet 40, 6-8%-os emulzió, kb. 30 l/perc hozam).



<p>Vezérlés típusa: Mazatrol Matrix X tengely: 560 mm Y tengely: 410 mm Z tengely: 510 mm Asztal méretei: 900 mm x 410 mm Orsó fordulatszám: max. 12 000 1/min Orsó teljesítmény: 18,5 KW Szerszámforgató: 30 pozíció Nagynyomású rendszer az orsón keresztül 15 Bar</p>
--

29. ábra: MAZAK Nexus 410 A-II típusú megmunkálóközpont és tulajdonságai⁶

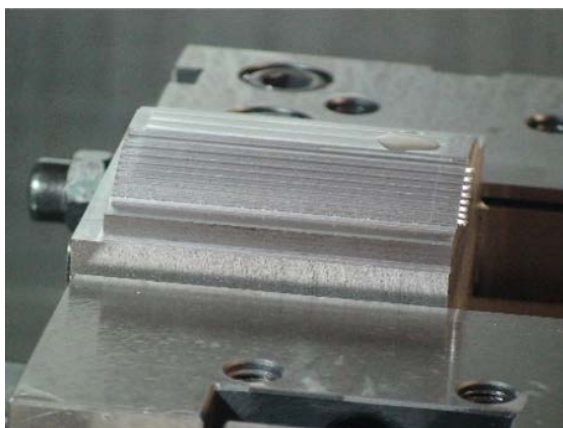
A tesztdarabok elkészítése három lépésben történt:

1. Az első lépés egy nagyoló megmunkálás volt, mellyel a felesleges anyag nagy részét eltávolítottuk, valamint kialakításra került egy perem, mely későbbi bázisnak használható a koordináta mérés során.

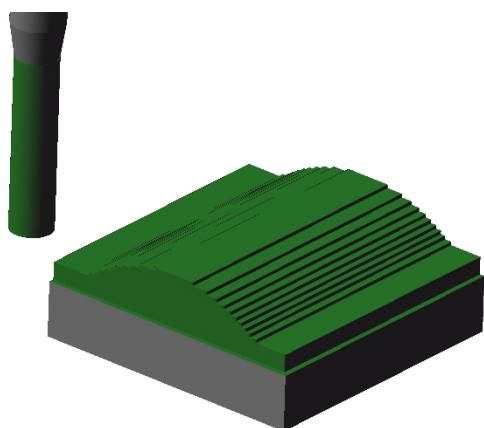
Nagyolás - Technológiai paraméterek, szerszám és stratégia	
Alkalmazott stratégia	Teraszoló megmunkálás (Roughing)
Ráhagyás	0,5 mm
Fordulatszám (n)	3200 fordulat / min
Fogankénti előtolás (fz)	0,05 mm
Maximális oldallépés (ae)	6 mm
Maximális fogásmélység (ap)	1 mm
Alkalmazott szerszám	D12R1 ujjmaró

3. táblázat Nagyoló megmunkálás beállításai

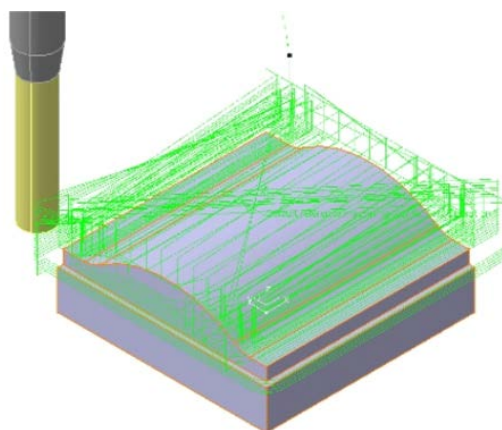
⁶ <https://www.mazak.com.vn/machines/vertical-center-nexus-410a-ii/>



(a)



(b)



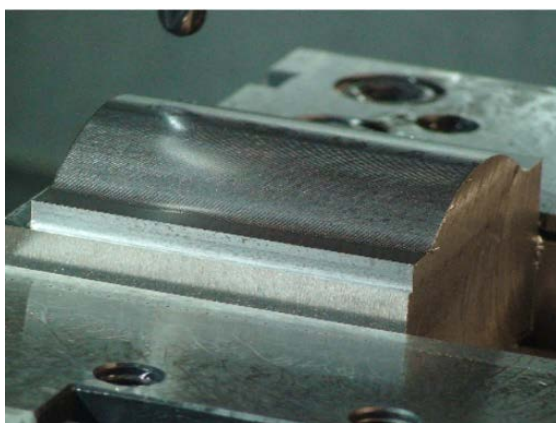
(c)

30. ábra: Nagyoló megmunkálás (legyártott tesztadarab (a), CAM-es térfogatszimuláció (b) és szerszámpálya (c))

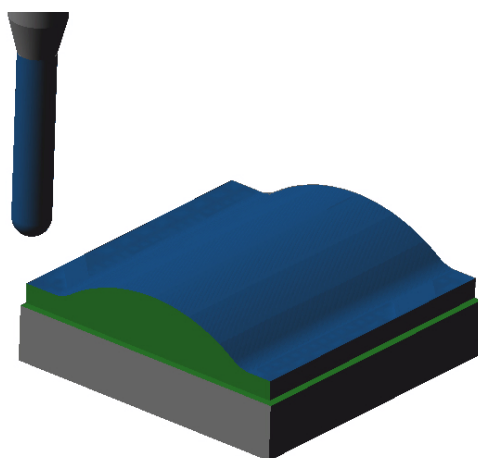
2. A második lépés egy elősimító megmunkálás, melynek célja, hogy nagyjából egyenletes anyagrészt állítson elő a befejező megmunkálás számára. Ezzel el lehet érni, hogy a simítás során a szerszám terhelése a forgácsvastagság miatt ne ingadozzon nagymértékben.

Elősimító megmunkálás - Technológiai paraméterek, szerszám és stratégia	
Alkalmazott stratégia	Pásztázó megmunkálás (Sweeping)
Ráhagyás	0,3 mm
Fordulatszám (n)	5100 fordulat / min
Fogankénti előtolás (f_z)	0,08 mm
Maximális oldallépés (a_e)	0,3 mm
Alkalmazott szerszám	D10R5 Gömbmaró (Fraisa X7450450)

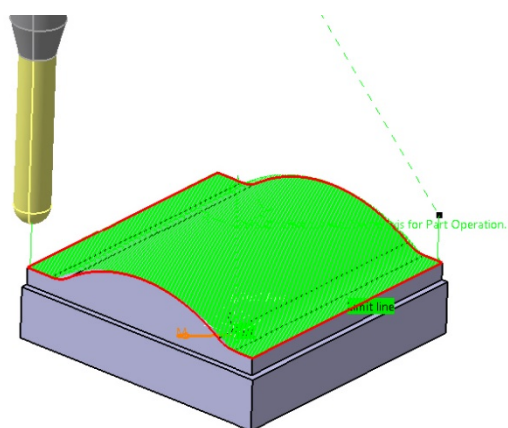
4. táblázat: Elősimító megmunkálás beállításai



(a)



(b)



(c)

31. ábra: Elősimító megmunkálás (legyártott tesztadarab (a), CAM-es térfogatszimuláció (b) és szerszám-pályája (c))

Az előző ábra c) részén látható az elősimító megmunkálás szerszám-pályája. Annyira sűrűn helyezkednek el a pályák, hogy szinte összefüggő felületet alkotnak.

3. A harmadik és egyben befejező lépés a simítás, mely készre munkálja a felületet.

Simító megmunkálás - Technológiai paraméterek, szerszám és stratégia	
Alkalmazott stratégia	Vizsgálatonként változó
Ráhagyás	nincs
Forgácsoló sebesség (v_c)	Vizsgálatonként változó
Fogankénti előtolás (f_z)	Vizsgálatonként változó
Oldallépés (a_e)	Vizsgálatonként változó
Alkalmazott szerszám	D10R5 Gömbmaró (Fraisa X7450450)

5. táblázat: Simítás beállításai

A kutatásaim során egy tesztbeállítás során öttengelyes marási technológiát is alkalmaztam. Ezt egy DMG Mori EcoMILL50 marógép segítségével végeztem, melyet a Kassai Műszaki Egyetem biztosított számomra.



Vezérlés típusa: Siemens
X tengely: 500 mm
Y tengely: 450 mm
Z tengely: 400 mm
Nyomaték: 40 Nm
Orsó fordulatszám: max. 12 000 1/min
Orsó teljesítmény: 13 KW
Nagynyomású hűtőrendszer: 40 Bar

32. ábra: DMG Mori EcoMILL 50⁷

Az öttengelyes megmunkálás szintén három részből állt: nagyolás, elősimítás és simítás. A megmunkálás körülményei, a technológiai paraméterek mindhárom esetben megegyeztek a háromtengelyes megmunkáláséval. A szerszámtengely a felületi normálisához képest egy irányba dőlt, így a forgácsolási körülmények közel állandók voltak a megmunkálás során.



33. ábra: Simító megmunkálás az öttengelyes marógépen

⁷ <http://www.rvsmeccanica.it/en/pdf/pm0uk14-ecomill-pdf-data.pdf>

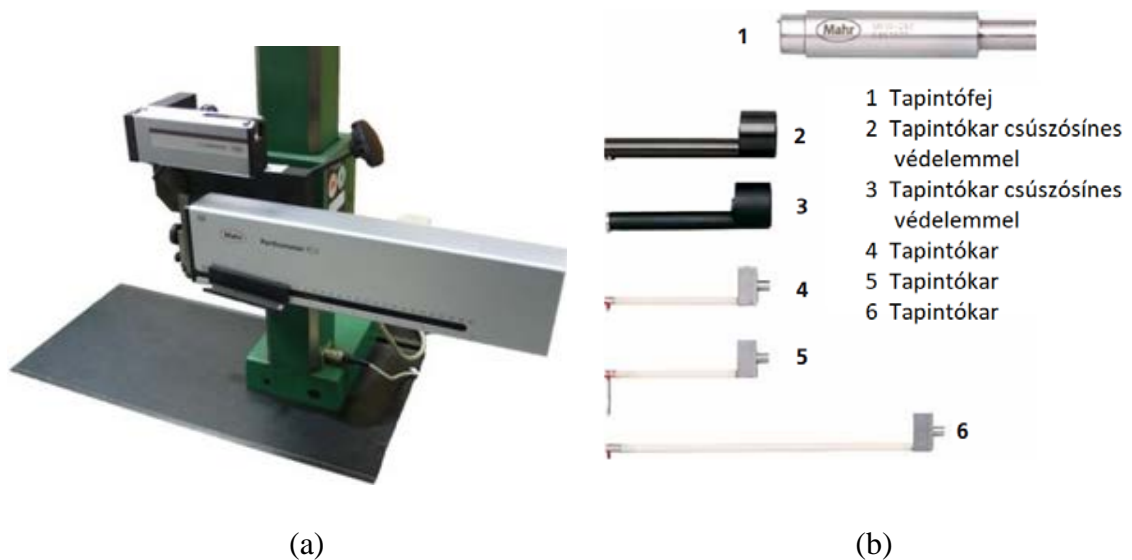
3.6 Érdesség, alakpontosság és erőmérés

A kutatás célkitűzéseivel összhangban a vizsgálatok során a felületi érdesség, a méretpontosság, a geometriai pontosság és a forgácsolóerő különböző értékeit mértem.

A mérési eredmények kiértékeléséhez, az adatok elemzéséhez az Excel és a Minitab szoftvereket alkalmaztam.

3.6.1 Felületi érdesség mérése

A felületi érdesség mérése egy Mahr-Perthen Concept GD120 típusú (34. ábra (a)) metszet tapintós elven működő kontakt érdességmérő gépen történt. A mérőállomás az érdesség és a hullámosság mérésére is alkalmas. A kapott adatok kiértékelése a MahrWin szoftver segítségével valósítható meg. A műszer MFW 250-es tapintórendszerrel rendelkezik, amely lehetőséget nyújt az általam vizsgált munkadarab felületeinek vizsgálatára.



34. ábra: a) Marh Perten Concept GD120 b) MFW tapintórendszer

A vizsgálatok során a mérések helye és iránya külön került részletezésre. A megfelelő mérési pozíció beállítása egyedi készülékkel történt, mely lehetővé tette a szabad formájú felület érdességének mérését bármely mérési irányban (35. ábra). A méréseket minden mérési pozícióban háromszor megismételtem. A felületi érdesség értékét figyelembe véve az alaphossz $\lambda=0.8$ mm volt.



35. ábra: Felületi érdesség mérése

3.6.2 Méret és geometria mérése

A teszt felületek dimenzionális méretét és geometriai eltérését koordináta mérőgéppel határoztam meg. A mérés során pontokat veszünk fel a felületen, melyre a kiértékelő szoftver illeszt ideális geometriai elemeket és ezek alapján határozza meg a dimenzionális és geometriai méreteket és eltéréseket.

A kísérletek során a méréséhez egy Mitutoyo Crysta Plus 544 típusú koordináta mérőgépet használtuk. A gép mérési tartománya: X-tengely: 500 mm; Y-tengely: 400 mm; Z-tengely: 400 mm. Hosszmérési pontossága: 3,5 μm . Felbontása: 0,5 μm .

A mérések során Renishaw TP 20 kapcsoló típusú mérőfejet és 3 mm névleges átmérőjű tapintó gömböt használtam.



36. ábra: Mitutoyo Crysta Plus 544 koordináta mérőgép és tapintófej



37. ábra: Koordináta pontok mérése a méret és geometriai meghatározásához

A kapott adatok kiértékelése a mérőgép saját szoftvere, illetve az Evolve SmartProfile szoftver segítségével történt. Utóbbi előnye, hogy bármilyen mérőrendszerrel végzett alkatrészmérésekből származó pontfelhő adatokat kezelni tud. CAD modelleket tudunk importálni és tűréseket definiálni a segítségével, valamint össze lehet hasonlítani a CAD-modellt és a mért koordináta pontokat.

3.6.3 Erő mérése

A forgácsolóerő meghatározása, komponenseinek mérése fontos feladat a forgácsoláskutatásban. A mérőeszköz képes a forgácsolás közben fellépő erők mérésére x, y és z tengely mentén.

A forgácsolás során ébredő erőket KISTLER 5019 típusú erősítő (38. ábra (a)), egy KISTLER 9257B (38. ábra(b)), 3 komponensű erőmérő berendezés segítségével végeztem, 2000 Hz-es mintavételezési frekvenciával.



(a)



(b)

38. ábra: KISTLER 5019 típusú erősítő (a), KISTLER 9257B erőmérőpad (b)

A műszer piezo érzékelője alkalmas erő, nyomás, ütés és rezgés mérésére. A Kistler erőmérőpadban piezorezisztív nyomásellenállások találhatók, tehát piezoelektromos elven működik. Terhelés nélkül is mérhető egy alap erőérték a műszerrel a maradó elektromos töltések miatt, ezért korrigálni kell a kapott eredményeket, hogy a tényleges értékeket kapjam meg.

A forgácsolás során a Kistler erőmérő segítségével mért erőértékek elemzésére a Dynoware szoftvert használtam. Az erődiagramokat szűrni, elemezni is lehet a segítségével. Exportálni tudjuk a mérési adatokat Excel táblázatba, ami megkönnyíti a további elemzéseket.

4 FORGÁCSALAK CAD MODELLEZÉSE GÖMBVÉGŰ MARÓVAL TÖRTÉNŐ MARÁS ESETÉN

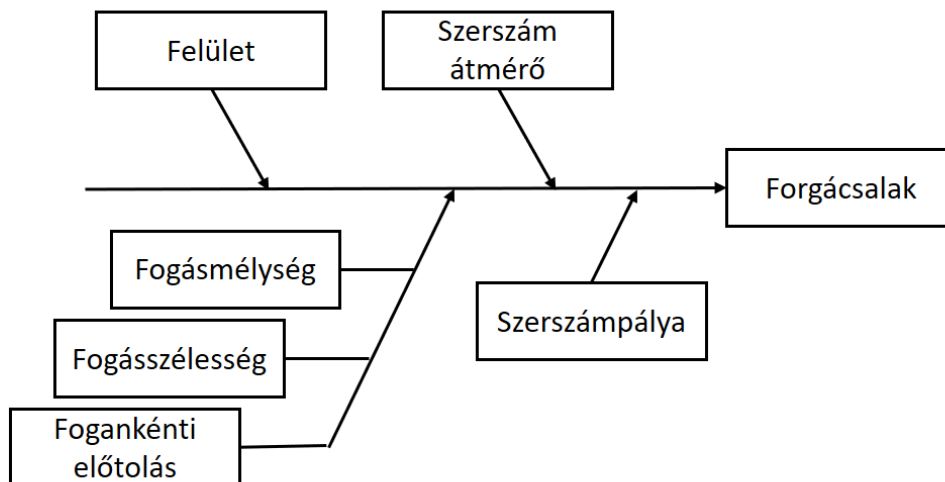
A megmunkálás során keletkező forgács alakjának ismerete fontos a forgácsolás körülményeinek vizsgálatakor. A forgács mérete, térfogata, keresztmetszete alapján következtetni lehet a forgácsolóerő nagyságára. Ha ezt ismerjük, előre lehet jelezni a forgácsolt felület mikro és makro pontosságát.

Szabad formájú felületek gömbvégű szerszámmal történő marása során azonban eltér a térfogat ettől a képlettől. A szerszám dolgozó élhossza folyamatosan változik, így hol nagyobb, hol pedig kisebb része dolgozik. Így a kialakuló forgács térfogata is folyamatosan változik, mely befolyásolja a forgácsolóerő nagyságát, valamint a pontosságra is hatással van.

A vizsgálat során a szerszám ábrázolása gömbként történt, mely a valós szerszám egyszerűsített alakja, ez a geometriai modellezést nagymértékben felgyorsítja.

4.1 Forgácsalak geometriai meghatározása

A geometriai modellezés során a cél az volt, hogy létrehozzak egy parametrikus CAD modellt, mely alkalmas a felületmodell bármely pontjában meghatározni a kialakuló forgács térfogatát, és keresztmetszetét. Ehhez a szerszámhelyzet-koordináták parametrizálhatósága szükséges, továbbá a forgács alakját meghatározó paramétereket figyelembe kell venni. Ezek a paraméterek a fogásmélység (a_p), az oldallépés (fogásszélesség) (a_e), a fogankénti előtolás (f_z), a marási irány és az x tengely által bezárt szög (A_f) és a szerszám átmérője (D_c) (39. ábra).



39. ábra: A forgácsalakot meghatározó tényezők

A modellezés során a forgácsalakot befolyásoló tényezőket paramétereztem, így ezek változtatásával a forgácsolás körülményei vizsgálhatók. A vizsgált paraméterek: a szerszám átmérője (D_c), helyzete (x,y), a felületi normális, a fogankénti előtolás (f_z), az előtolás iránya (A_f), a fogásszélesség (a_e) és a fogásmélység (a_p).

A szimuláció során a fogankénti előtolás és a fogásszélesség értékét változtattam többféle előtolási irány mellett. A szerszám átmérő $D_c = 10$ mm, a fogásmélység $a_p = 0,3$ mm, a felületi normális irányát pedig a tesztarab alakja és a szerszám aktuális helyzete határozza meg. A forgácsalak geometriai modellezése során CATIA V5 CAD rendszert használtam.

A CAD modell alapján meghatároztam a generált elméleti forgácsalak térfogatát (V), valamint a térfogat és a szerszám irányába néző felület területének (A) hányadosaként az átlagos forgácsvastagságot (h_m).

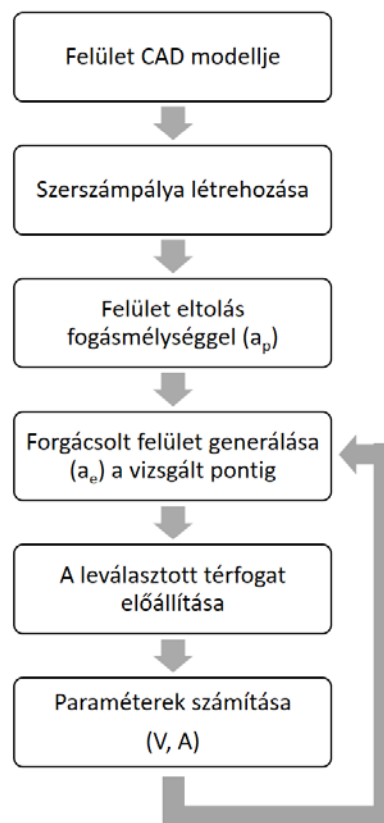
$$h_m = \frac{V}{A}$$

Az előtolás irányának értékei a modellezés során $0,0^\circ$; $22,5^\circ$; $45,0^\circ$; $67,5^\circ$ és $90,0^\circ$. Az előtolás és fogásszélesség értékét 6 párban vizsgáltam a következő táblázat szerint. Az 1-3. esetben a fogankénti előtolás volt állandó és változott az oldallépés (fogásszélesség). A 3-5. esetben az oldallépés volt állandó és a fogankénti előtolás változott. A 6. esetben pedig ennek a két paraméternek a vizsgált maximális értékét vizsgáltam.

No.	f_z [mm]	a_e [mm]
1	0,08	0,35
2	0,08	0,25
3	0,08	0,15
4	0,12	0,15
5	0,16	0,15
6	0,16	0,35

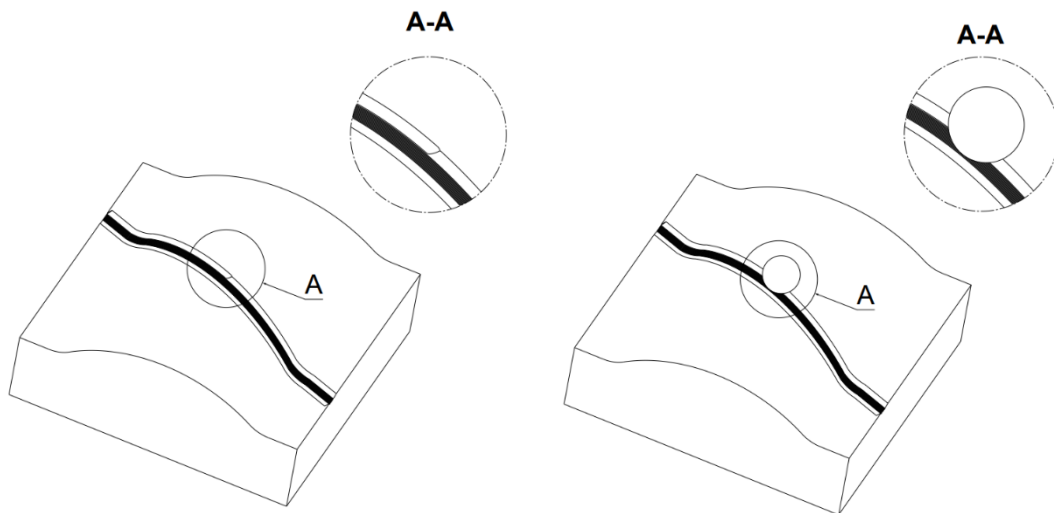
6. táblázat: Forgácsolási paraméterek

A modellezés menete a konvex darabon kerül bemutatásra. A modellezést ezerszeres nagyításban végeztem a CAD rendszer geometriai felbontóképessége miatt. A modellezés első lépéseként a kiinduló felületet el kell tolni a fogásmélység (a_p) értékével, ami az elősimított geometriát jelenti (40. ábra). A modellezés következő lépése a szerszám-pálya koordináta pontjainak parametrizálása. A felületre szerkesztett szerszám-pálya mentén kell végig vinni a szerszám forgácsoló részét jelentő adott átmérőjű félgömböt, mely így érinti a megmunkálendő felületet.



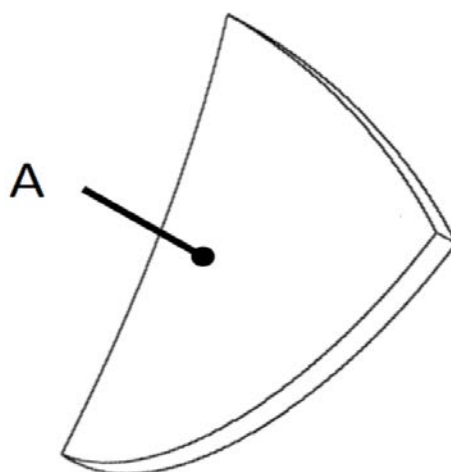
40. ábra: A modellezés folyamata

Ez után el kell távolítani azt az anyagrészt, amit a szerszám már érintett, addig a koordinátáig, ahol meghatározzuk a forgács alakját és paramétereit (41. ábra).



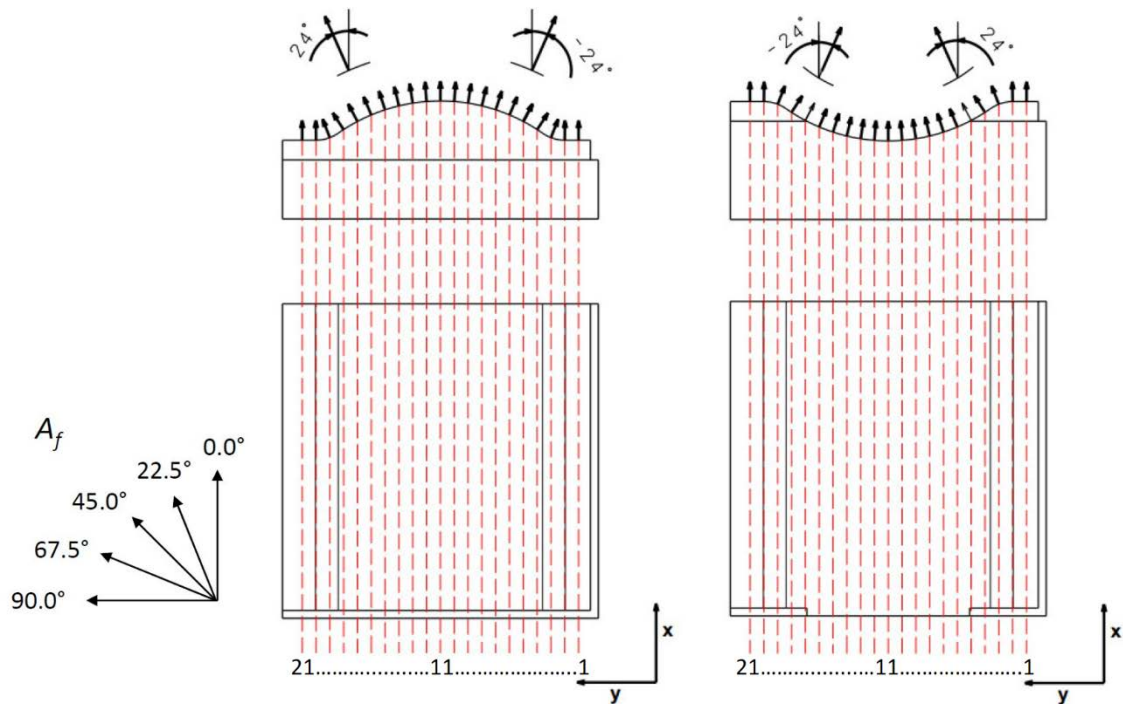
41. ábra: A szimuláció CAD modellje

A bal oldali ábrán az adott koordinátánál már megmunkált felület látható. A jobb oldali ábrán ugyanez látható a szerszám egyszerűsített ábrázolása mellett a vizsgált helyzetben. A szerszám, azaz a félgömb pontosan a fogankénti előtolással megegyező mértékben van eltolva a szerszámhálya mentén. A képen látható modellen a számítógép grafikai képessége miatt nem az összes szerszámhálya látható, csak a mérési pont előtti 20 szerszámhálya, ami vastag fekete vonalként jelenik meg. Ez az egyszerűsítés nem befolyásolja a kapott eredményt, mert a szerszám az ábrázolt szerszámhályak felett helyezkedik el. Az utolsó lépésben már csak a két test, a szerszám és a megmunkált felület közös részét kell létrehozni, így megkapjuk a geometriailag kiszűrt forgácsot, amelyet a 42. ábra mutat.



42. ábra: Modellezett forgácsalak

A vizsgálat során mind a két munkadarabon 21-21 pontban történt a forgács kiszerkesztése. Ezekben a pontokban a felület normálisa mindig más és más irányú, a megmunkálandó felület miatt folyamatosan, de csak az egyik irányba (y) változik 0° és 33° között. A vizsgálati pontok helyzetét a 43. ábra mutatja. A modellezés során összesen 1260 (2 db különböző munkadarab geometria; 6 db különböző technológiai paraméter beállítás; 5 db különböző megmunkálási irány; 21 db különböző pozíció) forgácsalak került meghatározásra.



43. ábra: A modellezés során vizsgált szerszám pozíciók

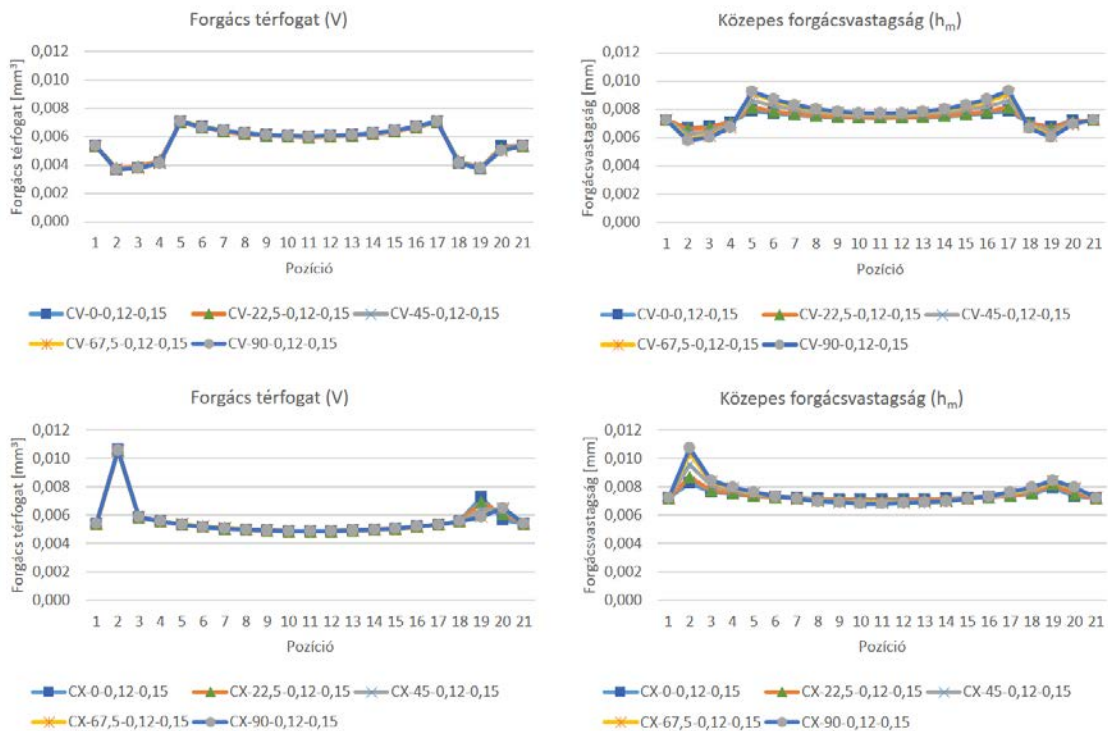
4.2 Eredmények

A fogácsleválasztás CAD szimulációja alapján megállapítható, hogy a felület változása miatt változik a pálya mentén a forgács térfogat és a forgácsvastagság, valamint ez a változás eltér egymástól a konkáv (homorú, CV) és a konvex (domború, CX) darab esetén.

A 44. ábra az $f_z = 0.12 \text{ mm} / a_e = 0.15 \text{ mm}$ paraméterek mellett mutatja a változást. Az ábrán használt jelölések a következők:

CV-22,5-0,12-0,15 Konkáv - marási irány= $22,5^\circ$ - $f_z=0,12 \text{ mm}$ - $a_e=0,15 \text{ mm}$

A 44. ábra és a további beállításokhoz tartozó diagrammok megtalálhatók a mellékletben, nagyobb méretben.



44. ábra: A forgácstérfogat és a közepes forgácsvastagság változása a marási irány szerint a vizsgált mérési pozíciókban

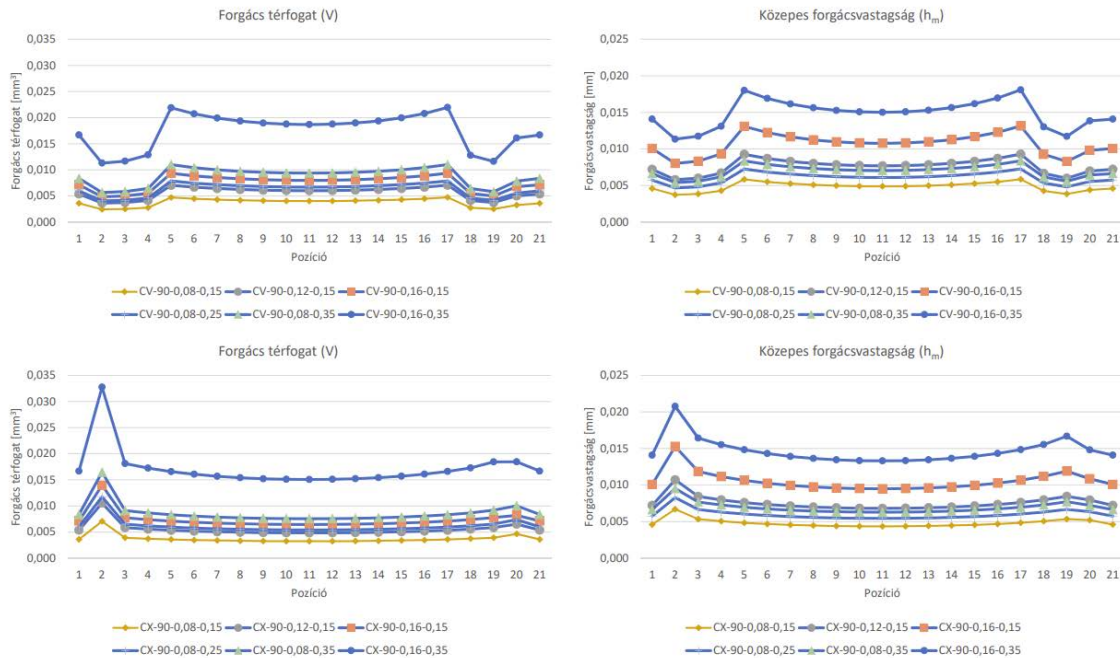
A domború és homorú felület esetén a görbék jellege eltér, mivel a homorú felület marásakor a szerszám nagyobb része érintkezik a felülettel. A homorú felület esetén a forgács térfogata nagyobb az $R45$ íves szakaszon.

Mint látható, a forgácstérfogat és forgácsvastagság görbék nem szimmetrikusak. Ez abból adódik, hogy az egyenes szakasz után található íves ($R10$) szakaszokon a szerszám tengelyének helyzete azonos, de a forgácsolási pont, és a forgács alakja eltér. A szerszám rádiusza hol jobban, hol kevésbé ér bele ebbe az íves szakaszba, így a forgács térfogata és közepes vastagság eltér egymástól.

Homorú (CV) felület esetén a bekezdő és kivezető rádiusz domború, így itt lecsökken a forgács térfogata. A domború felület esetén (CX) a rádiusz homorú, így itt nagymértékű növekedés figyelhető meg. A növekedés mértéke a felület rádiusz és a szerszám rádiusz viszonyától függ. A kivezető szakaszon ez a növekedés kisebb mértékű.

A forgács térfogat esetében a görbék közel egybe esnek, tehát a marási iránytól nem függ az értéke. A közepes forgácsvastagság értékek viszont eltérnek, tehát a marási irány befolyásolja az értékét. A diagram alapján az $A_f = 0^\circ$ esetén a legkisebb, az $A_f = 90^\circ$ esetén a legnagyobb a közepes forgács keresztmetszet. A homorú (CX) felület esetén viszont az eltérés kisebb.

A fogankénti előtolás és a fogásszélesség hatását mutatja a 45. ábra, 90°-os marási irány esetén. Mint látható a görbék jellege hasonló. A legkisebb forgács térfogat az $f_z = 0,08$ mm / $a_e = 0,15$ mm beállításnál van, a legnagyobb az $f_z = 0,16$ mm / $a_e = 0,35$ mm paraméterek esetén, tehát a fogásszélesség (a_e) szerepe jelentősebb.

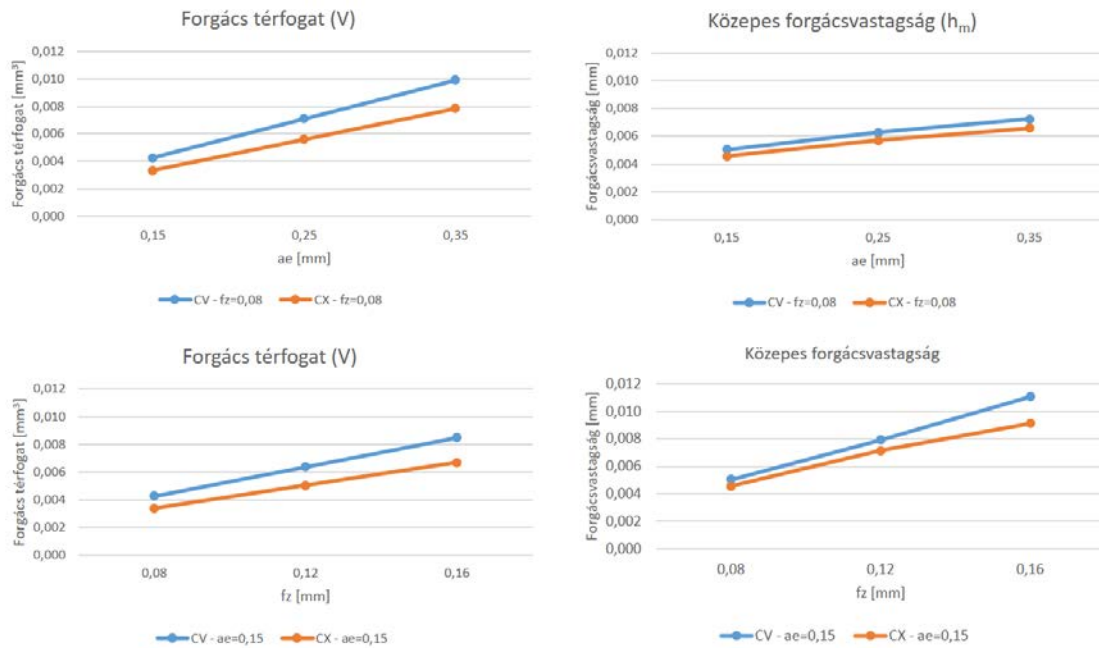


45. ábra A forgácstérfogat és a közepes forgácsvastagság változása a marási paraméterek függvényében 90°-os marási irány esetén.

A 45. ábra és a további beállításokhoz tartozó diagrammok megtalálhatók a mellékletben, nagyobb méretben.

A további vizsgálatok során az R45 mm-es íves részhez tartozó adatokat elemzem, a felület rádiusza tehát állandó.

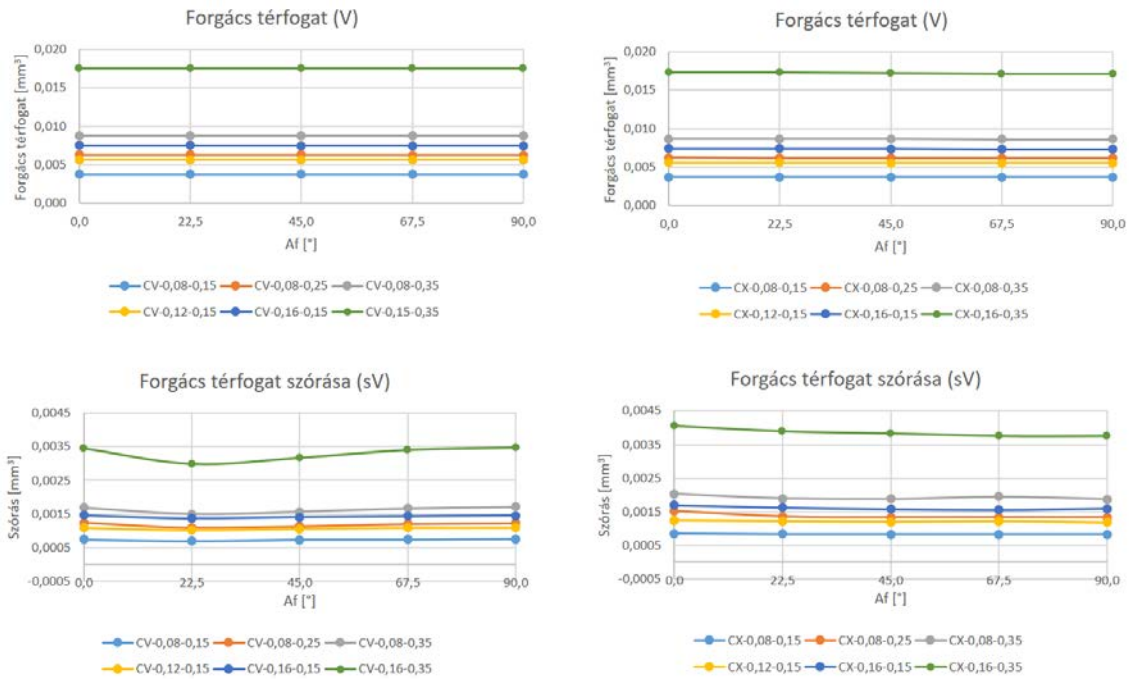
A 46. ábra az adott f_z - a_e paraméterekkel végzett szimulációk egy-egy beállításához tartozó átlagos értékeit mutatja. Ezek alapján megállapítható, hogy a homorú (CV) felület esetén mind a forgácstérfogat, mind a közepes forgácsvastagság nagyobb. A görbék meredeksége alapján a forgácstérfogat esetén a fogásszélesség, a forgácsvastagság esetén az előtolás mutat nagyobb hatást.



46. ábra Átlagértékek az íves (R45) szakaszon.

A 46. ábra diagramjai megtalálhatók a mellékletben, nagyobb méretben.

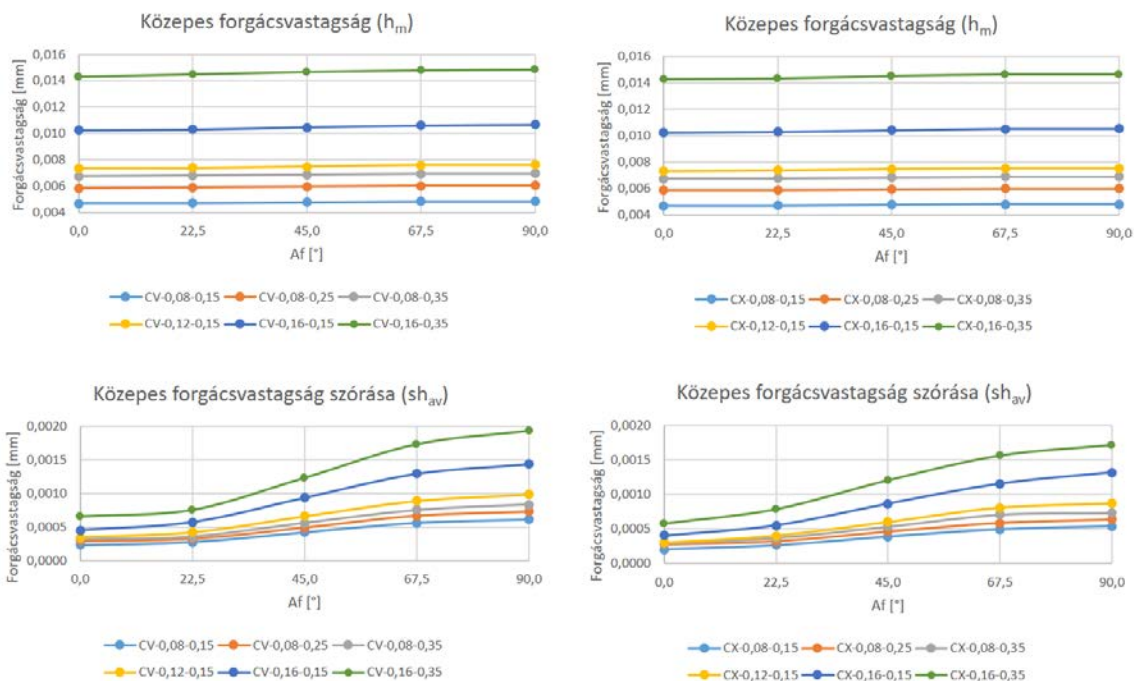
A 47. ábra és 48. ábra az adott paraméterekkel, adott irányban végzett marás esetében mutatja az átlagos értékeket a teljes pálya mentén. Ezek alapján a forgács térfogat átlagos értéke nem érzékeny a marás irányára. A szórás értéke, ami a pálya menti változást jelzi, szintén érzéketlen a marási irányra, homorú (CV) felület esetén kisebb, domború felület (CX) esetén kis mértékben nagyobb, vagyis homorú felület esetén a forgács térfogata kevésbé változik a pálya mentén.



47. ábra A forgácstérfogat átlaga és szórása marási irány szerint.

A 47. ábra diagramjai megtalálhatók a mellékletben, nagyobb méretben.

A közepes forgácsvastagság átlagértékei (48. ábra) a homorú (CV) felület esetén kismértékű emelkedést mutatnak a marási irány változásával, míg a domború felület marásakor ennek nincs hatása. A közepes forgácsvastagság pálya menti szórás értékei viszont jelentősen változnak a pálya irányának függvényében, a 0°-os irány mellett a legkisebb, míg 90° esetén a legnagyobb a változás. Homorú felület esetén a változás kicsit nagyobb, mint domború felület esetén.



48. ábra Közepes forgácsvastagság átlaga és szórása marási irány szerint.

A 48. ábra 47. ábradiagramjai megtalálhatók a mellékletben, nagyobb méretben.

4.3 Regresszió analízis

A CAD szimuláció adatai alapján regressziós vizsgálatot végeztem az R45 mm rádiusszal rendelkező felületszakaszra, figyelembe véve a felület normálisának irányát (N) és a felület konvex illetve konkáv jellegét. A CV-CX paraméter -1, ha a felület konkáv és 1, ha konvex. A regressziós számításokhoz 780 adatot vettem figyelembe.

Lineáris regressziót alkalmazva az eredmény (E0) azt mutatja, hogy a regresszió pontossága megfelelő ($R^2(\text{adj})=96,6\%$), a felületi normális irányának viszont kis hatása van az eredményre ($P=0,960$).

Ha a normálist négyzetesen vesszük figyelembe (E1), a regresszió pontossága javul és minden paraméter hatással van az eredményre.

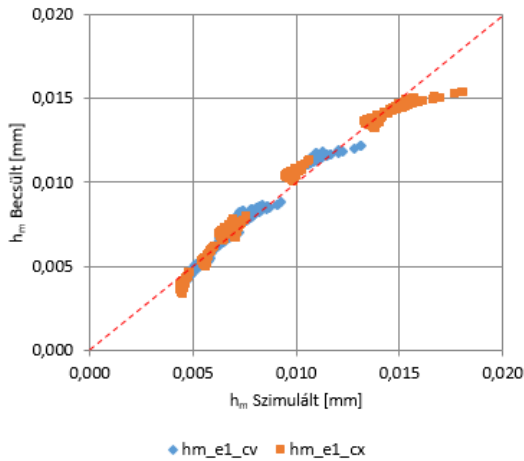
A fogásszélesség négyzetes értékének figyelembevétele (E2), kis mértékben, de tovább javítja a regresszió pontosságát.

Ha az adathalmazt külön vizsgáljuk (E3) konkáv és konvex felület esetén, az E1 struktúra szerint, akkor azt tapasztaljuk, hogy a konkáv felület esetén jobb ($R^2(\text{adj})=98,9\%$), a konvex esetén rosszabb ($R^2(\text{adj})=96,4\%$) a regresszió pontossága.

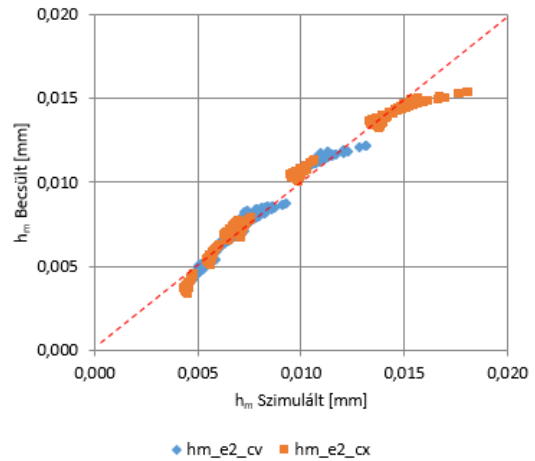
Változat	Regresszió	R ² (adj)																																																												
E0	$h_{av_e0} = C0 + C1 CV-CX + C2 A_f + C3 fz + C4 ae + C5 N$ <table border="1"> <thead> <tr> <th>Predictor</th> <th>Coef</th> <th>SE Coef</th> <th>T</th> <th>P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C0 - Constant</td> <td>-0.00498697</td> <td>0.00009988</td> <td>-49.93</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>C1 - CV-CX</td> <td>-0.00042513</td> <td>0.00002216</td> <td>-19.18</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>C2 - A_f</td> <td>0.00000416</td> <td>0.00000070</td> <td>5.97</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>C3 - fz</td> <td>0.0837394</td> <td>0.0006177</td> <td>135.57</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>C4 - ae</td> <td>0.0159158</td> <td>0.0002471</td> <td>64.42</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>C5 - N</td> <td>-0.00000007</td> <td>0.00000129</td> <td>-0.05</td> <td>0.960</td> </tr> </tbody> </table>	Predictor	Coef	SE Coef	T	P	C0 - Constant	-0.00498697	0.00009988	-49.93	0.000	C1 - CV-CX	-0.00042513	0.00002216	-19.18	0.000	C2 - A_f	0.00000416	0.00000070	5.97	0.000	C3 - fz	0.0837394	0.0006177	135.57	0.000	C4 - ae	0.0159158	0.0002471	64.42	0.000	C5 - N	-0.00000007	0.00000129	-0.05	0.960	96.9%																									
Predictor	Coef	SE Coef	T	P																																																										
C0 - Constant	-0.00498697	0.00009988	-49.93	0.000																																																										
C1 - CV-CX	-0.00042513	0.00002216	-19.18	0.000																																																										
C2 - A_f	0.00000416	0.00000070	5.97	0.000																																																										
C3 - fz	0.0837394	0.0006177	135.57	0.000																																																										
C4 - ae	0.0159158	0.0002471	64.42	0.000																																																										
C5 - N	-0.00000007	0.00000129	-0.05	0.960																																																										
E1	$h_{av_e1} = C0 + C1 CV-CX + C2 A_f + C3 fz + C4 ae + C5 N^2$ <table border="1"> <thead> <tr> <th>Predictor</th> <th>Coef</th> <th>SE Coef</th> <th>T</th> <th>P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C0 - Constant</td> <td>-0.00531952</td> <td>0.00008968</td> <td>-59.32</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>C1 - CV-CX</td> <td>-0.00042513</td> <td>0.00001933</td> <td>-22.00</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>C2 - A_f</td> <td>0.00000416</td> <td>0.00000061</td> <td>6.85</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>C3 - fz</td> <td>0.0837394</td> <td>0.0005387</td> <td>155.45</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>C4 - ae</td> <td>0.0159158</td> <td>0.0002155</td> <td>73.86</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>C5 - N^2</td> <td>0.00000113</td> <td>0.00000007</td> <td>15.61</td> <td>0.000</td> </tr> </tbody> </table>	Predictor	Coef	SE Coef	T	P	C0 - Constant	-0.00531952	0.00008968	-59.32	0.000	C1 - CV-CX	-0.00042513	0.00001933	-22.00	0.000	C2 - A_f	0.00000416	0.00000061	6.85	0.000	C3 - fz	0.0837394	0.0005387	155.45	0.000	C4 - ae	0.0159158	0.0002155	73.86	0.000	C5 - N^2	0.00000113	0.00000007	15.61	0.000	97.4%																									
Predictor	Coef	SE Coef	T	P																																																										
C0 - Constant	-0.00531952	0.00008968	-59.32	0.000																																																										
C1 - CV-CX	-0.00042513	0.00001933	-22.00	0.000																																																										
C2 - A_f	0.00000416	0.00000061	6.85	0.000																																																										
C3 - fz	0.0837394	0.0005387	155.45	0.000																																																										
C4 - ae	0.0159158	0.0002155	73.86	0.000																																																										
C5 - N^2	0.00000113	0.00000007	15.61	0.000																																																										
E2	$h_{av_e2} = C0 + C1 CV-CX + C2 A_f + C3 fz + C4 ae + C5 ae^2 + C6 N^2$ <table border="1"> <thead> <tr> <th>Predictor</th> <th>Coef</th> <th>SE Coef</th> <th>T</th> <th>P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C0 - Constant</td> <td>-0.0062177</td> <td>0.0003441</td> <td>-18.07</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>C1 - CV-CX</td> <td>-0.00042513</td> <td>0.00001925</td> <td>-22.08</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>C2 - A_f</td> <td>0.00000416</td> <td>0.00000060</td> <td>6.88</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>C3 - fz</td> <td>0.0843990</td> <td>0.0005894</td> <td>143.19</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>C4 - ae</td> <td>0.023567</td> <td>0.002839</td> <td>8.30</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>C5 - ae^2</td> <td>-0.015391</td> <td>0.005694</td> <td>-2.70</td> <td>0.007</td> </tr> <tr> <td>C6 - N^2</td> <td>0.00000113</td> <td>0.00000007</td> <td>15.67</td> <td>0.000</td> </tr> </tbody> </table>	Predictor	Coef	SE Coef	T	P	C0 - Constant	-0.0062177	0.0003441	-18.07	0.000	C1 - CV-CX	-0.00042513	0.00001925	-22.08	0.000	C2 - A_f	0.00000416	0.00000060	6.88	0.000	C3 - fz	0.0843990	0.0005894	143.19	0.000	C4 - ae	0.023567	0.002839	8.30	0.000	C5 - ae^2	-0.015391	0.005694	-2.70	0.007	C6 - N^2	0.00000113	0.00000007	15.67	0.000	97.5%																				
Predictor	Coef	SE Coef	T	P																																																										
C0 - Constant	-0.0062177	0.0003441	-18.07	0.000																																																										
C1 - CV-CX	-0.00042513	0.00001925	-22.08	0.000																																																										
C2 - A_f	0.00000416	0.00000060	6.88	0.000																																																										
C3 - fz	0.0843990	0.0005894	143.19	0.000																																																										
C4 - ae	0.023567	0.002839	8.30	0.000																																																										
C5 - ae^2	-0.015391	0.005694	-2.70	0.007																																																										
C6 - N^2	0.00000113	0.00000007	15.67	0.000																																																										
E3	$h_{av_cv} = C0 + C1 A_f + C2 fz + C3 ae + C4 N^2$ <table border="1"> <thead> <tr> <th>Predictor</th> <th>Coef</th> <th>SE Coef</th> <th>T</th> <th>P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C0 - Constant</td> <td>-0.00337007</td> <td>0.00008000</td> <td>-42.13</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>C1 - A_f</td> <td>0.00000780</td> <td>0.00000038</td> <td>20.53</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>C2 - fz</td> <td>0.0748440</td> <td>0.0004569</td> <td>163.79</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>C3 - ae</td> <td>0.0112976</td> <td>0.0001828</td> <td>61.81</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>C4 - N^2</td> <td>0.00000128</td> <td>0.00000005</td> <td>28.09</td> <td>0.000</td> </tr> </tbody> </table> $h_{av_cx} = C0 + C1 A_f + C2 fz + C3 ae + C4 N^2$ <table border="1"> <thead> <tr> <th>Predictor</th> <th>Coef</th> <th>SE Coef</th> <th>T</th> <th>P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>C0 - Constant</td> <td>-0.0061906</td> <td>0.0001541</td> <td>-40.18</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>C1 - A_f</td> <td>0.00000156</td> <td>0.00000110</td> <td>1.42</td> <td>0.156</td> </tr> <tr> <td>C2 - fz</td> <td>0.0863176</td> <td>0.0009551</td> <td>90.38</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>C3 - ae</td> <td>0.0180070</td> <td>0.0003820</td> <td>47.13</td> <td>0.000</td> </tr> <tr> <td>C4 - N^2</td> <td>0.00000103</td> <td>0.00000013</td> <td>7.87</td> <td>0.000</td> </tr> </tbody> </table>	Predictor	Coef	SE Coef	T	P	C0 - Constant	-0.00337007	0.00008000	-42.13	0.000	C1 - A_f	0.00000780	0.00000038	20.53	0.000	C2 - fz	0.0748440	0.0004569	163.79	0.000	C3 - ae	0.0112976	0.0001828	61.81	0.000	C4 - N^2	0.00000128	0.00000005	28.09	0.000	Predictor	Coef	SE Coef	T	P	C0 - Constant	-0.0061906	0.0001541	-40.18	0.000	C1 - A_f	0.00000156	0.00000110	1.42	0.156	C2 - fz	0.0863176	0.0009551	90.38	0.000	C3 - ae	0.0180070	0.0003820	47.13	0.000	C4 - N^2	0.00000103	0.00000013	7.87	0.000	98.9% 96.4%
Predictor	Coef	SE Coef	T	P																																																										
C0 - Constant	-0.00337007	0.00008000	-42.13	0.000																																																										
C1 - A_f	0.00000780	0.00000038	20.53	0.000																																																										
C2 - fz	0.0748440	0.0004569	163.79	0.000																																																										
C3 - ae	0.0112976	0.0001828	61.81	0.000																																																										
C4 - N^2	0.00000128	0.00000005	28.09	0.000																																																										
Predictor	Coef	SE Coef	T	P																																																										
C0 - Constant	-0.0061906	0.0001541	-40.18	0.000																																																										
C1 - A_f	0.00000156	0.00000110	1.42	0.156																																																										
C2 - fz	0.0863176	0.0009551	90.38	0.000																																																										
C3 - ae	0.0180070	0.0003820	47.13	0.000																																																										
C4 - N^2	0.00000103	0.00000013	7.87	0.000																																																										

7. táblázat: Regressziós táblázat

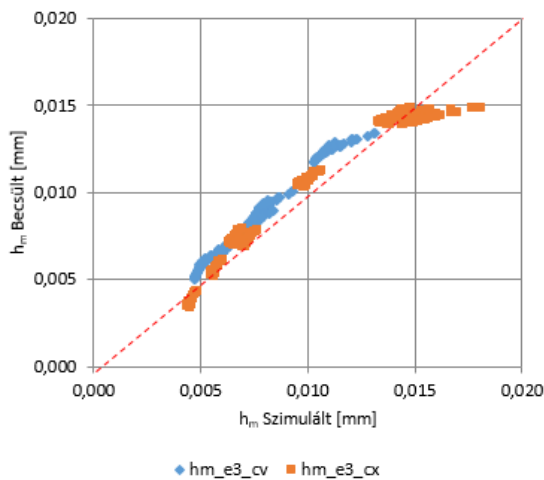
A CAD szimulációval és a regresszióval előállított adatokat mutatja a következő diagram. Az a) és b) ábra nagyon hasonló. A közepes forgácsvastagság középső tartományában az E1 és E2 regresszió jól működik, azonban a nagyobb értékek esetén alulbecsüli az értékeket. Az E3 változat esetén a középső tartományt felül, a felső tartományt alulbecsüli a regressziós becslés.



a) E1



b) E2

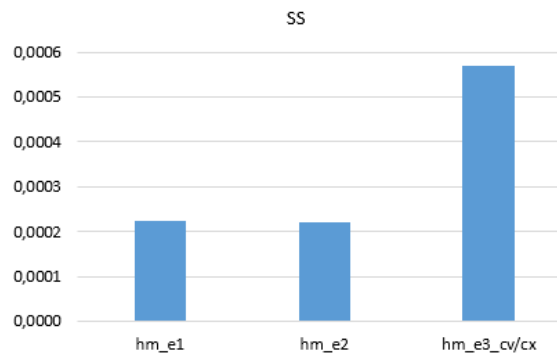


c) E3

49. ábra: A CAD szimulációval és a regresszióval számot forgácsvastagság értékek

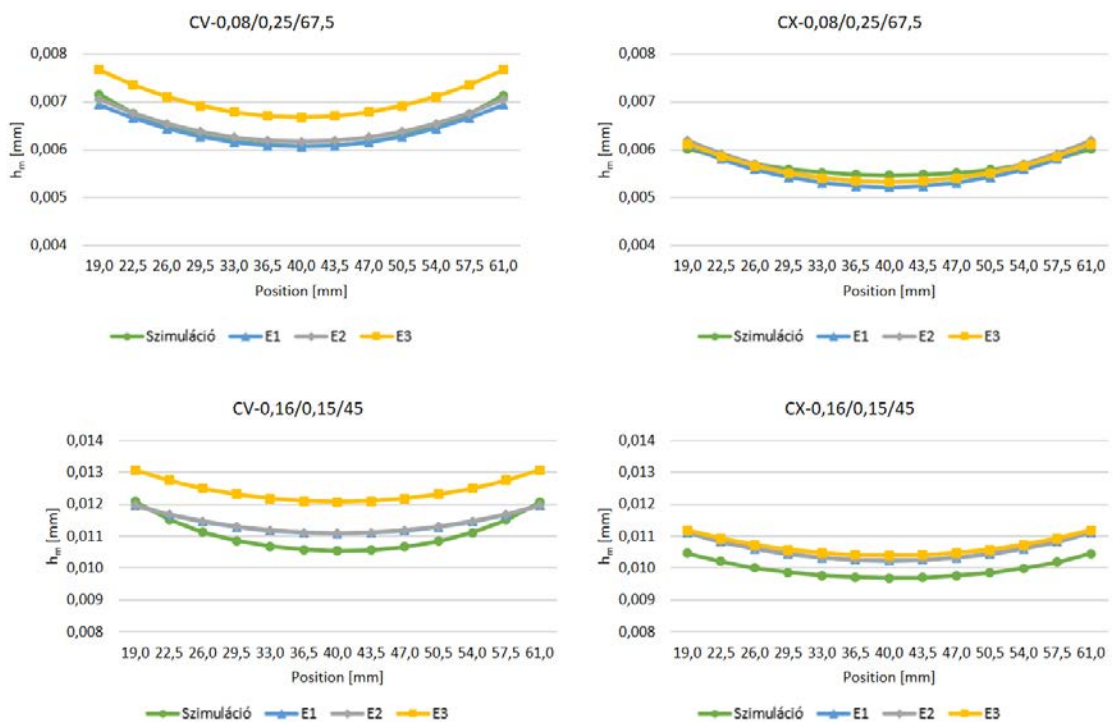
Az egyes módszerek pontosságát a hiba négyzetek összegével (SS - sum of squares) is jellemezhetjük, tehát összegezzük a CAD szimuláció és a regressziós becslés különbségeinek négyzetét 780 pontpárra. Mint az 50. ábra mutatja, az E1 és E2 módszer

esetén ez az érték közel azonos ($2.24E-4$ és $2.22E-4$), míg az E3 módszer esetén a hiba összeg 2.5-szer nagyobb ($5.68E-4$).



50. ábra: A regressziós függvények összegzett négyzetes hibája

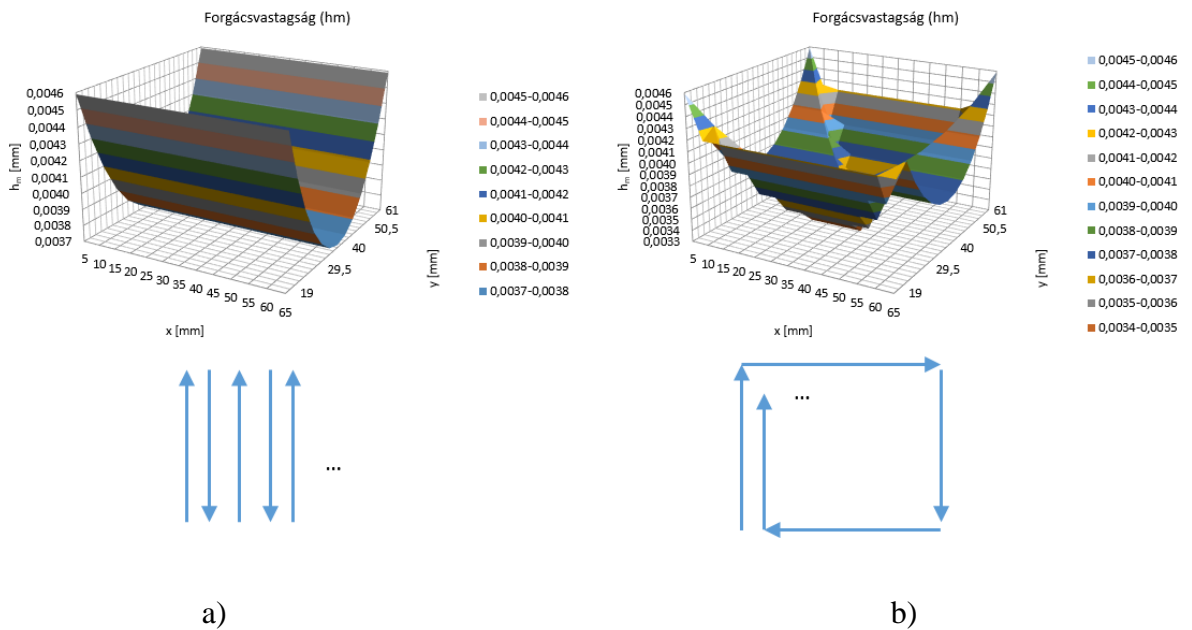
A különböző regressziós függvények közti eltérésre mutat példát az 51. ábra, kiemelve két beállítást. A homorú felület esetén az E3 eltérése látványos, azonban az eltérés a szimulációs és a másik két regressziós módszer adta eredménytől kisebb, mint $1 \mu\text{m}$.



51. ábra: Példák forgácsvastagság értékekre különböző számítási módszere esetén

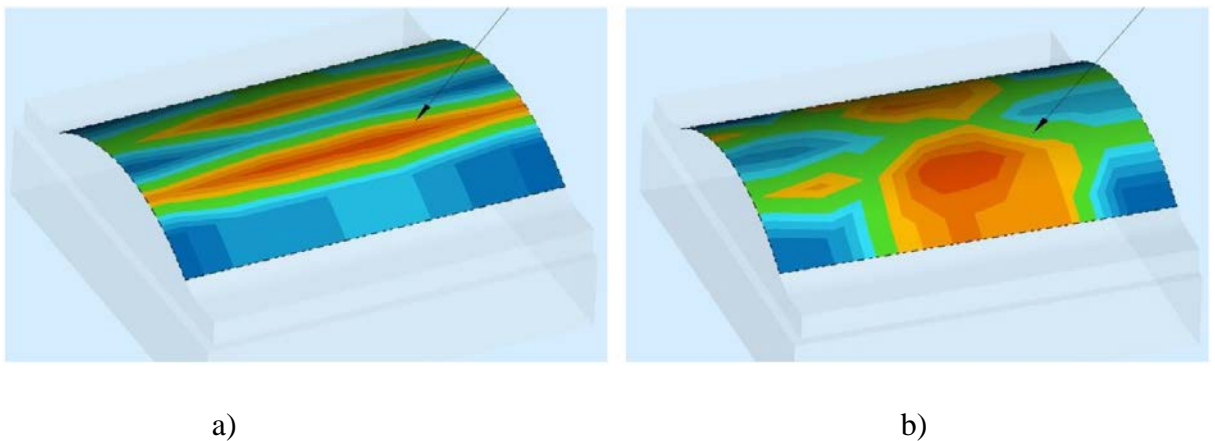
A regressziós összefüggés alapján a felületi normális és a marási irány függvényében kiszámolhatjuk a forgácsvastagság értékét a teljes felületre. Az 52. ábra domború felület esetén mutatja a forgácsvastagság értékeit, $f_z=0.08 \text{ mm}$ és $a_e=0.15 \text{ mm}$ esetén. A

számításhoz az E1 regressziós függvényt használtam. Az a) esetben a marás iránya az y tengellyel párhuzamos. Mint látható, a marás irányában a változás egyenletes, a felület mentén (x irány) a forgács közepes vastagsága állandó. A b) esetben a marás a felület kontúráját követi, tehát egyes szakaszokon az x illetve az y tengellyel párhuzamos. Ebben az esetben jól látszik az átlagos forgácsvastagság változása az egyes szakaszokban. A forgács vastagsága a négy sarokpontban a legnagyobb, a felület közepe felé csökken.



52. ábra: Forgácsvastagság regressziós függvénnyel becsülve ($CX, f_z=0,08\text{mm}, ae=0,15\text{mm}$)

Az 53. ábra az adott paraméterekkel és mozgáspályával mart alkatrészek felületi hibatérképét mutatja. A két ábrán jól látható az x irányú sávos eltérés, illetve a négy sarokban megjelenő eltérés, melyek illeszkednek a forgácsvastagság változásához.



53. ábra: Felület alakeltérése térképe

4.4 Következtetések

Egy homorú és egy domború szabad formájú felület gömbvégű maróval történő megmunkálása során CAD szimulációjával vizsgáltam a forgács alakját, térfogatát és közepes vastagságát.

A szimulációk alapján megállapítható:

- (1) a homorú és a domború felület esetén a forgácstérfogat és a közepes vastagság eltérő módon változik,
- (2) a homorú darab esetén a forgácstérfogat nagyobb, azonos feltételek mellett,
- (3) a forgácstérfogatra a fogásszélesség, a forgácsvastagságra az előtolás mutat nagyobb hatást,
- (4) a forgácstérfogat átlag értéke és szórása nem érzékeny a marás irányára,
- (5) a közepes forgácsvastagság átlag értéke csak kis mértékben érzékeny a marás irányára, azonban a pálya menti változás (szórás) jelentősen.
- (6) A regressziós modell jó közelítéssel határozza meg a forgács elméleti közepes vastagságát, figyelembe véve az előtolás, a fogásszélesség, az előtolási irány és a felületi normális értékét.

Gömbvégű maróval végzett szabad formájú felület simítása során a felület változásával folyamatosan változnak a forgácsleválasztás körülményei, melyek hatással lehetnek a szerszám terhelésére és a felület mikro- és makro pontosságára is. A bemutatott szimulációs és regressziós módszer lehetőséget teremt a szerszámterhelés változásainak vizsgálatára a forgácstérfogaton és vastagságon keresztül, a megfelelő marási stratégia kiválasztására és az elméleti érdekesség meghatározására is.

5 A MINTAVÉTELEZÉSI PONTOK SZÁMÁNAK MEGHATÁROZÁSA A GEOMETRIAI HIBÁK MÉRÉSÉHEZ

A kutatási terv központi eleme a geometriai hibák vizsgálata. A geometriai hibák mérése elsősorban koordináta mérés technika segítségével valósítható meg, melynek eredményét számos paraméter befolyásolja. A mérési módszer (érintkezéssel vagy érintésmentes), a pontmintavételi módszer, az adatfeldolgozás matematikai módszere a szakirodalomban leginkább vizsgált elemek. Jelen fejezet célja, hogy bemutassa a pontmintavételi módszerek és a mérési pontok számának (NoP) a méret- és geometriai eltérésre gyakorolt hatását, szabad formájú felületek esetén. Az eredmények a további kutatások mérési folyamatának alapjául szolgálnak a szerszám pálya és a marási paraméterek hatásának vizsgálatához a méret- és geometriai pontosságra.

5.1 A pontok számának meghatározása

A mérési módszer elemzése négy domború (CX) és négy homorú (CV) teszt darab vizsgálatával történt. A darabok méretei és geometriája (26. ábra), anyaga és a megmunkáló szerszám a 3. fejezetben már ismertetésre került. A simító megmunkálás szerszám pályái az y tengellyel párhuzamosak. A fordulatszám (n) 5100 1/min, a fogásmélység (a_p) 0,3 mm volt. A fogankénti előtolás (f_z), az előtolási sebesség (v_f) és az oldallépés (a_e) a következő táblázat szerint változott.

	n [1/min]	f_z [mm]	v_f [mm/min]	a_p [mm]	a_e [mm]
CV-1	5100	0,08	1630	0,3	0,35
CX-1	5100	0,08	1630	0,3	0,35
CV-2	5100	0,08	1630	0,3	0,25
CX-2	5100	0,08	1630	0,3	0,25
CV-3	5100	0,12	2450	0,3	0,15
CX-3	5100	0,12	2450	0,3	0,15
CV-4	5100	0,16	3260	0,3	0,15
CX-4	5100	0,16	3260	0,3	0,15

8. táblázat: Forgácsolási paraméterek

Az elemzés során az aktuális pontmintázatot a referenciaként felvett 21x21-es mátrix elrendezésű ponthalmazból (441 pont) generáltam. A referenciaértékek a 441 pont kiértékelésének eredményei.

Két pontmintavételi módszert vizsgáltam, az egyenközű mátrixmintát (X-szel jelölve) és a Halton-Zaremba-módszert (HZ-vel jelölve). A mátrixminta azonos pontsűrűséggel fedi le a teljes felületet. Alacsony pontszám esetén azonban néhány régiót nem fed le. A probléma az, hogy a pontmintázat meghatározásakor figyelembe kell venni a felület jellegét, de ekkor a vizsgált felület előzetes feldolgozása szükséges. A kvázi-véletlenszerű módszerek, mint például a Halton-Zaremba-mintázat, jobb mintavétellel fedik le a felületet. A véletlenszerű pontminták kiküszöbölik a periodikus hibák okozta eltéréseket is.

A Halton-Zaremba módszer esetén a pont relatív koordinátái a következőképpen határozhatók meg:

$$x_i = \frac{i}{NoP}$$

$$y_i = \sum_{j=0}^{k-1} b'_{ij} * 2^{(-j-i)}$$

ahol:

i : a pontok száma (0 és (NoP-1) között)

b_{ij} : az i bináris ábrázolás j^{th} -edik számjegye

b'_{ij} : A b_{ij} transzformált értéke

$b'_{ij} = b_{ij}$, ha a j páros

$b'_{ij} = 1 - b_{ij}$, ha a j páratlan

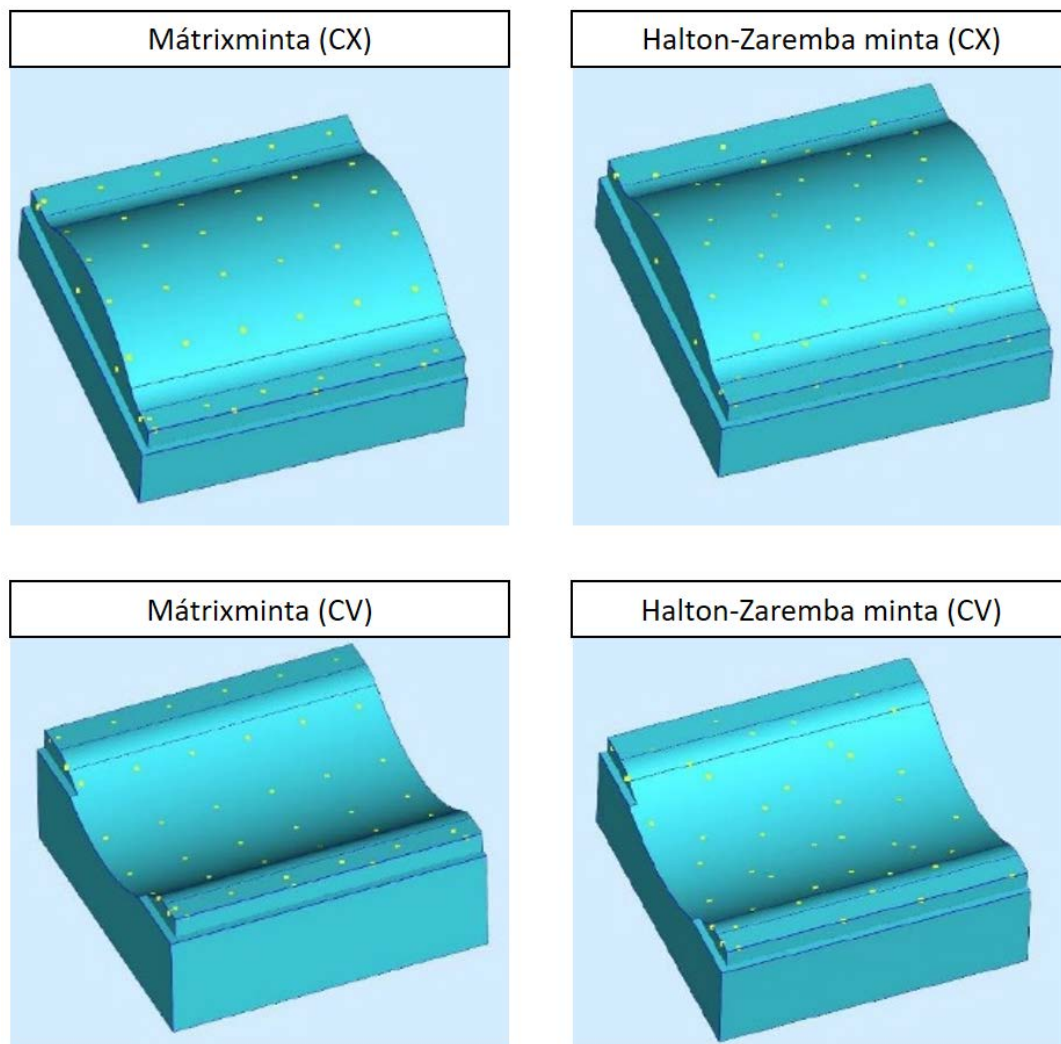
Például, ha 36 pontot határoztak meg (NoP), az i értéke 0-tól 35-ig. Az $i=35$ és a b'_{ij} bináris ábrázolása a következő:

j	5	4	3	2	1	0
b_{ij}	1	0	0	1	0	0
b'_{ij}	0	0	1	1	1	0

9. táblázat: Példa 36 pontra

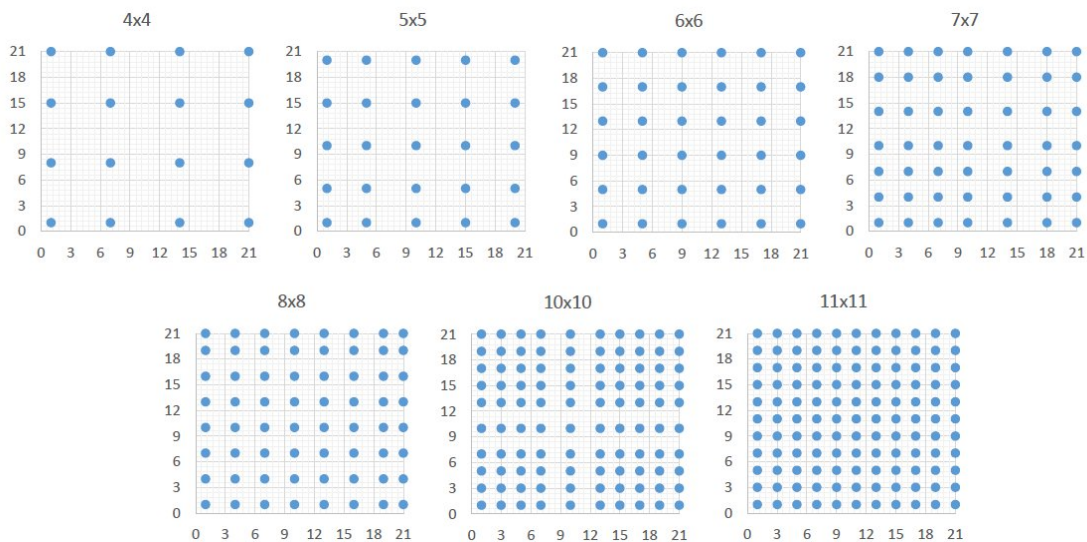
A következő ábra a 36 pontot mutatja a domború és a homorú tesztdarabok esetében. Az első kép az egyenletes mátrixmintát, a második pedig a Halton-Zaremba-mintát mutatja. A mátrixminta esetében a vízszintes szakaszokon több pont van, de a kis sugarú

szakaszokon nincs pont. A Halton-Zaremba-mintázat esetében minden területen vannak pontok.

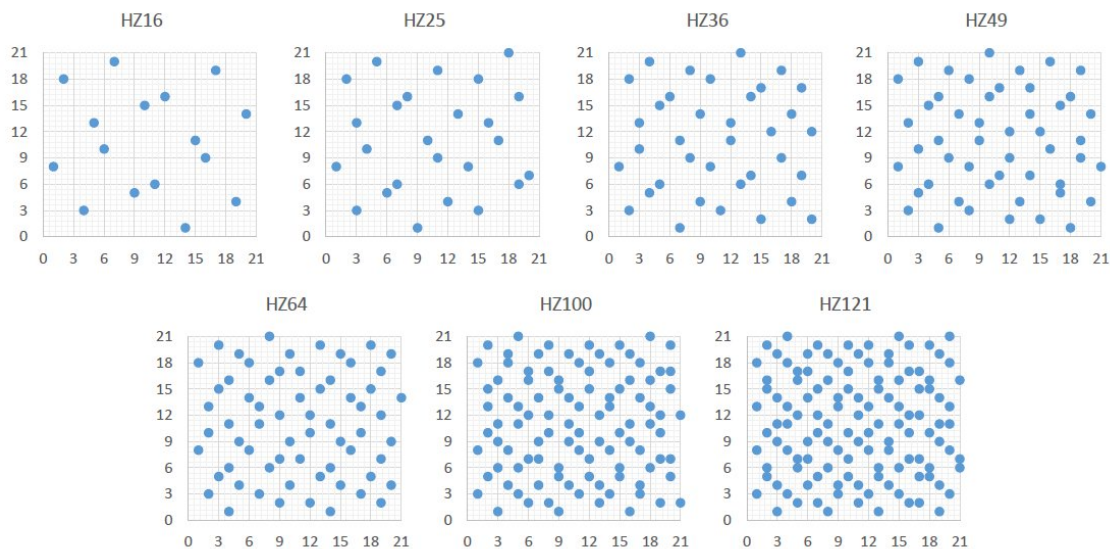


54. ábra: Példa 36 pontos mintavételre

A kutatás során kétféle felületet vizsgáltam meg (CV/CX), amelyek 4 különböző paraméterbeállítással lettek megmunkálva, 7 pontkészlet lett mérve 2 minta alapján, így az adatok száma $2 \times 4 \times 7 \times 2 = 112$ volt. A vizsgált pontok száma a következő volt: $NoP = 16, 25, 36, 49, 64, 100, 121$. A hét mátrixmintát és a hét Halton-Zaremba-mintát az 55. ábra és 56. ábra mutatja.



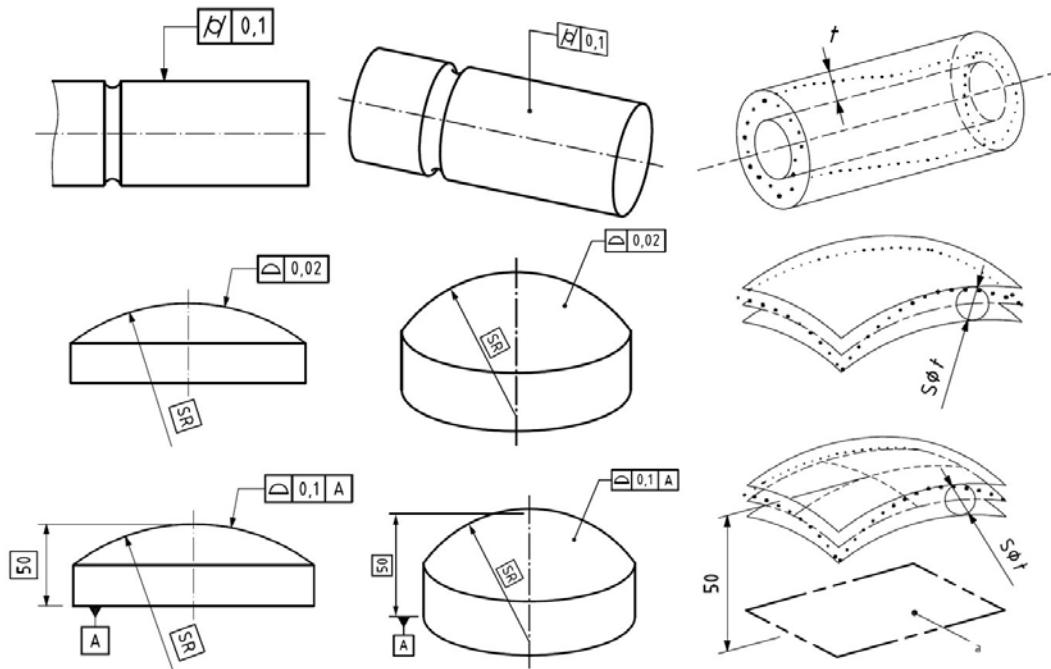
55. ábra: Mátrix pont mintavétel



56. ábra: Halton-Zaremba pont mintavétel

A mért pontok alapján meg lett határozva a hengeres felület sugara (R), a hengeresség hibája (Cyl) és a teljes felület profilhibája (SP). Az ISO 1101 szabvány [85] alapján a hengeresség hibája két olyan henger (57. ábra) radiális távolsága, amelyek azonos tengelyűek és a vizsgált ponthalmazt lefedik. A kiértékelő algoritmusnak meg kell határoznia a tengely vízszintes és függőleges helyzetét és irányát, valamint van a túrésmezőnek egy ötödik, sugár irányú szabadságfoka is. A hengeresség a geometriai alak pontosságát írja le, figyelmen kívül hagyva annak helyzetét. A hengeresség túrés csak hengeres felületek esetén alkalmazható. Általános esetben a felületi profilhiba használható. A felület alaktúrés egy olyan térfogat, amely az elméleti felület normális

irányú szimmetrikus eltolásával jön létre. Ennek a tőrésmezőnek három szabadságfoka van (egy lineáris és két rotációs). A definiált bázisok csökkentik a tőrésmerő szabadságfokát, ami szigorúbb követelményt és nagyobb számított hibát eredményez.



57. ábra: A hengeresség és a felületi profilhiba meghatározása az ISO 1101 szabvány alapján

5.2 Eredmények

A sugár, a hengerességhiba és a profilhiba adatai a mért pontok számának függvényében a következő ábrán láthatók (58. ábra). A sugár értéke nagyon eltérő a domború és a homorú részek esetén (0,09-0,14 mm). A HZ-minta jobb stabilitást biztosít a sugár kiértékelésében, míg a mátrix-minta a referenciaértékektől nagyon eltérő értéket eredményez.

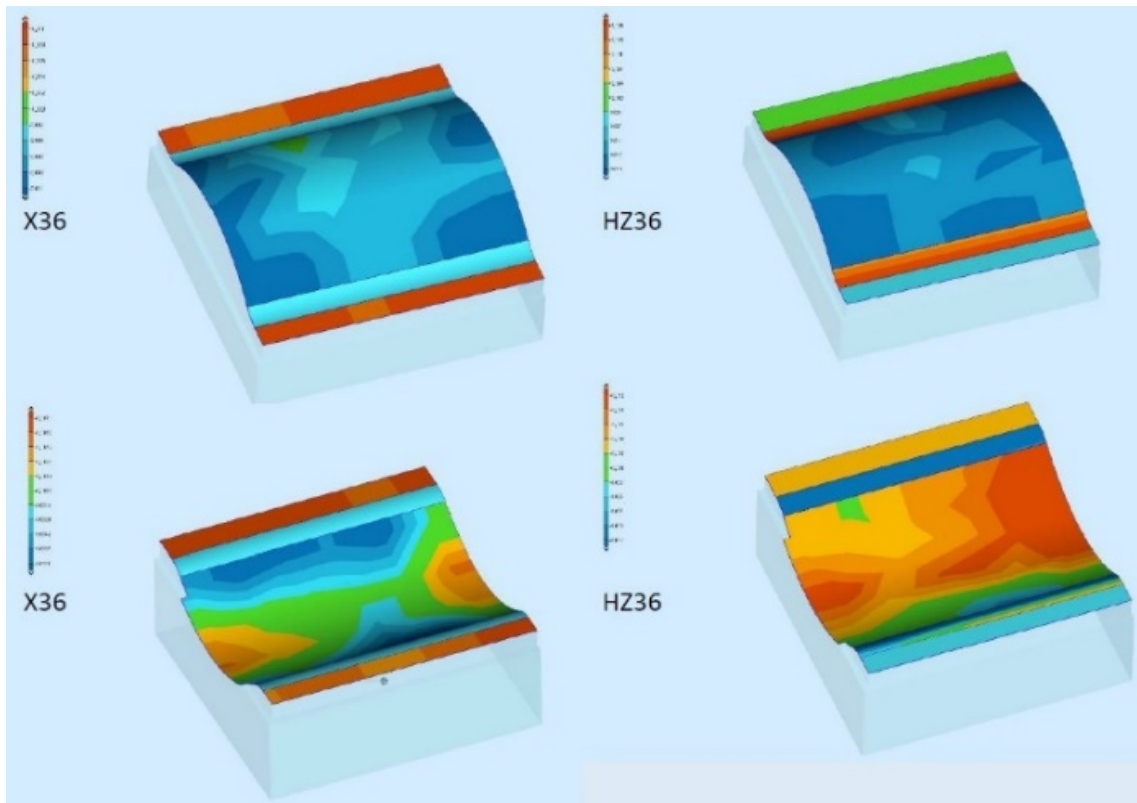
A geometriai hibák esetén a felület jellegének hatása kisebb, de a mért pontok számának jelentősége nyilvánvaló. A kisszámú mért pont kisebb geometriai hibát eredményez, de a HZ-minták hamarabb elérik a referenciaértékhez közeli értéket. A diagramok alapján a vizsgált geometria esetén a 49-es pontszám az alsó határ.



58. ábra: A mért méret- és geometriai adatok

A 58. ábra diagramjai megtalálhatók a mellékletben, nagyobb méretben.

A mérési minta hatása a hibatérképeken is látható. A következő ábra a felületi profilhibájának négy hibatérképét mutatja 36 mért pont esetén. A bal oldali képek a mátrix-minta eredményét, míg a jobb oldaliak pedig a Haltron-Zaremba-módszer hiba térképét mutatják. A mátrix-minta esetében a kis sugarakon nincs mérési pont, így nem lehet figyelembe venni.

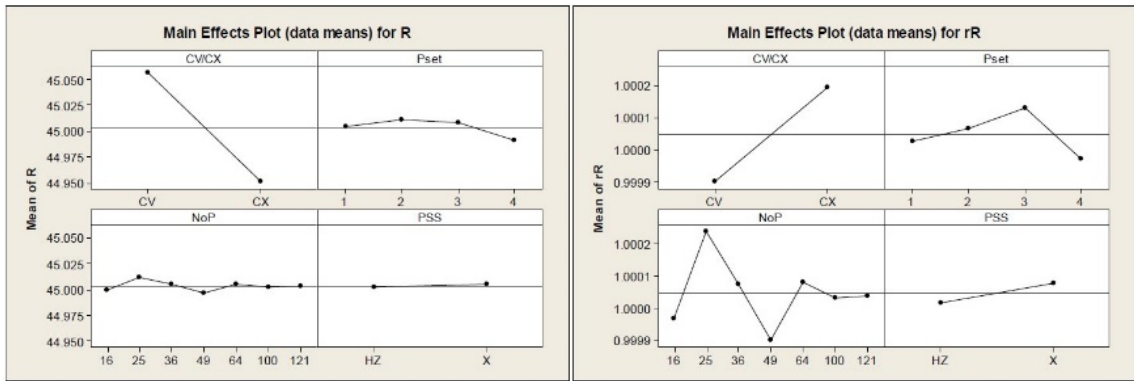


59. ábra: A felületi profil hibája NoP=36 esetén (CX-I; CV-I)

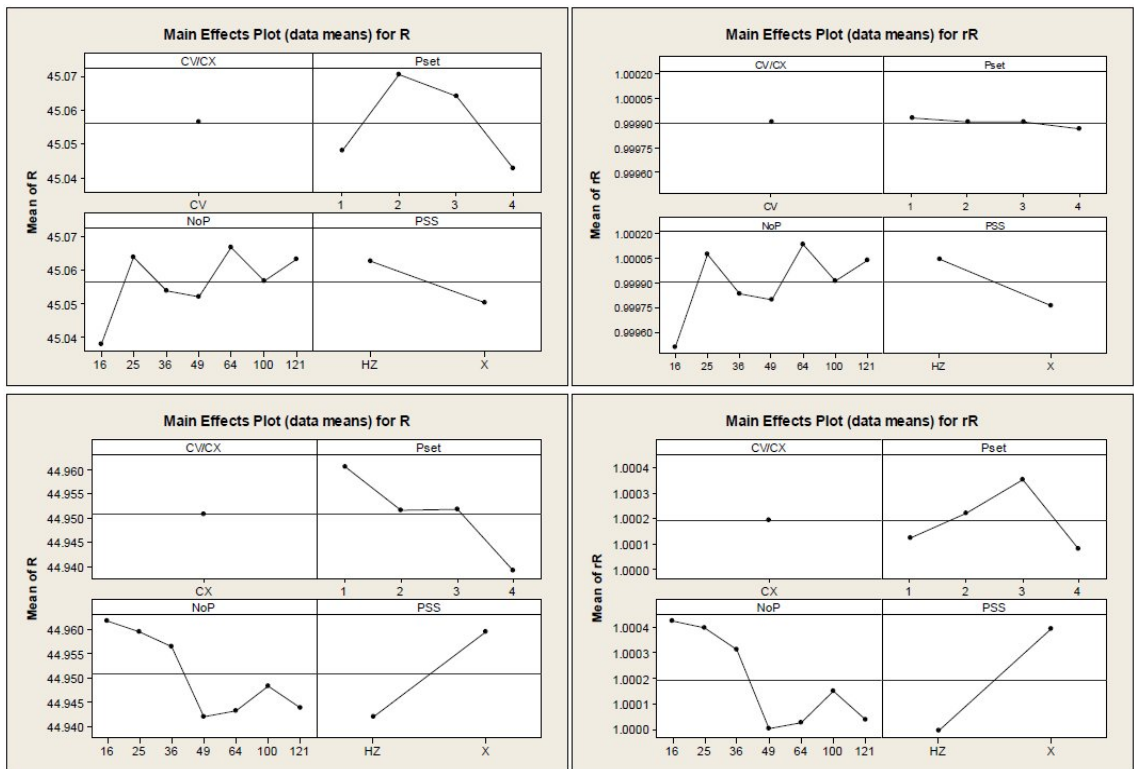
Az adatok mélyebb elemzése céljából főhatás-diagramokat készítettem. A főhatás-diagram a vizsgált paraméter átlagos értékét mutatja a kiválasztott bemeneti paraméter függvényében.

A 60. ábra a sugár érték elemzésének eredményei mutatja. Az rR a mért és a referenciaérték arányát jelenti. Az ideális érték egy, amikor a mért és a referenciaérték megegyezik.

A felület jellege van a legnagyobb hatással a sugárra, míg a mérési paraméter beállításoknak, a pontok számának és a pontmintavételi módszernek csak kis hatása van. Mindazonáltal a domború és a homorú felületek esetében a sugár értékei nagyon eltérőek, az átlagértékek kiegyenlítik egymást. Ezért a szeparált adatbázist is elemeztem (61. ábra). Ezekben az esetekben jól felismerhető a pontok számának hatása. A sugár értéke megközelíti a referenciaértéket. A pontmintavételi módszer hatása egyértelműbb: a Halton-Zaremba módszer pontosabb eredményeket biztosít.

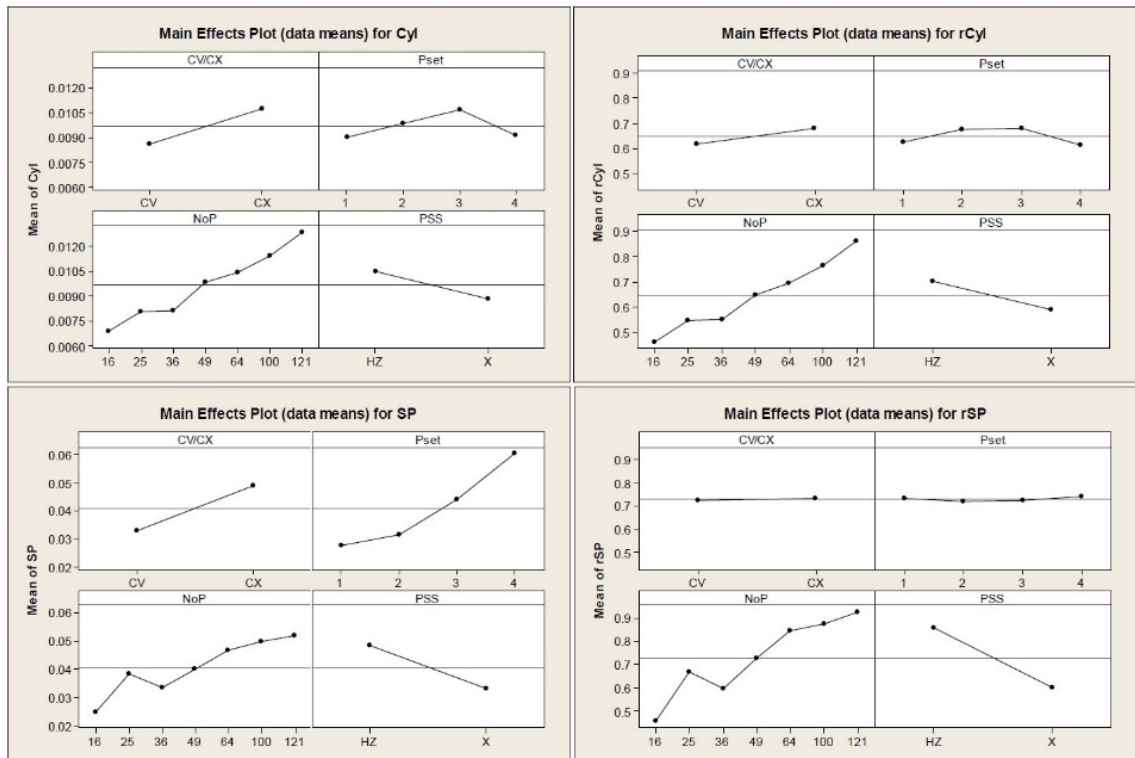


60. ábra: A sugár főhatás ábrái



61. ábra: A sugár főhatás ábrái szeparált adatok alapján

A hengeresség és a felületi profilhiba főhatás-diagramjai (62. ábra) azt mutatják, hogy a felületek jellege hatással van a geometriai hibára. A domború felületek kisebb hibával rendelkeznek, de relatív értékek esetében a hatás kicsi. A mért pontok számának növelése javítja az eredményeket. A hengeresség és a felület profilhibája közel van a referenciaértékhez. A marási paraméterek azonban módosítják a geometriai hibákat, a relatív értékekre nincs hatásuk. A Halton-Zaremba pontmintavételi módszer ebben az esetben is pontosabb eredményeket biztosít.



62. ábra: A geometriai hibák főhatás diagramjai

5.3 Következtetések

A geometriai hibák egyre nagyobb figyelmet kapnak a gép- és szerszámtervezésben és -gyártásban. A tűrésvizsgálat során nemcsak a funkcionális és gyártási szempontokat kell figyelembe venni, hanem a mérési folyamatot is. A mérési folyamat paraméterei hatással vannak az eredményekre, ezért a szabványos mérési folyamat biztosítja a megismételhetőséget és az összehasonlíthatóságot.

A mérési pontok számának és a pontmintavételi módszernek a hatását vizsgáltam szabad formájú felületmarás esetén. Két módszert hasonlítottam össze, az egyenletes mátrixos módszer és a Halton-Zaremba kvázi-véletlenszerű módszer.

A vizsgálat alapján megállapítható:

(1) A mérethiba (a sugár értéke) esetében a pontok száma és a pontmintavételi módszer csak kis mértékben befolyásolja a mért értékeket.

(2) A hengeresség és a felületi profil hibája esetén a felület jellege (domború vagy homorú) és a marási paraméterek nincsenek hatással a hibák relatív értékeire. A pontok növekvő száma korrigálja az értékeket, a Halton-Zaremba-módszer csak kis mértékben biztosít pontosabb eredményeket.

(3) A mért adatok alapján 49 pont alatt az eredmények sokat változhatnak. Ezért a 49 pont lehet a mért pontok számának alsó határa a vizsgálati geometria esetében.

A továbbiakban az itt meghatározott pontszám alapján (49 pont egy 7×7 -es mátrix szerint) állapítottam meg a felület méret és alakpontosságát.

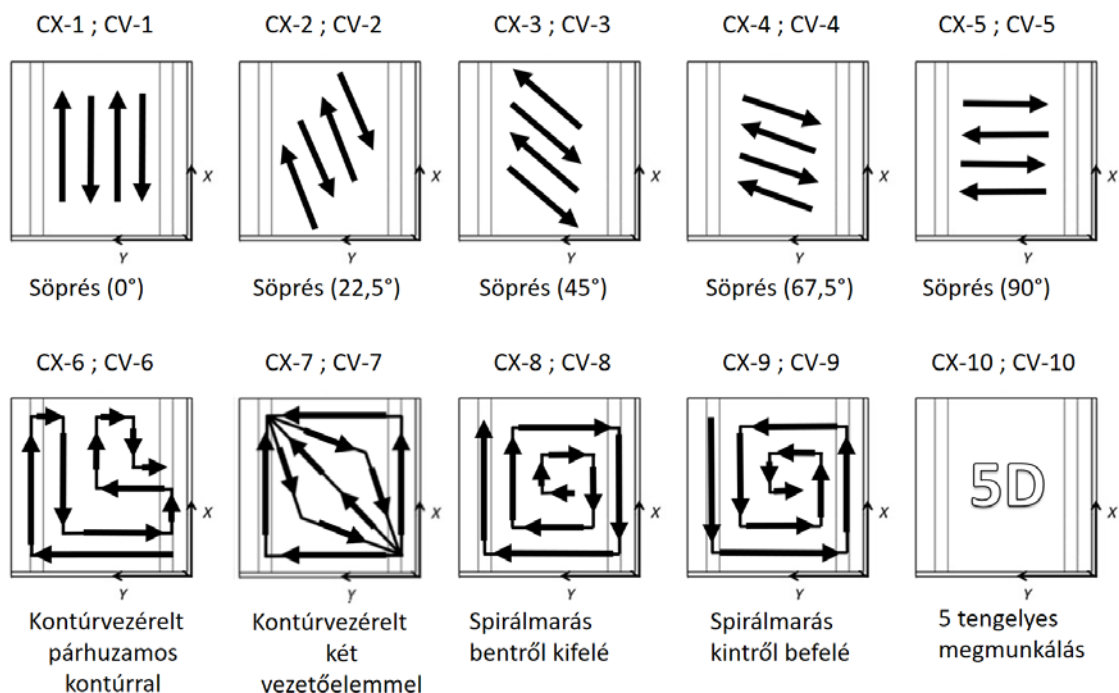
6 A SZERSZÁMPÁLYÁK HATÁSÁNAK VIZSGÁLATA A FELÜLETPONTOSSÁGRA

A kutatás során a CAM rendszerben beállítható, simító megmunkáláshoz alkalmazható szerszám pályák hatását vizsgáltam a geometriai pontosságra, méretpontosságra és felületi érdességre.

6.1 Különböző simító szerszám pályák, marási stratégiák vizsgálata

A munkadarabok geometriája és anyaga, a szerszám, a gyártás és a mérés körülményei megegyeznek a 3. fejezetben ismertetettekkel.

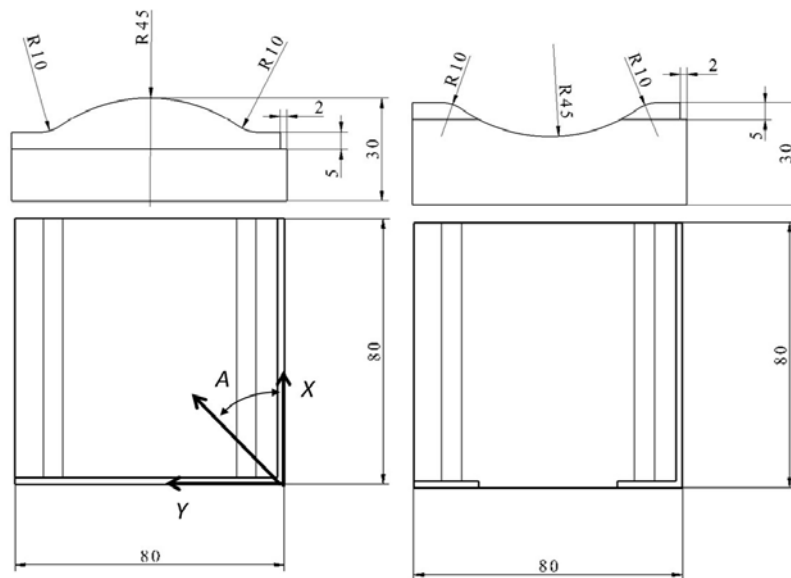
A vizsgálat során elkészített tesztadarabok esetén a marási paraméterek azonosak voltak: a névleges forgácsolósebesség $v_c=160$ m/min, a fogankénti előtolás $f_z=0,08$ mm, az előtolási sebesség $v_f=1650$ mm/min, a fogásmélység $a_p=0,3$ mm és az oldallépés (fogásszélesség) $a_e=0,15$ mm.



63. ábra: Különböző szerszám pályák

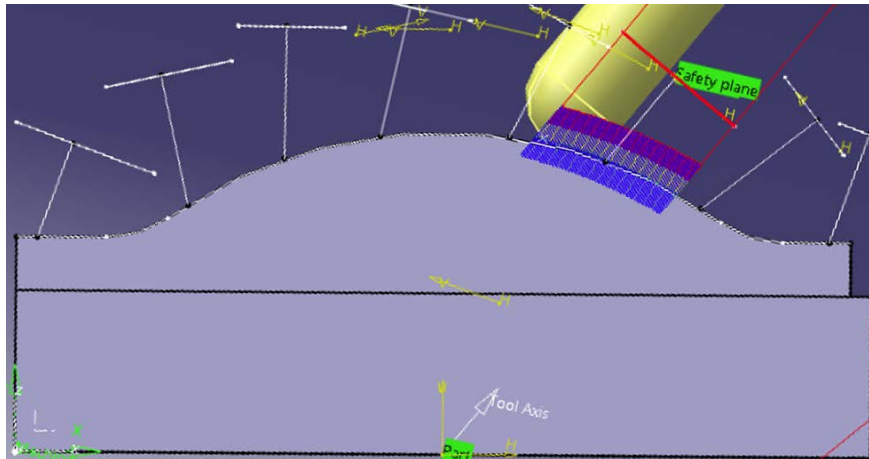
A különböző megmunkálási szerszám pályák az előző ábrán láthatók (63. ábra). Az első öt (CX-1-5; CV-1-5) tesztfelület marása söpréses zig-zag megmunkálással történt. Ennél a stratégiánál a nagyobb termelékenység érdekében az egyenirányú és ellenirányú marás felváltva van alkalmazva. A változó paraméter a vizsgálatok során ebben az öt esetben az

előtolási irány volt. Ennek irányát az x tengelyhez mérve határoztam meg (64. ábra). Öt különböző előtolási irány: 0° , $22,5^\circ$, 45° , $67,5^\circ$ és 90° .



64. ábra: Konvex (CX) és konkáv (CV) tesztadarab geometriája és a marás irányának meghatározása

A 6. és 7. szerszám pálya (CX-6-7; CV-6-7) kontúrvezérelt volt. Az egyik párhuzamos kontúrok segítségével, míg a másik két vezetőelem segítségével készült. A következő két szerszám pálya (CX-8-9; CV-8-9) spirálmárásos volt. Az első esetben a spirál bentről kifelé indult, míg a második kintről befelé. Az utolsó szerszám pálya (CX-10; CV-10) pedig öt-tengelyes megmunkálás segítségével készült. Az adott felületre nyolc különböző sík lett definiálva, így biztosítva, hogy a szerszám csúcsa ne vegyen részt a megmunkálásban. Ezzel közel állandó megmunkálási körülményeket biztosítottam a megmunkálásnak. Erre látható példa a domború mintadarabon bemutatva a következő ábrán (65. ábra):

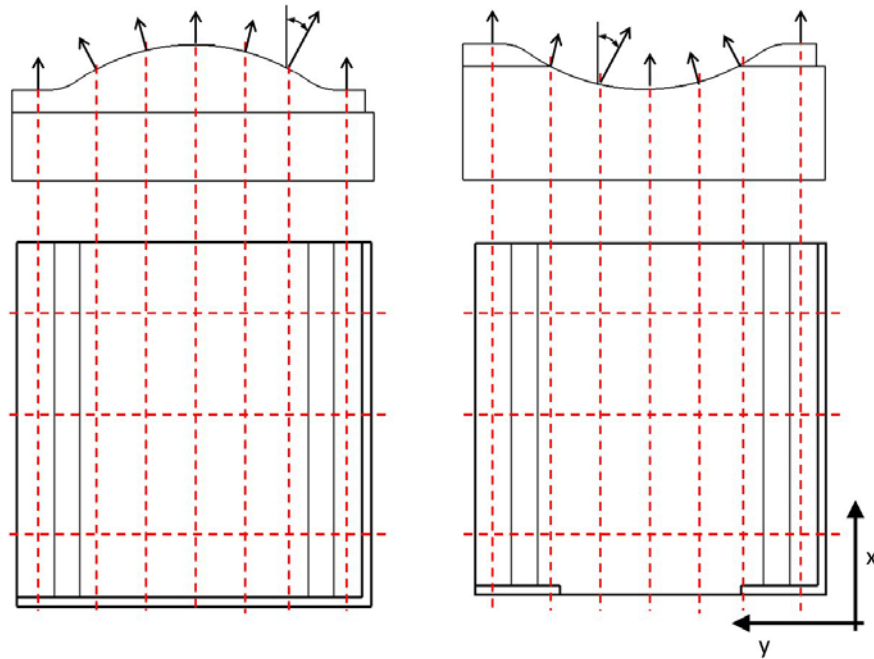


65. ábra: Öttengelyes megmunkálás szerszám pályái

Szabad formájú felületek esetén a felületi érdesség heterogén. Az érdesség mérési irányát a legkedvezőtlenebb érdességet adó irányba kell megválasztani, azonban figyelembe kell venni, hogy rendelkezésre áll-e a szabványban meghatározott mérési hossz, az adott felület szakasz vízszintes-e vagy beállítható vízszintes helyzetbe, illetve hozzáfér-e az érdesség mérő tapintó fej.

A kísérlet során az R_a és R_z paramétereket mértem, azonban csak az R_z paraméterek elemzése kerül bemutatásra a tapasztal tendenciák hasonlósága miatt. Az első öt munkadarab esetén a méréseket három különböző irányban végeztem (AM: a felületi érdesség mérésének szöge). Az első az x tengellyel párhuzamos volt ($AM = 0^\circ$), a második erre merőleges ($AM = 90^\circ$), a harmadik pedig az előtolási irányra merőleges. Néhány esetben a harmadik eset megegyezett az elsővel vagy a másodikkal. A mérési eredmények alapján készített diagramok a mellékletben láthatók.

A 6. és 10. munkadarabnál a szerszám pályák bonyolultsága alapján a megmunkálási irányra merőleges mérési irány nem biztosítható, így a felületi érdességek jobb összehasonlítása érdekében a mérést csak x irányban történtek a mérések. Hét különböző pozícióban végeztem el a méréseket, melyek a következő ábrán láthatók (66. ábra).



66. ábra: A felületi érdesség mérési pozíciói

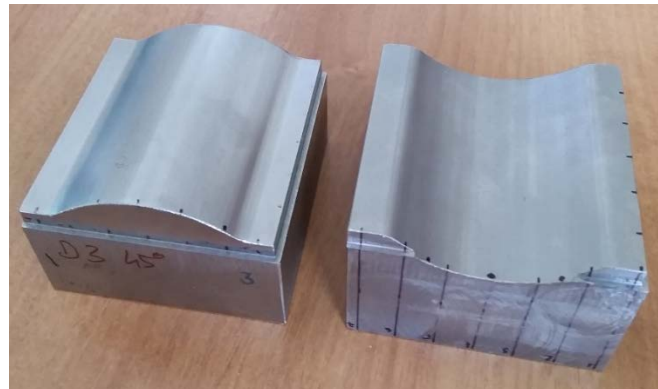
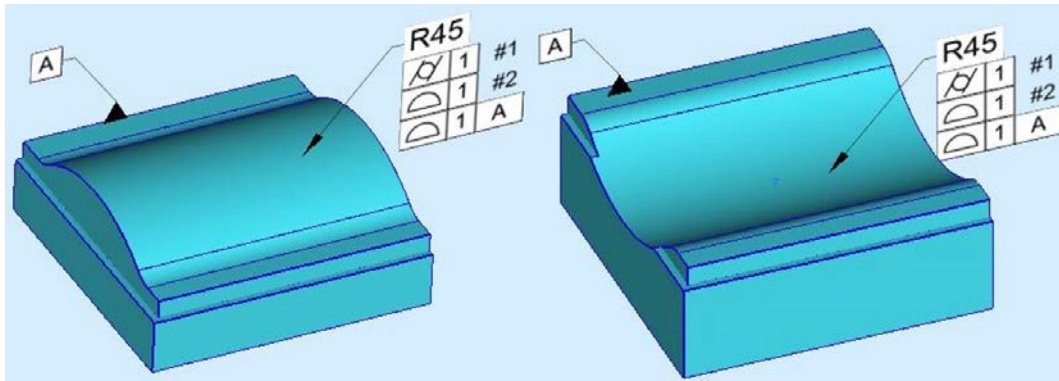
A következő táblázat a felületi normálvektor szögeit mutatja a mérési pozíciókban.

MÉRÉSI POZÍCIÓK(Y)	2	14	26	38	50	62	74
CX TESZTDARAB SZÖGEI	0°	32,2°	15,5°	0°	-15,5°	-32,2°	0°
CV TESZTDARAB SZÖGEI	0°	-32,2°	-15,5°	0°	15,5°	32,2°	0°
SZÖGEK ABSZOLÚT ÉRTÉKEI	0°	32,2°	15,5°	0°	15,5°	32,2°	0°

10. táblázat: Vizsgált felületpontok normálvektorai

A kutatás középpontjában a geometriai tűrések vizsgálata áll szabad formájú felület megmunkálás esetén. Összesen 49 pontot mértem a felületen 7×7 pontrácsban. Kétféle tűréstípust választottam ki a vizsgálatához, figyelembe véve a vizsgált felület tulajdonságait: a hengeresség (Cyl) és a felületi profilhiba (SP).

A geometriai tűrések definiálását a 67. ábra mutatja (Evolve SmartProfile). A felületi profilhibát referencia nélkül és sík referenciafelülettel határoztam meg. Az első esetben a toleranciazóna 3 szabadsági fokkal rendelkezik (DOF), a második esetben (A bázis) a toleranciazóna 0 szabadsági fokkal rendelkezik. A kevesebb szabadságfok szigorúbb tűrést jelent.

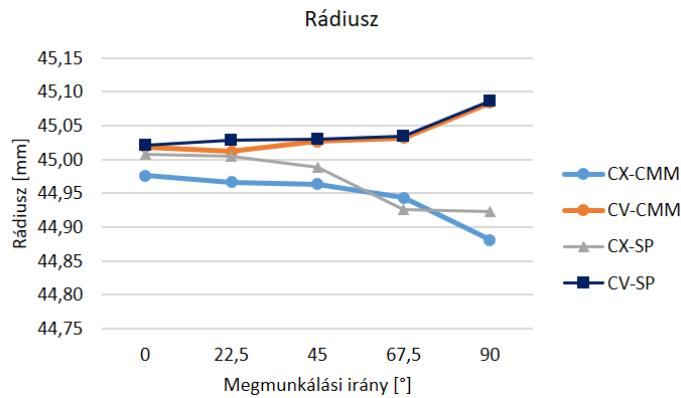


67. ábra: A geometriai tűréshatárok meghatározása a Smart Profile és a tesztalkatrészek (CX-3, CV-3) esetében.

6.2 Eredmények

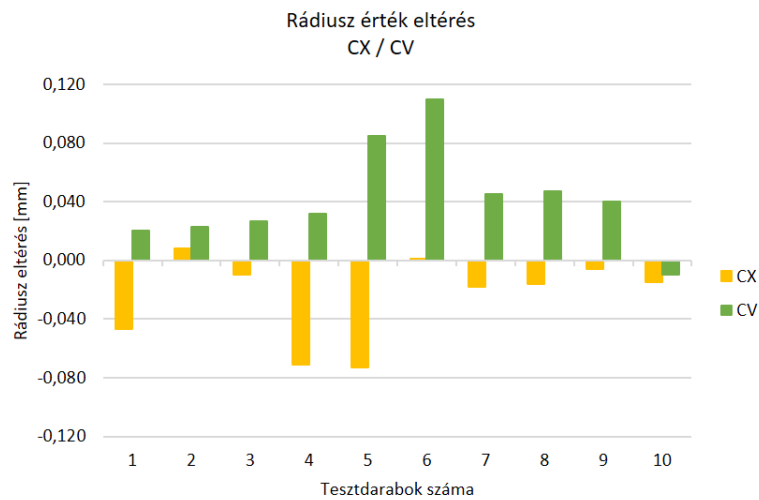
A marási stratégiák hatással vannak a méretpontosságra, melynek vizsgálata a munkadarab középső részén elhelyezkedő R45-ös sugárral rendelkező hengeres részen végeztem. A méretpontosság a makroszintű hibák része.

Az első öt munkadarabot külön is megvizsgáltam, mert ezek azonos szerszámpálya stratégiával lettek legyártva a marási irányt kivéve. A sugár értékét a koordináta mérőgép (CMM) és az Evolve SmartProfile szoftver által mért pontok alapján is meghatároztam (-CMM és -SP jelöléssel), mert mind a két szoftver más matematikai modell alapján számolja az értékeket. Az 68. ábra mutatja a mért eredményeket. A különböző módszerekkel számított értékek csak kis mértékben különböznek egymástól. A marási pálya irányának változása hatással van a felület sugarára. A változás iránya azonban ellentétes a két munkadarab geometria esetén. A domború rész esetében a sugár csökken, míg a homorú felület esetében a sugár nő.



68. ábra: A mart felület sugár értékei

A méretpontosság az összes munkadarab tekintetében a következő ábrán láthatók:



(a)

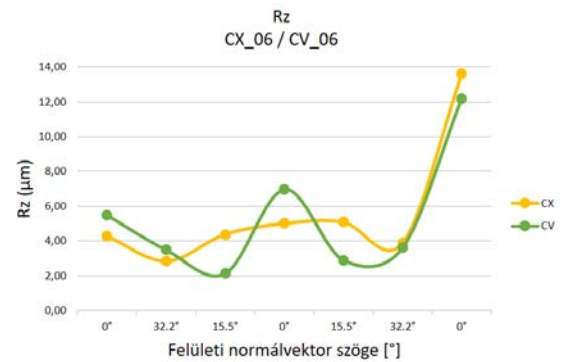
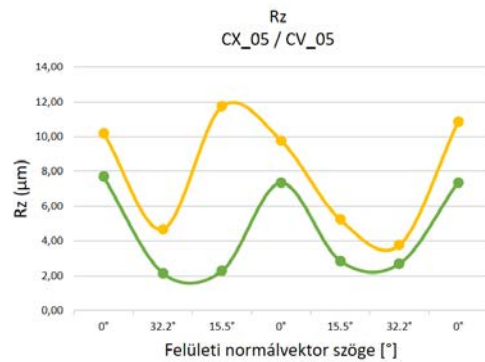
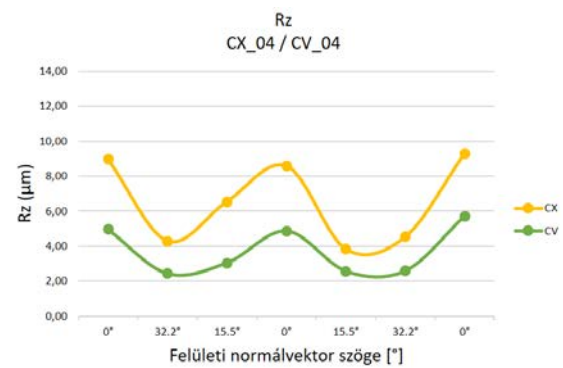
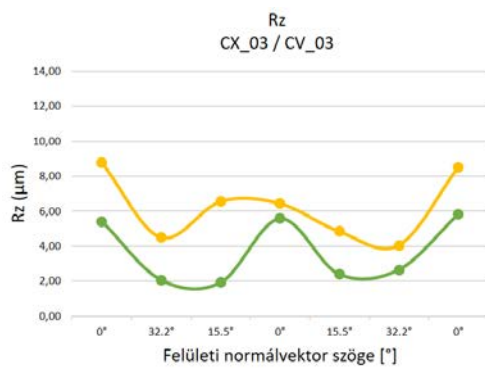
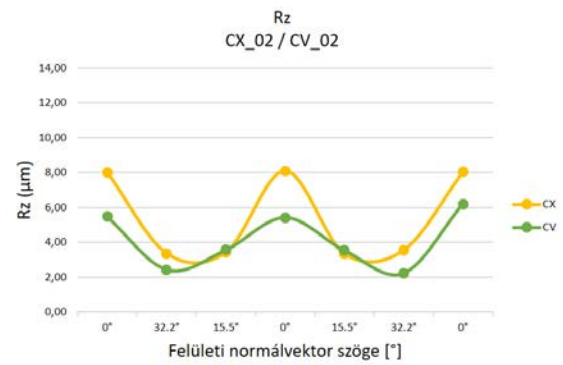
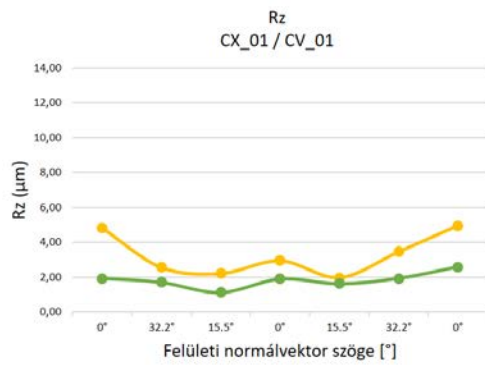
(b)

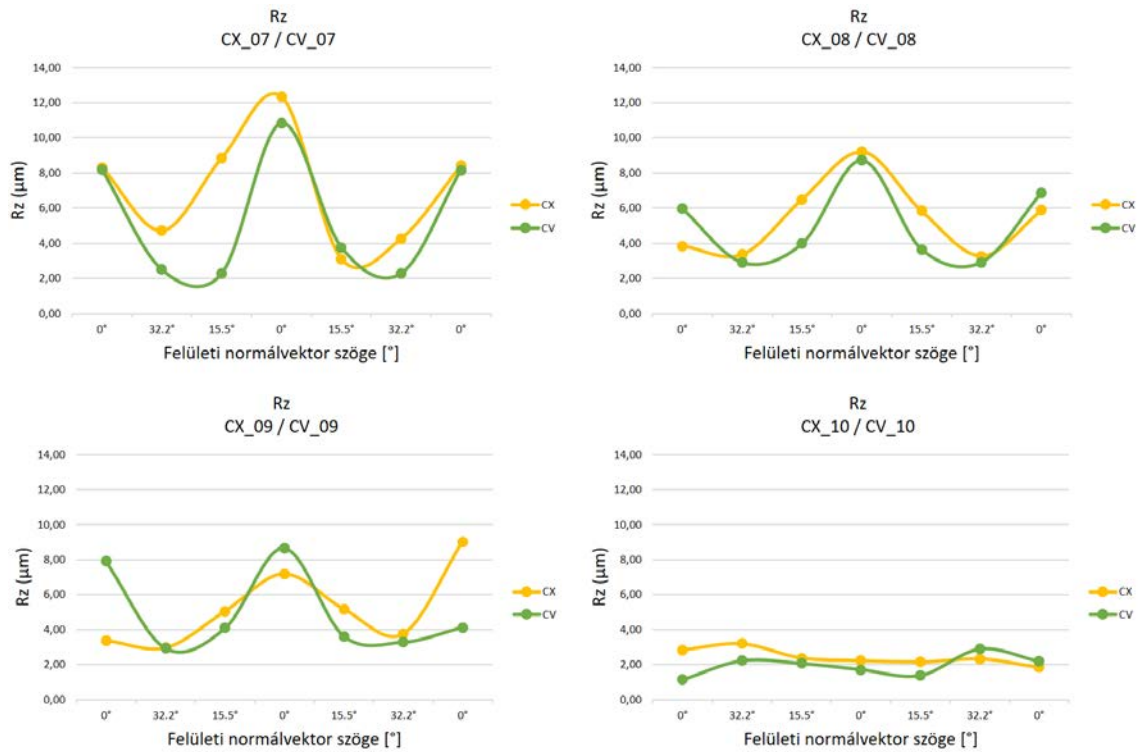
69. ábra: Rádíuszértékek az összes adatra vonatkozóan

A kapott eredmények alapján elmondható, hogy a domború próbatestek a névleges sugárérték alatt, míg a domború próbatestek a névleges sugárérték felett vannak. Az öttengelyes megmunkálás nem illeszkedik a sorba, a két hiba értéke közel azonos, ami a közel állandó forgácsolási körülményeknek tulajdonítható.

A felületek mikropontosságával kapcsolatban a felületi érdességet vizsgáltam. Az elvégzett marási vizsgálatok alapján megállapítható, hogy a felületi normálvektor (a felület dőlése) hatással van a felületi érdességre. A felületi érdesség rosszabb a vízszintes vagy közel vízszintes felületeken. Ezek a felületek a teszt darabok mindkét végén és közepén helyezkednek el. Ezek a helyeken a normálvektor értéke 0° . Minden egyes diagramon egy „W” alak rajzolódik ki (70. ábra). Egyes esetekben a különbségek

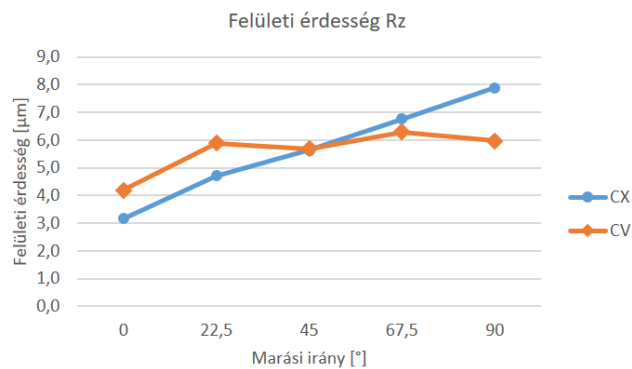
kisebbség, de a karakter felismerhető. A megmunkálási stratégiák nincsenek hatással erre a jellemzőre. Az öttengelyes stratégia ebben az esetben is kilóg a sorból.





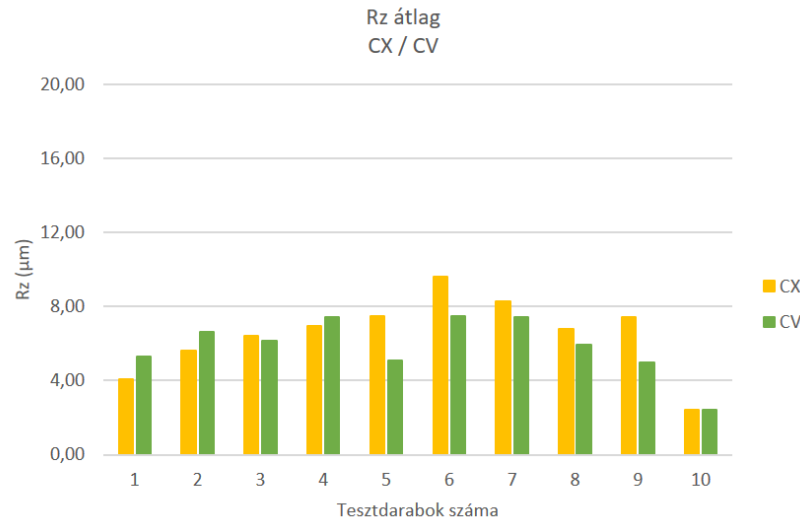
70. ábra: Tesztdarabok R_z értékei különböző normálvektor értékeknél

Az első öt tesztdarab esetén meghatároztam az R_z felületi érdességi jellemző átlag értékét valamennyi mért érték alapján. A 71. ábra ezeket az értékeket mutatja a marási irány függvényében. Az x marási iránytól ($AM = 0^\circ$) az y irányig ($AM = 90^\circ$) a felületi érdesség növekszik, de domború alak esetén ez a tendencia gyorsabb.



71. ábra: Az R_z átlagértékei a marási irány függvényében

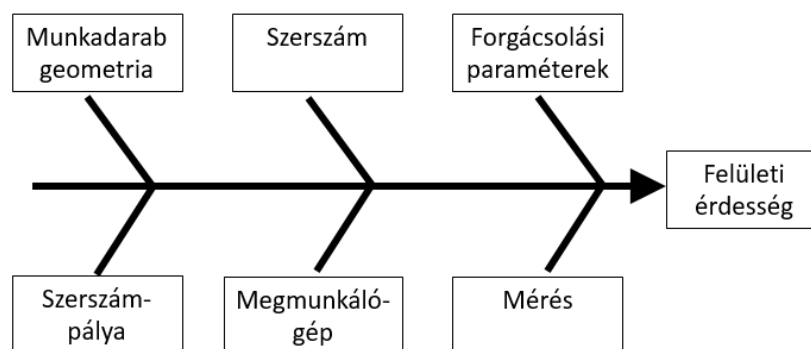
Mind a 10 marási stratégia esetén a 72. ábra mutatja az eredményeket.



72. ábra: R_z felületi érdességi jellemző átlaga

A kísérletek alapján megállapítható, hogy a mért érdességi értéket számos tényező befolyásolja, mint a munkadarab geometria, a szerszám, a forgácsolási paraméterek, a szerszám-pálya jellege, a megmunkálógép tulajdonságai és nem utolsó sorban az érdesség mérési módszere (73. ábra).

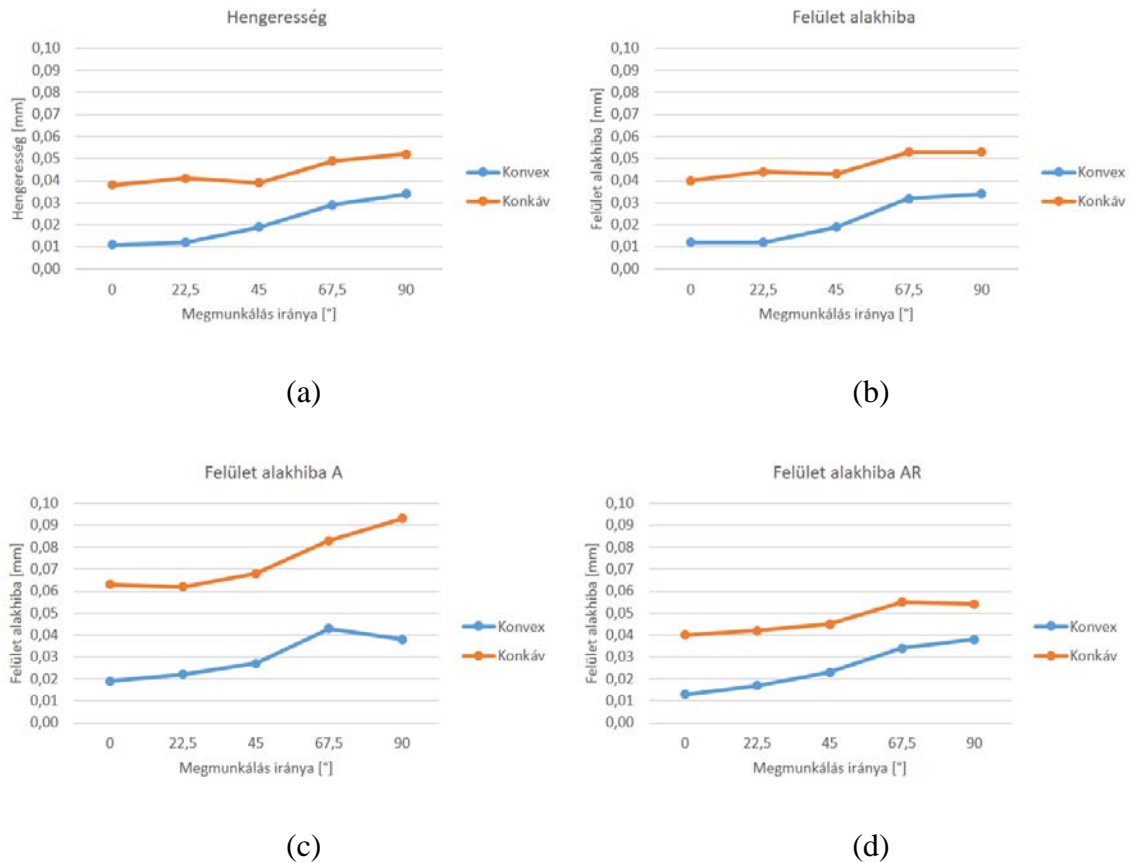
A mérési tapasztalatok alapján adódik a kérdés, hogy a szabad formájú felületek esetében hogyan jellemezhető a felületi érdesség egyetlen mérőszámmal, hiszen a mérés problémába ütközik. Megoldást jelenthet a felületi topográfia, de itt is adódik a kérdés, hogy a felület mely részét vizsgáljuk, hogyan hozható létre egyetlen, a felületi érdességet jellemző érték. Jelen disszertáció nem foglalkozik külön ennek a problémának a megoldásával.



73. ábra: A felületi érdességet befolyásoló tényezők

A makroszintű hibák második típusa a geometriai hibák csoportja. A hengeresség és a felületi alakhiba az első öt tesztdarab (CX-1-5; CV-1-5) esetében külön is meg lett

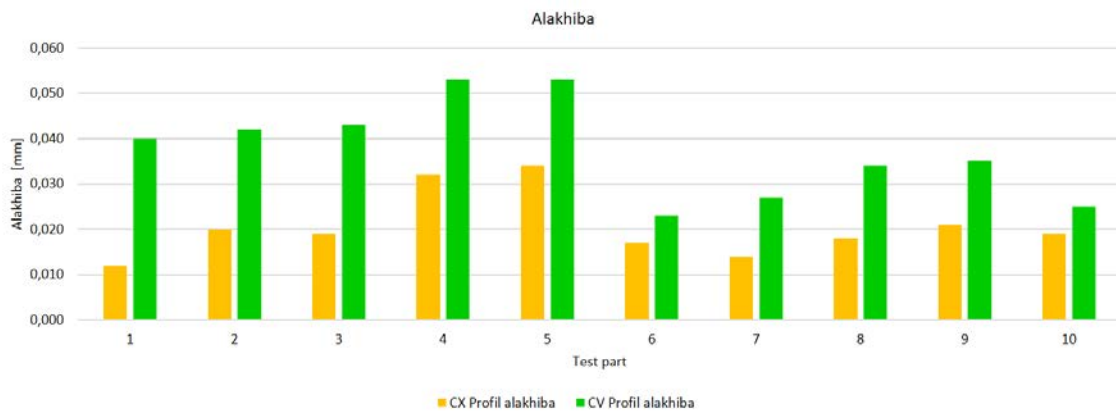
vizsgálva, melynek értékeit a 74. ábra mutatja. Általánosságban elmondható, hogy az értékek az előtolási irány változásával nőnek, a legkisebb értékek az x tengellyel párhuzamos marás esetén ($AM = 0^\circ$), a legnagyobb értékek pedig az y tengellyel párhuzamos marás esetén ($AM = 90^\circ$) figyelhetők meg. A domború felületek jobb pontossággal rendelkeznek, mint a homorúak.



74. ábra: A geometriai hibák értékei (CX-1-5; CV-1-5)

A hengeresség és a felületi profilhiba értékei referenciafelület nélkül nagyon hasonlóak, az értelmezés hasonlósága miatt. Ha bázis síkot definiálok 74. ábra (c), akkor a szabadsági fokok száma csökken és az értékek nagyobbak lesznek. Így nem csak az alaki eltérést, hanem a helyzeti hibát is figyelembe vesszük. ("A" a bázis sík használatát jelenti az értékelés során, lásd: 67. ábra). A 74. ábra (d) a hibazóna szélességét mutatja a bázis sík használata esetén (az "AR" azt jelenti, hogy az R45 hengeres részt vizsgálom). A 74. ábra (c) diagramjától való nagy eltérés a pozícióhibát jelzi, amely a konvex felületek esetében kisebb.

A felületi profilhiba értékeit az összes vizsgált szerszámpálya stratégia esetén a következő ábra mutatja:

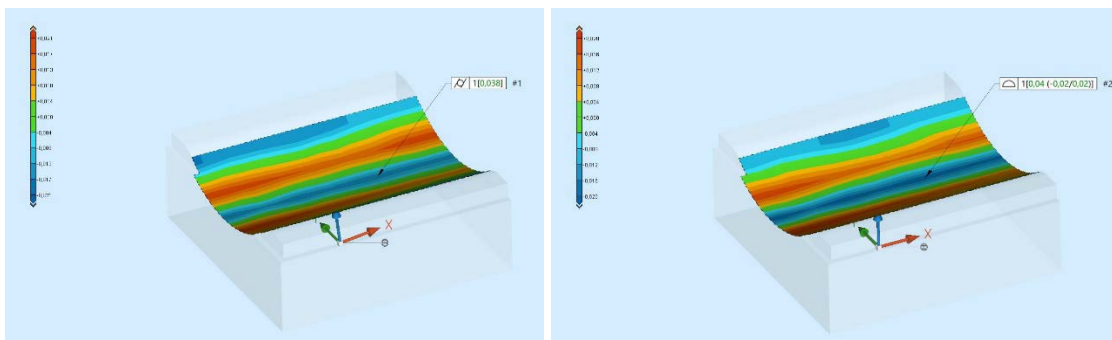


75. ábra: Felületi profilhiba értékek (CV1-10 - CX1-10)

A második öt szerszám-pálya stratégia (CX-6-10; CV-6-10) kisebb geometriai hibát eredményez.

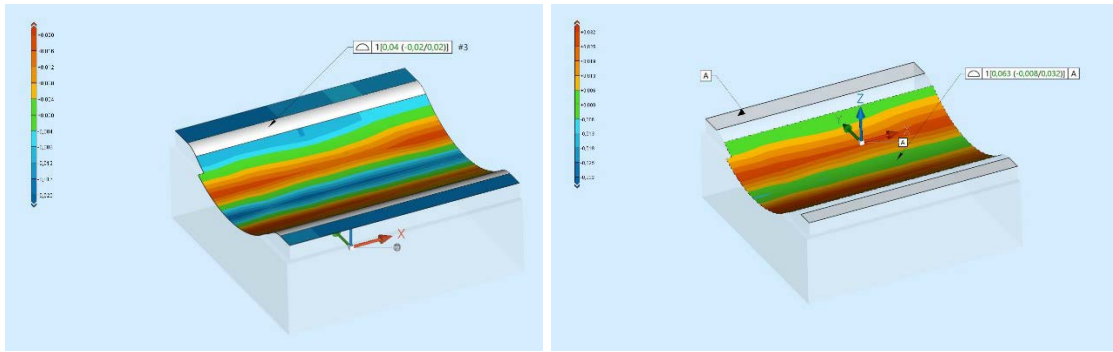
Az összes stratégia alapján elmondható, hogy a konvex felületek minden esetben jobb pontossággal rendelkeznek, mint a konkáv felületek.

A különböző geometriai hibák értékeit hibaterkép segítségével is megvizsgáltam. A hengeresség és a felületi profilhiba bázis nélkül illetve bázis használatával a következő ábrán láthatók. A különböző beállítások közül az x tengellyel (0°) párhuzamos marási irányú homorú teszt-darab képei láthatók, hasonlóan az előző diagramokhoz. A felület eltérései az y tengely mentén változnak, a vízszinteshez közeli felületek negatív, a köztes részek pozitív eltérést mutatnak.



a)

b)



c)

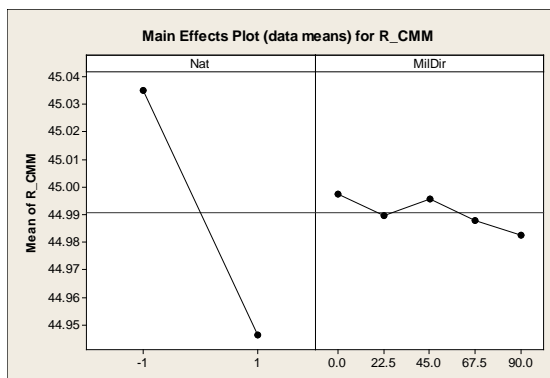
d)

76. ábra: Hibatérképes felületi eltérés értékek

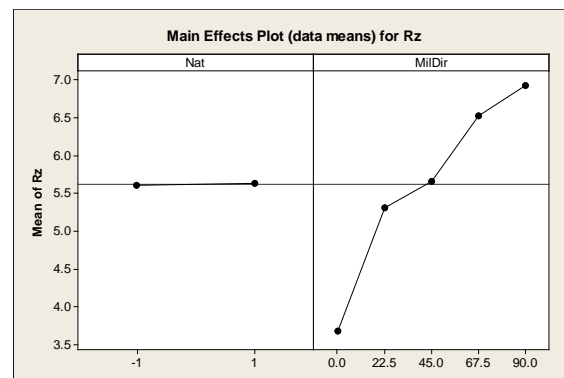
A vizsgált beállításokra (CV1-10; CX1-10) az alakpontosság szintérképes felületi eltéréseinek ábrái megtalálhatók a mellékletben.

A leggyakrabban használt söpréses szerszámpálya stratégia adatainak ANOVA-elemzését a 77. ábra mutatja. A főhatás ábrák a mért paraméter átlagos értékét mutatják a kiválasztott paraméter függvényében, és jelezhetik annak fontosságát. Ezek alapján a felület jellege (Nat: +1/-1 = domború (CX) / konkáv (CV) felület) fontos hatással van a sugárra (R_CMM), a hengerességre (Cyl) és a felületi profilhibára (SPE), de nincs hatással a felületi érdességre (R_z).

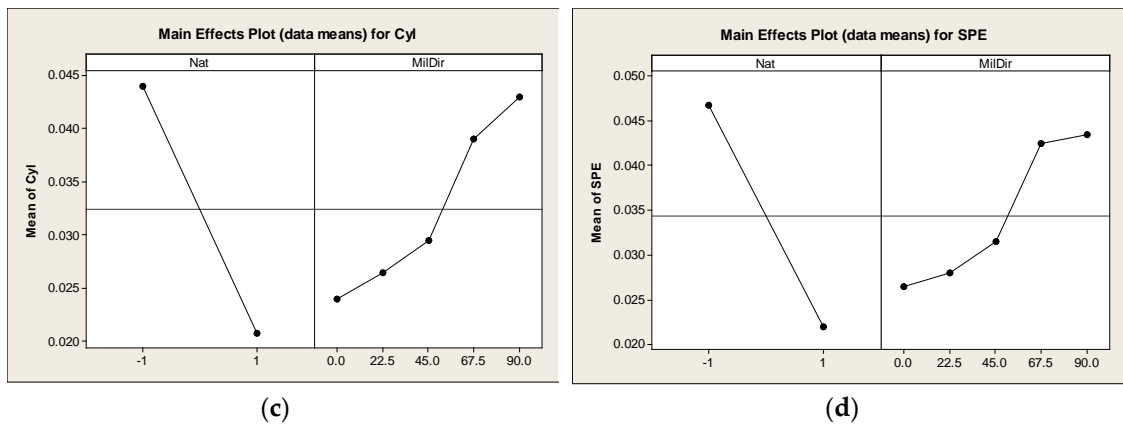
A marási útvonal iránya (MilDir = A) mind a négy paraméterre hatással van. A (CMM-mel mért) sugár esetében az értékek csökkennek a marási irány változásával, de összehasonlítva ez az átlagérték forrásából származik (68. ábra). A domború felület sugarának csökkenése nagyobb, mint a homorú felület sugarának növekedése. A marási útvonalnak nagyobb hatása van a felületi érdességre (R_z), a hengerességre (Cyl) és a felületi profilhibára (SPE).



(a)



(b)

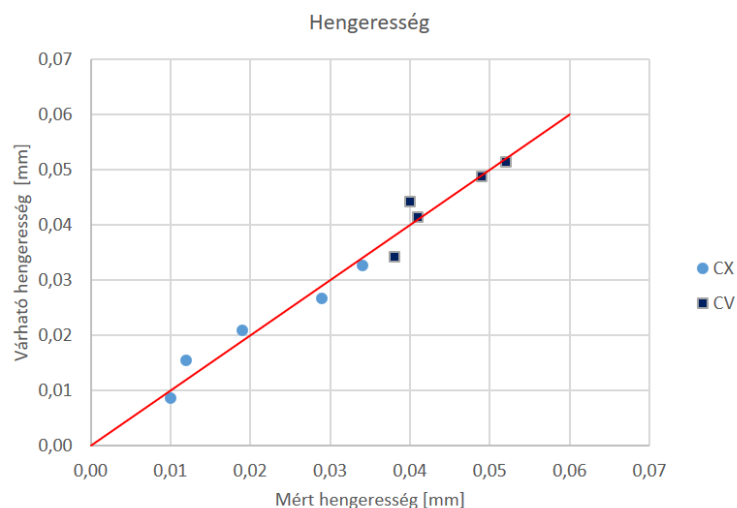


77. ábra: A mért paraméterek főhatásábrái

Ezen adatok alapján regressziós elemzéseket végeztem. A felület jellegét (Nat), a marási irányt (MilDir) és a felületi érdességet (Rz) vettem figyelembe a lineáris regresszió létrehozásához. A hengeresség (Cyl) esetében az R^2_{adj} értéke 95,6%, tehát az következő egyenlet jó pontossággal képes leírni a hengerességet, amit a 78. ábra mutat. A mért és a becsült értékek közel állnak az ideális állapothoz (folytonos piros vonal).

$$Cyl = 0,0128 - 0,0116Nat + 0,000145MilDir + 0,00232R_z$$

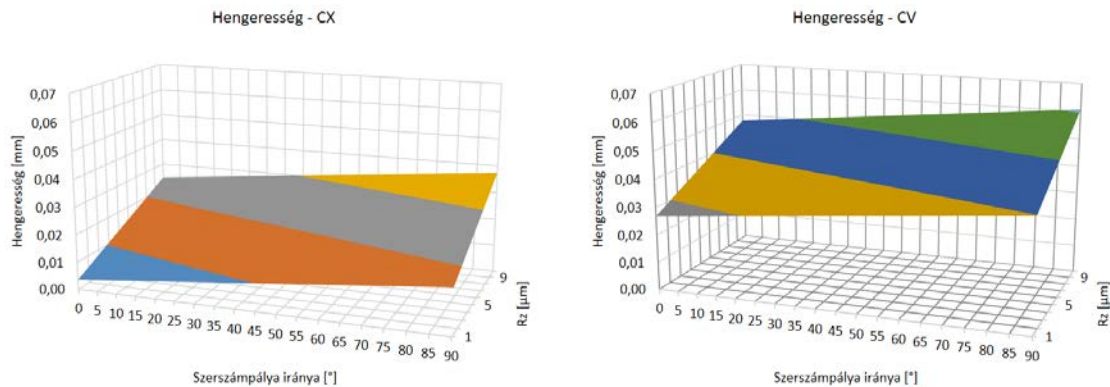
Előrejelző	Coef	SE Coef	T	P
Constant	0.01283000	0.00646500	1.98	0.094
Nat	-0.01163250	0.00097420	-11.94	0.000
MilDir	0.00014485	0.00006073	2.39	0.054
Rz	0.00232300	0.00153100	1.52	0.180
S = 0.00307985		R-Sq = 97.1%		R-Sq = 95.6%



78. ábra: A hengeresség mért és becsült értékei

Látható, hogy a domború felületek kisebb hengerességhibával rendelkeznek, mint a homorú felületek (79. ábra). A geometriai hiba és a felületi érdesség szoros kapcsolatban

áll egymással. A marási pálya iránya fontos hatással van a geometriai hibára, de figyelembe kell venni a megmunkálási folyamat paramétereinek, mint a szerszám átmérője, vágásszélesség, előtolási sebesség és vágási sebesség hatását is. Ezért a szabad formájú felületek marása során előállítható felületi érdességnek pontos számítása vagy becslése fontos kutatási téma.



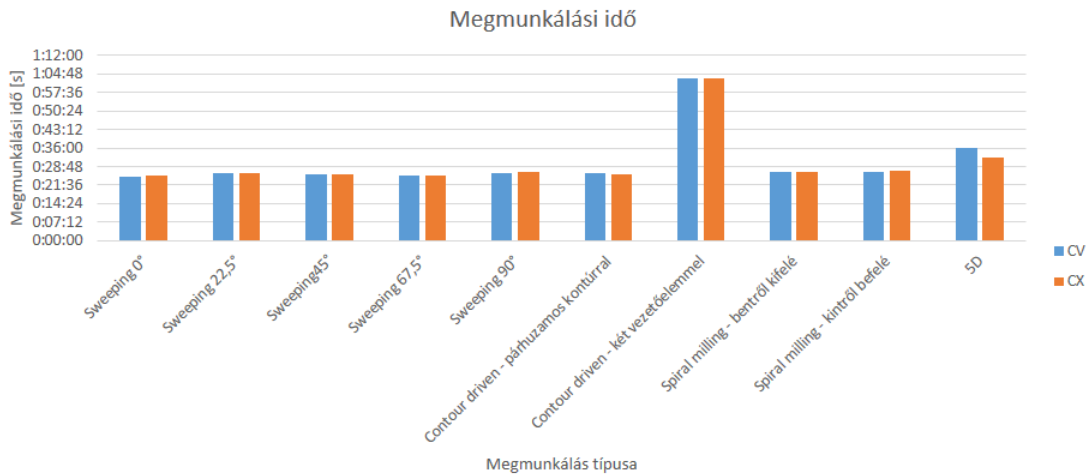
79. ábra: A regressziós egyenlet alapján becsült hengeresség

A háromféle felületi profilhiba hasonló egyenletekkel, jó pontossággal becsülhető. Lásd a következő táblázatban:

Egyenlet	R ² adj
SPE = 0.0147 – 0.0124 Nat + 0.000132 MilDir + 0.00245 Rz	94.4%
SPE_A = 0.0551 – 0.0207 Nat + 0.000521 MilDir – 0.00490 Rz	96.9%
SPE_AR = 0.0146 – 0.0128 Nat + 0.000058 MilDir + 0.00357 Rz	86.5%

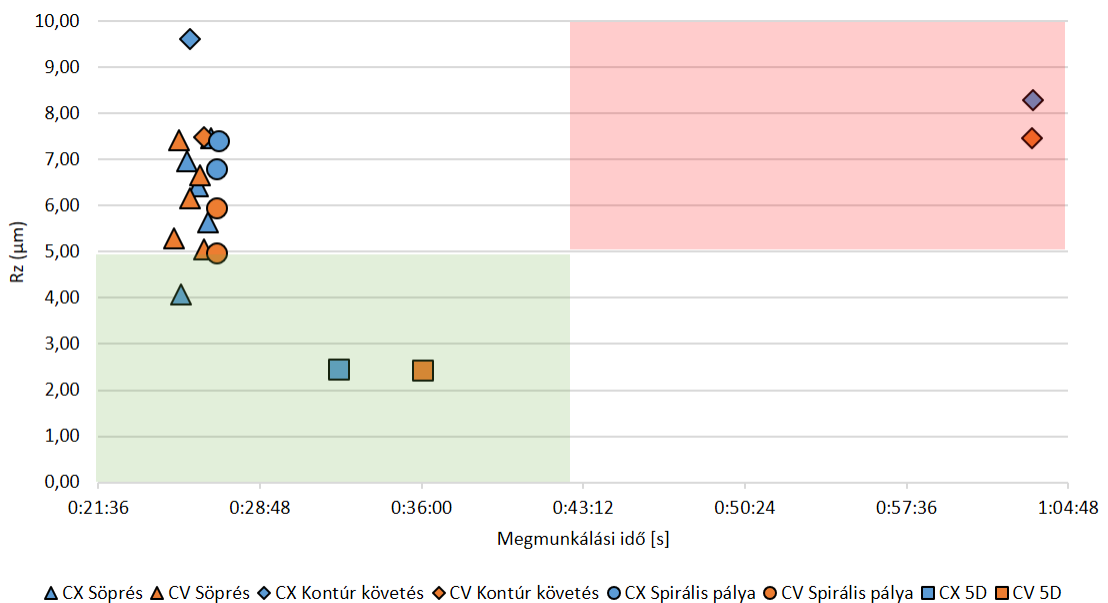
11. táblázat: A felületi profilhibák regressziós egyenletei

Az eltérő stratégiák megmunkálási idejét mutatja a következő, 80. ábra. Látható, hogy a tíz stratégiából kettő tér el. Az egyik az 5 tengelyes megmunkálás, ami csak kis mértékben tér el, viszont sokkal jobb felületi érdesség érhető el ezzel az eljárással. A legjobban a hetedik eljárás tér el a többitől. Ennek az eljárásnak a megmunkálási ideje több mint kétszerese az összes többinek. A felületi érdesség, az alakhiba és a méretpontosság szempontjából sem teljesít kiemelkedően. A szerszám pálya ugyan folyamatos ennél a stratégiánál, de minden útvonal egy pontból indul ki. Így ennek a stratégiának a további vizsgálata nem indokolt.



80. ábra: Különböző marási stratégiák megmunkálási ideje

A 81. ábra az érdeességet mutatja az idő függvényében. Három terület különíthető el ez alapján. A piros területen elhelyezkedő stratégiák (jobb felső tartomány) minden szempontból alul teljesítenek. Hosszú ideig tart a megmunkálás és rossz felületi érdeesség értékeket eredményeznek. Ezek további vizsgálata nem indokolt. A zöld terület stratégiái (bal alsó tartomány) a legjobbak, hiszen rövid idő alatt jó felületi érdeességi értékeket adnak. A felső fehér részen, ahol a stratégiák túlnyomó része elhelyezkedik a felületi érdeesség nem túl jó, de cserébe rövid idő alatt készen vannak. Ez alapján megállapítható, hogy a termelékenység és a felület minőség kevésbé kapcsolódik egymáshoz, tehát a különbséget a szerszám pályák jellege adja.



81. ábra: Megmunkálási idő - érdeesség diagram

6.3 Következtetések

A bemutatott kísérlet szakasz a CAM-rendszer által generált szerszámpályák vizsgálatára összpontosított. Sokféle pásztázási stratégia beállítható ezekben a rendszerekben, melyeknek megvan az előnyük és a hátrányuk is. Ezek hatását vizsgáltam a szabad formájú tesztadarabok esetén a felületi érdesség, az alak és méretpontosság és a megmunkálási idő tekintetében. A kísérlet során a domború és a homorú tesztalkatrészeket készítettem el különböző szerszámpálya stratégiákkal.

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a felületi érdesség, a mérethiba és az alakhiba a pontosság különböző szempontjait képviseli, de nem függetlenek egymástól.

A vizsgálat alapján megállapítható:

(1) Az iránypárhuzamos pásztázással készült tesztalkatrész esetében a szerszámpálya iránya az x és y tengelyek között növelte a felületi érdességet, de a felületek jellege (domború vagy homorú) nem befolyásolja. A 6-9. számú tesztalkatrész felületi érdessége hasonló az előző öthöz. Az 5 tengelyes megmunkálással készült tesztadarab kilóg a sorból pozitív irányban, de ez várható volt, köszönhetően a szerszám tengely bedöntésének. A forgácsolás során, így közel állandó forgácsolási körülmények érhetők el.

(2) A méretpontosságot a tesztadarab hengeres felületén vizsgáltam. A mérethiba söpréses stratégiáknál a marási pálya irányával változott, de a felületek jellege lényegesen befolyásolja azt. Két okot feltételezhetünk, ami ezt a problémát okozza: a szerszám sugarának pontatlansága és a szerszám változó terhelése. A szerszám pontatlansága a tapasztalt eltérésnél kisebb ($\pm 0,005$ mm), a szerszám változó terhelését viszont alátámasztja a forgácsvastagság CAD modellezése.

Az összes vizsgált stratégia esetén az eredmények azt mutatták, hogy a sugár homorú próbatestek esetében nagyobb, mint a névleges érték, a domború próbatestek esetében pedig esetében kisebb volt. Ez nem figyelhető meg az öttengelyes megmunkálás esetében, ahol mindkét próbadarabnak kisebb volt a sugara. Ez a megmunkálási körülmények homogenitásnak köszönhető.

(3) A regressziós elemzések megfelelő pontosságú lineáris közelítést adtak a geometriai hibákra, ahol a felület jellegét, a marási út irányát és a felületi érdességet is figyelembe kell venni. Az eredmények alapján a felületi érdesség fontos tényező, ezért a gömbvégű marásnál a felületi érdesség becslése elengedhetetlen.

A kutatás eredményei azt mutatják, hogy a megfelelő CAM-stratégia kiválasztása és a szerszám-pálya paramétereinek meghatározása során figyelembe kell venni a felület jellegét a pontos szabad formájú felületek előállításának érdekében.

(4) Az iránypárhuzamos pásztázással készült tesztalkatrészek vizsgálata alapján elmondható, hogy a domború felületek esetében a tesztfelület sugara csökkent, a homorú felületek esetében pedig nőtt a sugár. Az x tengellyel párhuzamos marás esetén a mért sugarak különbsége kicsi volt, de a marási irány változásával a különbség nőtt, ezért az y irányú marás esetén nagyobb forgácsolóerőt és nagyobb szerszám deformációját feltételezünk. Az x tengellyel párhuzamos marás esetén egy pályaszakasz mentén a megmunkálási átmérő, a szerszám terhelése és a szerszám deformációja állandó. Más irány esetén azonban ezek a szerszám minden pozíciójában változnak, ahogy azt [27] is bemutatta. Az y tengellyel párhuzamos marás esetén változnak a leggyorsabban ezek a paraméterek. A változó forgácskeresztmetszet és a változó dolgozó élhossz eltérő erőt és nyomatókat fejt ki a forgácsolószerszámra, a szerszám terhelése pedig eltérő szerszámdeformációt okoz. A dolgozó él eltérő hosszát a [75] írja le domború és homorú hengeres felületek esetén.

A vizsgálatok következő részében a forgácsolóerők mérésére van szükség a szerszámterhelés és az esetleges deformáció különbségeinek tisztázása érdekében.

Az összes vizsgált stratégia esetén a profilhiba nagyobb volt a homorú tesztalkatrészeknél, így megállapítható, hogy a profilhiba jellegére a geometria nagy hatással van, és a megmunkálás iránya is nagymértékben befolyásolja az értéküket. A domború és a homorú próbatestek esetében az eltérés akár kétszeres is lehet.

Az eredményeket összefoglalva megállapítható, hogy a felületi érdesség szempontjából a felületi normálvektor iránya a legbefolyásolóbb tényező.

7 A FORGÁCSOLÓERŐ ÉS A FELÜLETI PROFIL HIBÁJÁNAK VIZSGÁLATA

Gömbvégű maróval történő simító marás során a folyamatosan változó forgácsolási körülmények hatással vannak a forgács alakjára, térfogatára, valamint a szerszám terhelésére és a kialakuló felület minőségére is.

A vizsgálat célja a gömbvégű maróval végzett simító marás során fellépő forgácsoló erő, valamint a létrehozott felület alakpontosságának vizsgálata és összevetése.

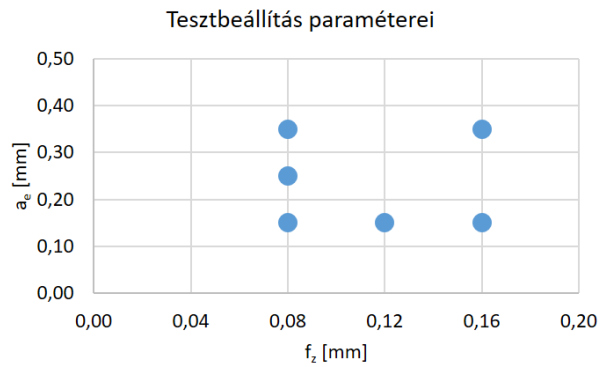
7.1 A forgácsolóerő vizsgálata

A vizsgálat során hat domború (CX) és hat homorú (CV) tesztdarab került legyártásra. A munkadarab geometriája és anyaga, a szerszám, a gyártás és a mérés körülményei megegyeznek a 3. fejezetben leírtakkal.

A maró fordulatszáma 5100 1/min, ami 160 m/min névleges forgácsolási sebességet jelent. A fogásmélység $a_p = 0,3$ mm, amit elősimítással biztosítottunk. Az előtolás és a fogásszélesség értékét 3-3 szinten változtattuk a 12. táblázat, illetve a 82. ábra szerint. A marás az y tengellyel párhuzamosan történt.

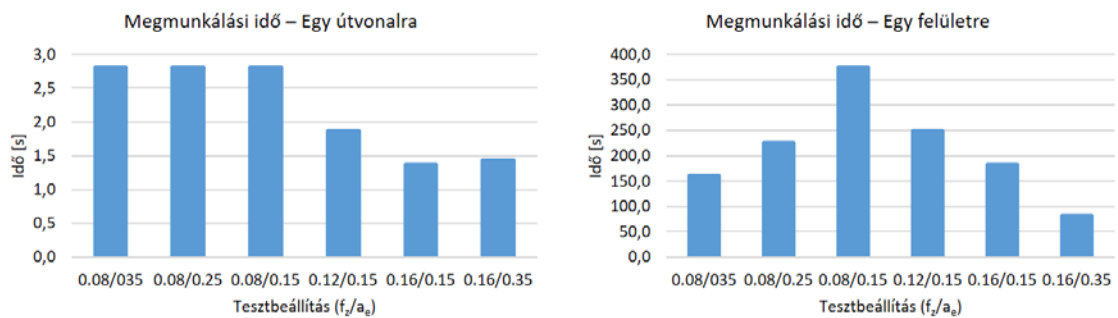
<i>Tesztdarab</i>	<i>f_z [mm]</i>	<i>a_e [mm]</i>
1	0.08	0.35
2	0.08	0.25
3	0.16	0.15
4	0.12	0.15
5	0.08	0.15
6	0.16	0.35

12. táblázat: Forgácsolási paraméterek



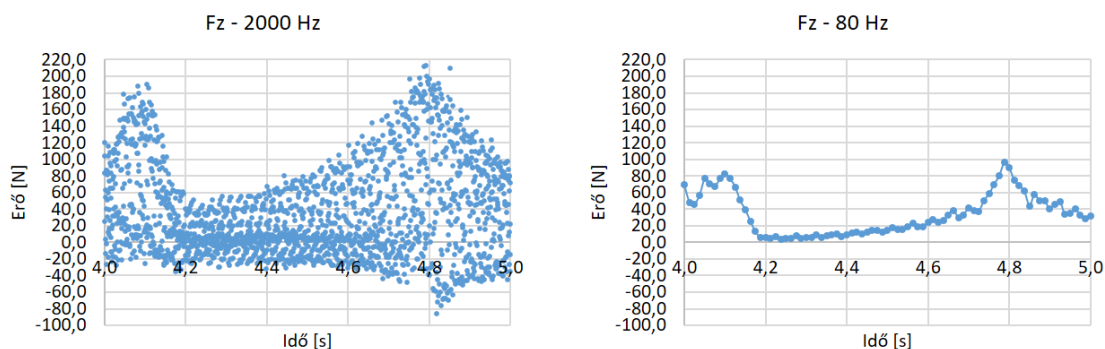
82. ábra: Fogankénti előtolás és oldallépés

1-1 szerszámút marási idejét és 1-1 felület megmunkálási idejét a 83. ábra mutatja. Egy szerszámút esetén a fogankénti előtolás határozza meg az időt, az egész felület esetén viszont már az oldallépés is szerepet kap. A diagramokon a beállítások sorrendje: 1-2-5-4-3-6.



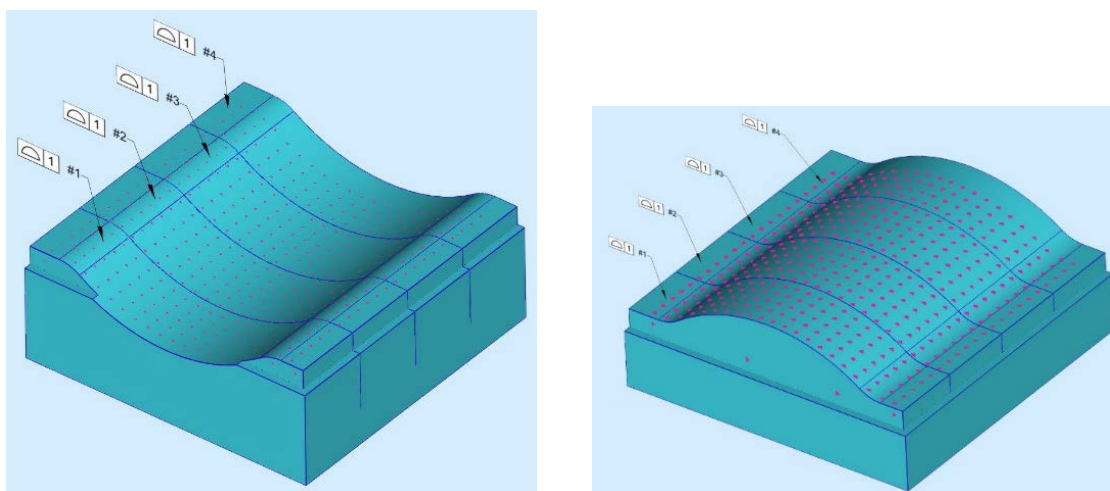
83. ábra: Megmunkálási idő

Az erőmérést 2000 Hz-es frekvenciával, egyenirányú (D) és ellenirányú marási szakaszban (U) végeztük. A mért értékeket korrigáltam a nulla szint eltolódásával, valamint 25 mérési adat átlagértékeivel végeztük a kiértékelést, így szűrve az adatokat. Ekkor 80 Hz-es mérési frekvencia adódik. Ennek hatását a 6. jelű domború teszt darab ($a_e = 0,35$ mm; $f_z = 0,16$ mm), tengely irányú (F_z) erőkomponens 1 másodperc hosszú adatsora esetén mutatja a 84. ábra (2000 és 80 pont). Az eredő erőt az erőkomponensek vektorösszegeként számoltam.



84. ábra: F_z erő komponens mért és szűrt értékei

Az egyes felületeken 105 pontot mértünk egy 5x21-es rácsháló mentén. A geometriai hiba értékelését a mért pontok alapján határoztuk meg az Evolve SmartProfile szoftver segítségével (85. ábra).

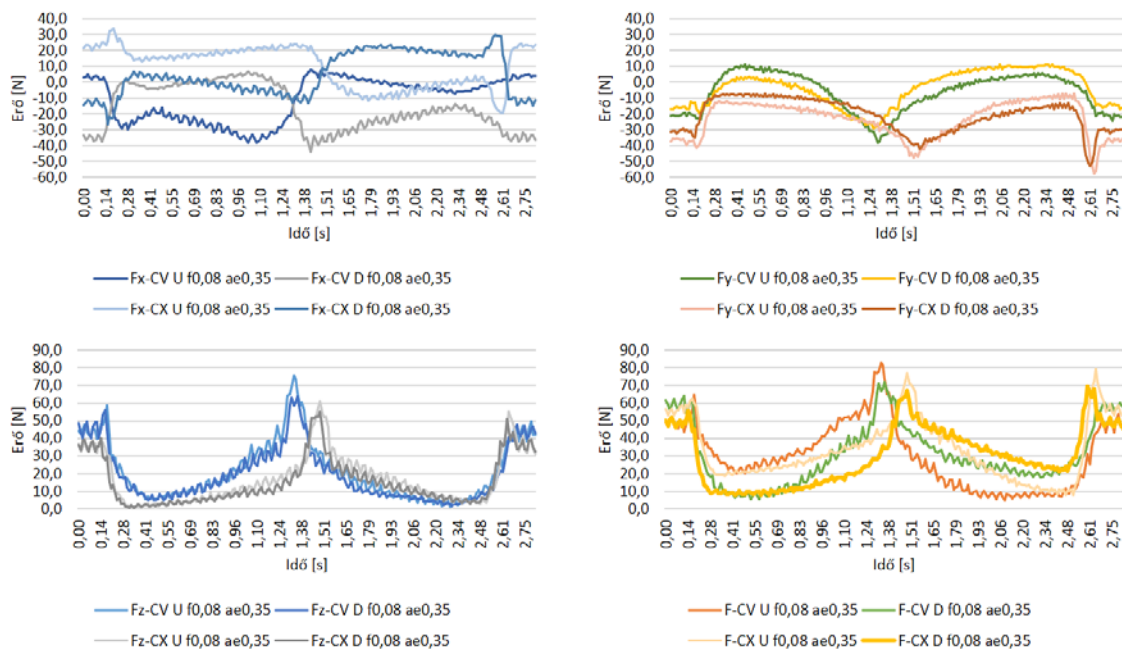


85. ábra: Konkáv és konvex tesztadarabok mért koordinátapontjai

7.2 Eredmények

A marás során fellépő erők időbeni változásának jellegét az 1 jelű beállítás esetén ($f_z=0,08$ mm; $a_c=0,35$ mm) ismertetjük. Az egyes komponensek jellege az összes beállítás esetén hasonló.

Mivel a forgácsolás y irányban történt, az F_x , x irányú erőkomponens az előtolásirányú erőre merőleges erő, az F_y , y irányú komponens az előtolásirányú erő, az F_z , z irányú komponens a szerszám tengelyirányú axiális erő. A három erőkomponens vektor összege a forgácsolási erő (F). A diagrammok egy szerszámút esetén mutatják az erők időbeni változását (86. ábra).



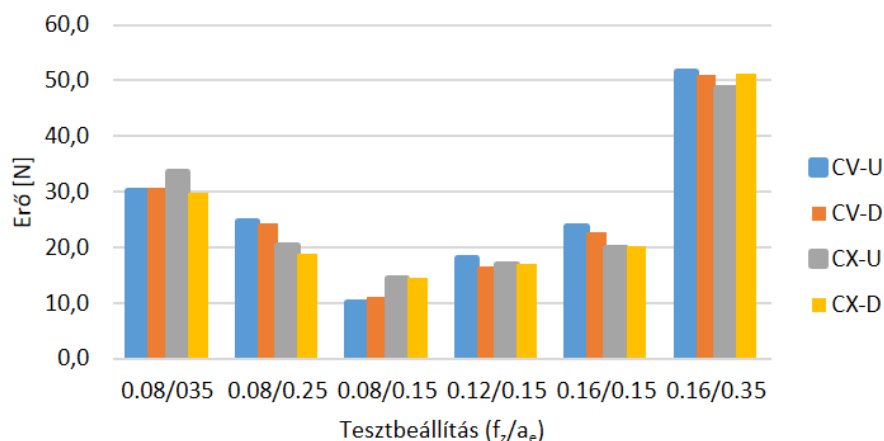
86. ábra: Forgácsoló erők ($f_z=0,08$ mm; $a_e=0,35$ mm)

A 86. ábra és a vizsgált beállításokhoz tartozó erődiagramok megtalálhatók a mellékletben, nagyobb méretben.

Mindegyik diagram esetén jól látható a felület változásának hatása. A felületek inflexiós pontjánál változik az erő jellege. Az előtolás irányra merőleges erő (F_x) esetén változik az erő iránya, valamint az ellen- (U, y^+ irányú előtolás) és egyenirányú (D, y^- irányú előtolás) marás esetén a diagramok közel szimmetrikusak. Az F_x erő bizonyos szakaszokon 0 érték körül ingadozik.

Az előtolás irányú erő (F_y) esetén az egyenes szakasznál az erőnek szélső értéke van, majd az inflexiós pont közelében szintén. Az axiális erők (F_z) esetén a jelleg hasonló, de a változás nagyobb mértékű. Mindhárom erőkomponens esetén a vízszintes részt elhagyva az erők gyors csökkenése figyelhető meg, majd az inflexiós ponthoz közeledve lassan növekszik az értékük. A homorú (CV) felület esetén a maximum az inflexiós pont előtt, a domború (CX) felület esetén kicsit utána van az erő maximum. Az eredő forgácsolási erő jellegét és nagyságát az axiális erő határozza meg.

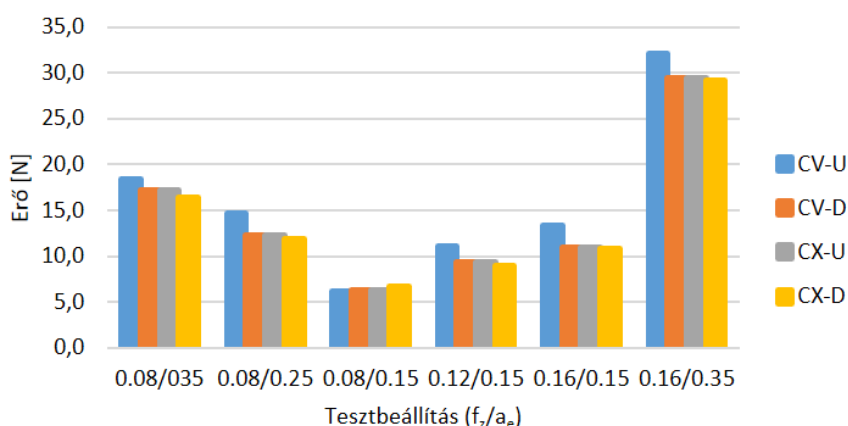
Az eredő erők átlagértékeit a 87. ábra mutatja. Mint látható, az egyen- és ellenirányú marás, valamint a homorú és domború felület esetén a különbségek kismértékűek, az előtolás és a fogásszélesség nagyobb hatást gyakorol a forgácsolási erőre. A diagramból az is látszik, hogy a fogásszélesség nagyobb hatással van az eredő erőre, mint az előtolás. A legnagyobb érték természetesen a vizsgált maximális paramétereknél van.



87. ábra: Átlagos forgácsolóerő

Az egyes erőkomponensek erőértékeinek átlaga megtalálható a mellékletben

Egy pálya mentén az erő értékének változását a szórással jellemezhetjük. Mint a 88. ábra mutatja, követi az erő esetén tapasztalt tendenciákat. A szórás relatív értéke 43-62%, ami azt jelzi, hogy jelentősen változik az erő a szerszámpálya mentén.

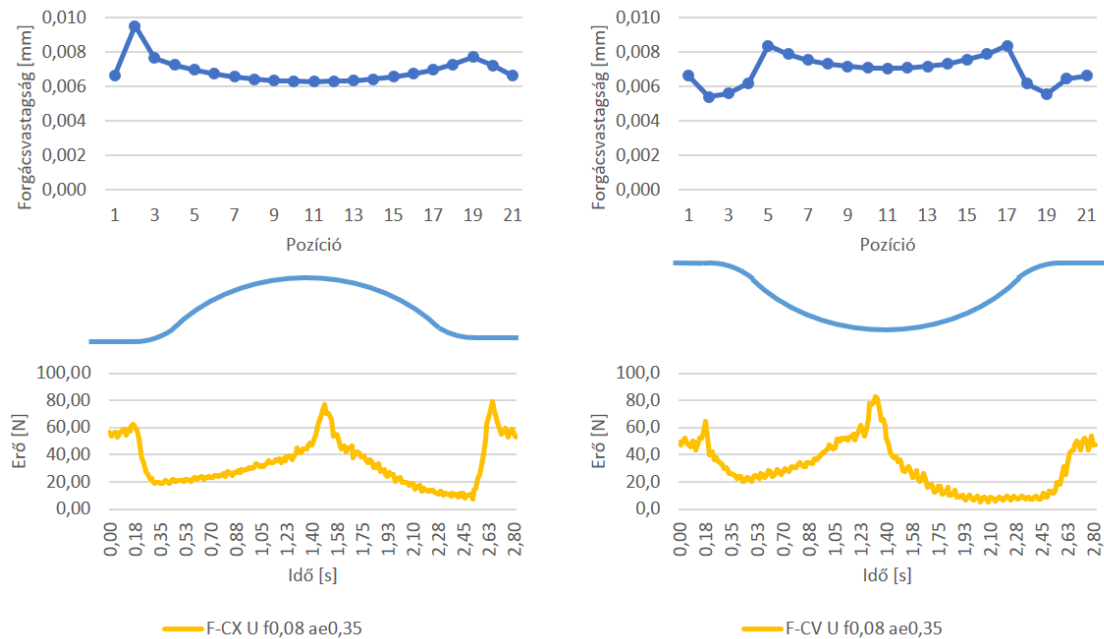


88. ábra: A forgácsolóerő szórása

Az egyes erőkomponensek erőértékeinek szórása megtalálható a mellékletben

A marópálya mentén CAD modellezés segítségével meghatároztuk a nem leválasztott forgács térfogatát és átlagos vastagságát a 4. fejezetben ismertetett eljárás szerint. Az 1. beállítás esetén az értékeket a 89. ábra mutatja. A felület változását, a forgácsvastagság változását és a forgácsolóerő változását összevetve megállapítható, hogy az erő értékére nem csak a forgácsvastagság van hatással, mivel a felület középső szakaszán tapasztalt erőnövekedést nem indokolja a forgácsvastagság változása.

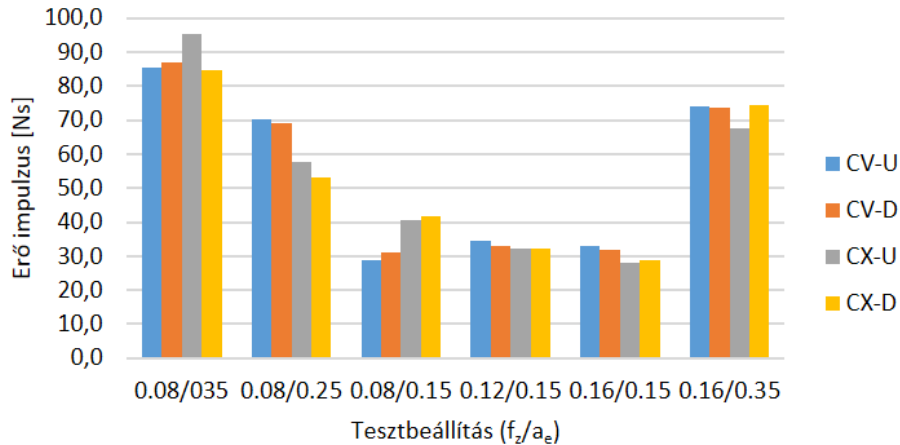
Az erő növekedését a forgácsolási viszonyokban történő változásokban kell keresni. A vízszinteshez közel álló felület szakaszokon a szerszám csúcsa (keresztéle) is dolgozik. Azonban itt a kis átmérő miatt a forgácsolási sebesség 0 körüli, valamint az él kialakítása miatt a forgácsleválasztás korlátozott. Ebből következően a forgács leválasztása mellett megnő az alapanyag rugalmas és képlékeny deformációja, ami a szerszámra ható erő növekedésében mutatkozik meg.



89. ábra: Forgácsvastagság és forgácsolóerő (CV-CX; $f_z=0,08$ mm; $a_e=0,35$ mm)

Az egyes beállítások esetén a megmunkálási idő eltér (83. ábra). Ennek hatását mutatja az erő impulzus, ami tulajdonképpen az erő-idő függvény alatti területe. Az erőimpulzus alkalmas eszköz a változó forgácsolási körülmények között mért erő értékek összehasonlítására.

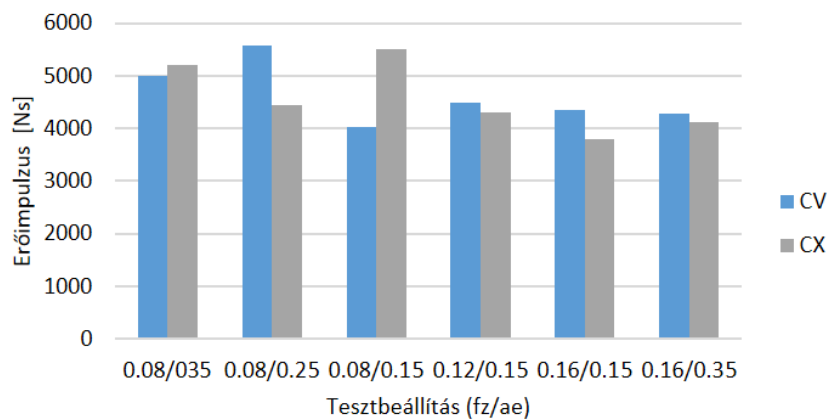
Az erő impulzus értéke egyszerre veszi figyelembe az erő nagyságát, változását és a megmunkálás idejét. A 90. ábra 1-1 szerszám pálya esetén mutatja az értékeket. Az előtolás csökkentésével (1-2-5 beállítás) az érték csökken, majd a fogásszélesség növekedése (5-4-3 beállítás) okozta erőnövekedést a rövidebb marási idő kompenzálja. Az utolsó, maximális értékeket tartalmazó beállítás esetén (6) a nagy erő értékeket kompenzálja a nagyon rövid marási idő, így az erő impulzus értéke kisebb, mint az 1. beállítás esetén.



90. ábra: Erőimpulzus egy szerszám-pálya esetén

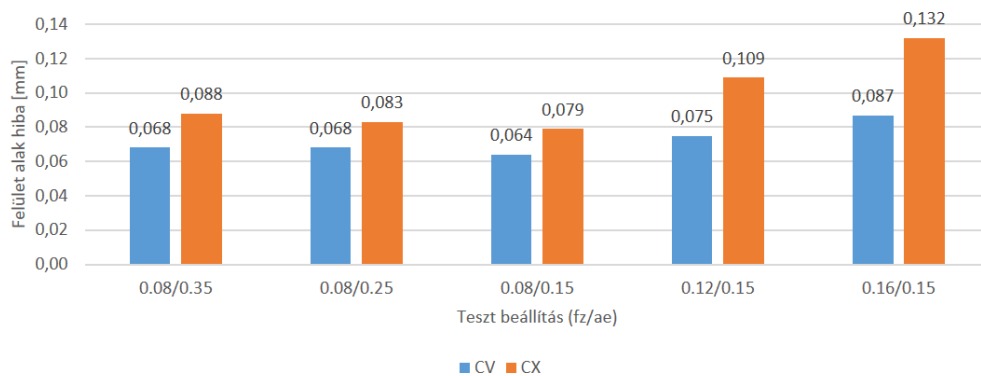
Az egyes erőkomponensek erőértékeinek időszerinti integrálja megtalálható a mellékletben

A teljes felületre számolva az erő impulzus értékét az ellen- és egyenirányú pályaszakaszokat egyszerre kell figyelembe venni. Az értékek (91. ábra) az 1. beállítás esetén nagyobbak. A 2. és 5. beállítás esetén a konkáv és konvex felületre meghatározott értékek jelentősen eltérnek. Az 5-3-4-6. beállítások esetén lényegében azonos értékeket kapunk.



91. ábra: Erőimpulzus a felületen

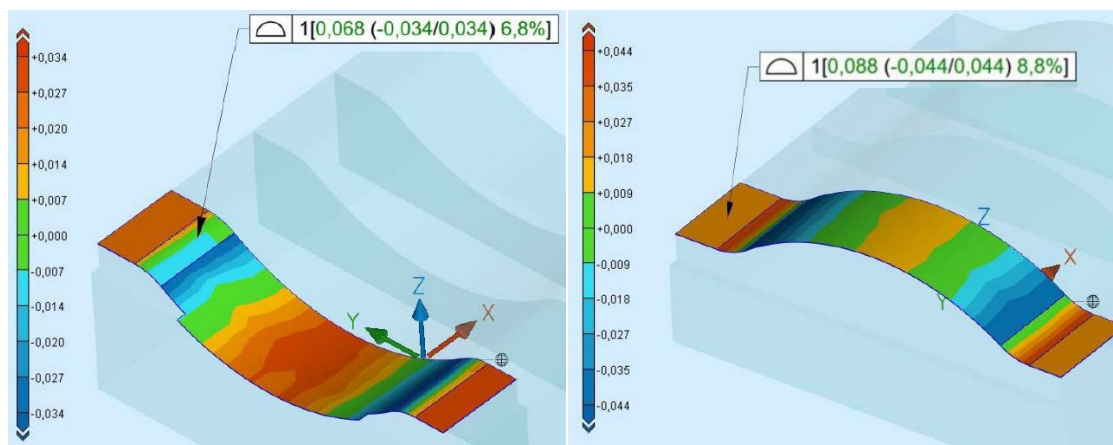
Az egyes felületek alakhibáját a 92. ábra mutatja, ezek értéke 0,06 mm és 0,14 mm közé esik. Mint látható a konvex felületek hibája nagyobb, annak ellenére, hogy az eredő erő átlagértékeiben nagy különbséget nem tapasztaltunk.



92. ábra: Felületi profilhiba

Míg az erők esetén a fogásszélesség mutat nagyobb hatást, a geometriai hiba az előtolás növelésével nőtt nagyobb mértékben.

A felület alakhiba egy hiba sáv vastagságát jelenti, de a felület mentén az eltérés változik. A 93. ábra az 1. beállításhoz tartozó felületek esetén mutatja a felület alaktúrésen belüli eltéréseit. Ezek az eltérések jól követik a forgácsolási erő alakulását, a vízszintes kezdő és záró szakaszoknál, illetve a felület közepén, ahol az erő maximális értékét mértük (86. ábra), a felület eltérése a legnagyobb pozitív irányba. Az átvezető rádiusznál, ahol az erő lecsökken, a felület nagy negatív eltérést mutat.



93. ábra: Felületi profilhiba térkép (CV-CX; $f_z=0,08$ mm; $a_e=0,35$ mm)

A vizsgált beállításokra az alakpontosság színtérképes felületi eltéréseinek ábrái megtalálhatók a mellékletben.

7.3 Következtetések

A szabad formájú felületek gömbvégű marással történő megmunkálásakor CAM-rendszert kell használni a szerszámpanya létrehozásához, amely biztosítja a felület méret- és alakpontosságát, valamint a megfelelő felületi érdességet. E követelmények

kombinációja csak a megfelelő mozgásstratégia, szerszámgeometria és marási paraméterek kiválasztásával lehetséges.

A mérési adatok alapján megállapítható, hogy

- (1) a forgácsolóerő a megmunkálási folyamat során nagymértékben változik;
- (2) a marási erő változását követi a mart felület geometriai pontossága;
- (3) az erőimpulzus hatékonyan használható a megmunkálási paraméterek által okozott erő- és megmunkálási időváltozások hatásának összehasonlítására;
- (4) az erő változását nemcsak a forgács keresztmetszetének változása határozza meg, hanem a szerszám ténylegesen megmunkáló szakaszának körülményei is;
- (5) amikor a szerszám hegye részt vesz a megmunkálásban (vízszinteshez közeli felületek), a forgácsolóerő jelentősen megnő, az alaki eltérés megnő;

A kapott eredmények alapján megállapítható, hogy a gömbvégű szerszámmal történő szabad formájú felületek simító megmunkálásához olyan marási stratégiát kell választani, amelyben a szerszám hegye nem vesz részt a megmunkálásban a forgácsolóerő és az alaki eltérés csökkentése érdekében.

A forgácsolóerő számításal történő meghatározásakor a forgácskeresztmetszet mellett a szerszám munkaszelvényének helyzetét is figyelembe kell venni, mivel ez is jelentősen befolyásolja a forgácsolóerőt.

További kutatásokban lehetne vizsgálni a szerszám kialakításának hatását a forgácsolóerőre és a forgácsolási eltérésre, például különböző fogszámok esetén.

8 ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK – TÉZISEK

1. Tézis

Kidolgoztam egy CAD szimulációs módszert, mellyel meg lehet határozni szabad formájú felületek gömbvégű marása során a keletkező forgács alakját, térfogatát, közepes vastagságát. (Vizsgálati paraméterek tartományai: $D_c = 10$ mm; $a_p = 0,3$ mm; $f_z = 0,08-0,16$ mm; $a_e = 0,15-0,35$ mm.)

A szimulációs eredmények alapján megállapítottam, hogy homorú és domború felületek esetén a forgácstérfogat és a közepes vastagság eltérő módon változik. A közepes forgácsvastagság pálya menti változása (szórás) jelentős és függ a marási iránytól, azonban átlag értéke csak kis mértékben érzékeny a marási irányra. A forgácstérfogat átlagértéke és szórása nem érzékeny a marás irányára.

A szimulációs adatok alapján regressziós modellt hoztam létre, ami jó közelítéssel határozza meg a forgács elméleti közepes vastagságát, figyelembe véve az előtolás, a fogásszélesség, az előtolási irány és a felületi normális értékét. A bemutatott szimulációs és regressziós módszer lehetőséget teremt a szerszámterhelés változásainak vizsgálatára, a megfelelő marási stratégia kiválasztására és az elméleti érdekesség meghatározására is.

2. Tézis

Szabad formájú mart felület koordináta mérőgépen végzett felület mérése során vizsgáltam a mérési pontok ideális számát és a pontmintavételezési módszereket és hatásukat a vizsgált méret- és alakpontosságra. (Vizsgálati paraméterek: Felület nagysága 80 x 80 mm; felület jellege: homorú és domború; pontmintavételezési stratégia: mátrix és Halton-Zaremba.)

Az elemzés alapján megállapítható, hogy a mérethiba esetén a pontok száma és a pontmintavételi módszer csak kis mértékben befolyásolja a mért értékeket. A hengeresség és a felületi profil hibája esetén a felület jellege (domború vagy homorú) és a marási paraméterek hatással vannak a hibák értékére. A pontok számának növelése javítja az értékek pontosságát.

A mért adatok alapján megállapítottam, hogy létezik a pontok számára vonatkozó olyan határ, amely felett a felületi profilhiba értéke csak kis mértékben növekszik, így ez jelenti

a mérések során alkalmazandó legkisebb értéket. A kísérletek alapján ez az érték független a vizsgált mintavételezési módszerektől.

3. Tézis

Egy irányba görbült szabad formájú felületek gömbvégű maróval történő simító marási kísérleteivel igazoltam, hogy a homorú munkadarabok felületi érdessége jobb, mint a domború daraboké. Ezt a tendenciát nem befolyásolja a fogankénti előtolás értéke vagy az oldallépés (fogásszélesség) nagysága.

A felületi érdesség értékét azonban nagymértékben befolyásolja a felületi normális vektor és a szerszámtengely egymáshoz képesti viszonylagos helyzete. Ahol a vektor párhuzamos a szerszám tengelyével (vízszintes felületek), ott tapasztaltam a legrosszabb érdességértékeket, mivel a gömbvégű maró és a munkadarab ebben az esetben érintkezik a legkisebb felületen és a legkisebb szerszám átmérőn.

Az érdesség értékét a szerszám pályája iránya jelentősen befolyásolja, ezért ennek helyes megválasztásával a felületi érdesség javítható. (Vizsgálati paraméterek: $n = 5100$ 1/min; $D_c = 10$ mm; $v_f = 1650$ mm/min; $a_p = 0,3$ mm; $f_z = 0,08$ mm; $a_e = 0,35$ mm;)

4. Tézis

Egy irányba görbült szabad formájú felületek gömbvégű maróval történt simító marási kísérleteivel igazoltam, hogy a mérethiba (dimenzionális hiba) a szerszám pályája irányával változik, de a felületek jellege lényegesen befolyásolja azt. Az elvégzett kísérletek alapján a homorú próbatestek sugara nagyobb, a domború próbatestek esetében pedig kisebb, mint a névleges érték.

A forgácsolási paraméterek és a pásztázási mód (szerszám pályája stratégia) kevésbé befolyásolja a méretpontosságot, mint a felület jellege háromtengelyes megmunkálás esetén. (Vizsgálati paraméterek: $n = 5100$ 1/min; $D_c = 10$ mm; $v_f = 1650$ mm/min; $a_p = 0,3$ mm; $f_z = 0,08$ mm; $a_e = 0,35$ mm;)

5. Tézis

Gömbvégű maróval mart szabadformájú felület alakpontosságának vizsgálatokor megállapítottam, hogy a hengeresség és a felületi profilhiba érzékeny a felület jellegére. (Vizsgálati paraméterek tartományai: $D_c = 10$ mm; $a_p = 0,3$ mm; $f_z = 0,08-0,16$ mm; $a_e = 0,15-0,35$ mm.)

A profilhiba értékét nagymértékben befolyásolja a megmunkálás iránya (pásztázási irány), valamint az előtolási sebesség és az oldallépés. Azonos geometriai kialakítás mellett, a domború felületek kisebb geometriai hibával rendelkeznek. A domború és a homorú próbatestek esetében az eltérés akár kétszeres is lehet.

A vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy a marási iránynak nagyobb hatása van az alakhúségre, mint a marási paramétereknek. Ennek oka, hogy a felület változása és az előtolás iránya miatt torzulnak a névleges forgácsolási paraméterekből adódó geometriai viszonyok.

6. Tézis

Szabad formájú felületek simító marási kísérleteivel igazoltam, hogy az eredő forgácsolóerő és az egyes erőkomponensek (axiális, előrolás irányú, előtolásra merőleges) a megmunkálási folyamat során nagymértékben változik és a eredő erő változását követi a mart felület geometriai pontossága, azonban az erő változása eltér az elméleti közepes forgácsvastagság változásától. Domború munkadarabok esetén a forgácsolóerő nagyobb és a vízszintes felületi szakaszoknál az erő maximális értéket vesz fel. (Vizsgálati paraméterek tartományai: $D_c = 10$ mm; $a_p = 0,3$ mm; $f_z = 0,08-0,16$ mm; $a_e = 0,15-0,35$ mm.)

Bemutattam, hogy az erőimpulzus hatékonyan használható a megmunkálási paraméterek által okozott erő- és megmunkálási időváltozások hatásának összehasonlítására. Az eredő erő változását nemcsak a forgács keresztmetszetének változása határozza meg, hanem a szerszám ténylegesen megmunkáló szakaszának körülményei is. Amikor a szerszám csúcsa részt vesz a megmunkálásban (vízszinteshez közeli felületek), a forgácsolóerő jelentősen megnő, az alaki eltéréssel együtt.

Kísérleti eredmények alapján javasoltam, hogy a gömbvégű szerszámmal történő szabad formájú felületek simító megmunkálásához olyan marási stratégia legyen választva, amelyben a szerszám csúcsa a legkevésbé vesz részt a megmunkálásban a forgácsolóerő és az alaki eltérés csökkentése érdekében. A forgácsolóerő számítással történő meghatározásakor a forgácskeresztmetszet mellett a szerszám munkaszelvényének helyzetét is figyelembe kell venni, mivel ez jelentősen befolyásolja a forgácsolóerőt.

9 ÖSSZEFOGLALÁS

A doktori értekezésemben a szabad formájú mart felületek megmunkálásának elméleti és kísérleti vizsgálatát végeztem el. Ezek a felületek egyre jobban elterjednek a mindennapokban, így fontosságuk folyamatosan nő. Ezzel együtt a technológiai követelmények is folyamatosan nőnek, egyre nagyobb pontossággal kell elkészíteni ezeket a felületeket mind érdesség, mind pedig alakpontosság szempontjából.

Első lépésként kidolgoztam egy CAD szimulációs módszert, amellyel meg lehet határozni szabad formájú felületek gömbvégű marása során keletkező forgács alakját, térfogatát és közepes vastagságát. A szimulációs adatok alapján regressziós modellt hoztam létre, ami jó közelítéssel határozza meg a forgács elméleti közepes vastagságát, figyelembe véve az előtolás, a fogásszélesség, az előtolási irány és a felületi normális értékét. A szimulációs és regressziós módszerek lehetőséget teremtenek a szerszámterhelés változásainak vizsgálatára, a megfelelő marási stratégia kiválasztására és az elméleti érdesség meghatározására is.

A következő lépésben az alakpontosság vizsgálatához nélkülözhetetlen koordináta mérések módszerét vizsgáltam. Azon belül is a mintavételezési módszert és a mérési pontok számának jelentőségét. A mért adatok alapján megállapítottam, hogy létezik a pontok számára vonatkozó olyan határ, amely felett a felületi profilhiba értéke csak kis mértékben növekszik, így ez jelenti a mérések során alkalmazandó legkisebb értéket.

Az elméleti vizsgálatokat a kísérleti vizsgálatok követték. Először a simító marás irányának hatását vizsgáltam a felületi érdesség, a méret- és alakpontosság szerint. Ezt követte a szerszám pályák vizsgálata az előző szempontokhoz hasonlóan. Végül a forgácsolási paraméterek vizsgálata következett.

A vizsgálatok alapján a homorú darabok érdességi értékei jobbak, mint a domború daraboké. Felületi érdesség szempontjából a szerszám pályák irányának megválasztása, illetve a felületi normál vektor és a szerszám tengely helyzete fontos tényező.

Az elvégzett kísérletek alapján a homorú próbatestek sugara nagyobb, a domború próbatestek esetében pedig kisebb, mint a névleges érték. A forgácsolási paraméterek és a pásztázási mód (szerszám pályák stratégia) kevésbé befolyásolja a méretpontosságot, mint a felület jellege háromtengelyes megmunkálás esetén.

Az alakpontosságot a hengeresség és a felületi profilhiba alapján vizsgáltam. A hengeresség és a felületi profilhiba érzékeny a felület jellegére és nagymértékben befolyásolja a megmunkálás iránya, az előtolási sebesség és az oldallépés. A vizsgálatok alapján megállapítottam, hogy a marási iránynak nagyobb hatása van az alakhúségre, mint a marási paramétereknek.

Végül a szabad formájú felületek marása során fellépő erők vizsgálata következett. A forgácsolóerő a megmunkálási folyamat során nagymértékben változik és a marási erő változását követi a mart felület geometriai pontossága. Az erő változását nemcsak a forgács keresztmetszetének változása határozza meg, hanem a szerszám ténylegesen megmunkáló szakaszának nagysága és helyzete is. A forgácsolóerő jelentősen megnő, amikor a szerszám keresztéle is részt vesz a forgácsolásban, ezért ezt amennyire lehet, kerülni kell. A forgácsolóerő számításal történő meghatározásakor a forgácskeresztmetszet mellett a szerszám munkaszelvényének helyzetét is figyelembe kell venni, mivel ez jelentősen befolyásolja a forgácsolóerőt.

Kutatásom eredményeként az ipari gyakorlatban hasznosítható, a technológiai tervezés során alkalmazható összefüggéseket és következtetéseket határoztam meg.

A kutatás jövőbeni folytatására több területen is lehetőség van:

- A CAD modell alapján készített regressziós modell bővítése a fogásmélység és a szerszámátmérő figyelembe vételével.
- A forgácsolási paraméterek hatásának részletes vizsgálata a felület alakhiba vonatkozásában.
- A kísérleti eredmények felhasználásával épített matematikai modell alapján egy szimulációs alkalmazás fejlesztése, amely a felület alakját, a forgácsolási paramétereket és a szerszám pályát figyelembe véve képes becsülni a felület alakeltéréseit.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Az értekezés az Anyagtudományok és Technológiák Doktori iskola keretein belül a „Szabadformájú mart felületek mikro- és makro pontosságának vizsgálata” témájú kutatómunkámat foglalja össze, melyet az Óbudai Egyetem Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Kar, Gépészeti és Technológiai Intézetben végeztem el.

Kiemelten mondok köszönetet témavezetőmnek, Dr. Mikó Balázsnak, aki elindított a szabad formájú felületek gyártásának kutatásában. Tudományos munkámat szakmailag és emberileg is maximális mértékben támogatta. Az értekezés során felmerült gyakorlati és elméleti kérdések megválaszolásával tudományos fejlődésemet segítette. Eredményeim közlésének aktív támogatásában, mind belföldi, mind pedig külföldi publikációk és konferenciárészvételek formájában.

Köszönettel tartozom az Óbudai Egyetem, Gépészeti és Technológiai Intézet munkatársainak. Köszönöm intézetvezetőmnek, Dr. Farkas Gabriellának kutatásom támogatását. Köszönöm Ráczai Viktornak a tesztdarabok és az erőmérés során végzett munkáját. Köszönöm Nagy Jánosnak a koordinátamérés során végzett lelkiismeretes munkáját, Dr. Drégelyi-Kiss Ágotának a kísérlettervezésben nyújtott közreműködését. Köszönöm Dr. Czifra Györgynek és Galambos Lászlónak is a segítségét. Külön köszönet az intézet korábbi munkatársának Dr. Sipos Sándornak a forgácsoláselemzés területén nyújtott szakmai segítségért.

Köszönettel tartozom több külföldi egyetem munkatársainak is. A Kassai Műszaki Egyetem professzorasszonyának Dr. Ildikó Mankovának és tanárának Dr. Marek Vrabelnek, a Krakkói Műszaki Egyetem professzorának Dr. Wojciech Zębalának a kutatásom szakmai támogatásáért.

Köszönettel tartozom a Frasia Hungária Kft-nek, hogy a tesztdarabok legyártásához biztosította a marószerszámokat, valamint Dimitar Kiryakovnak (KOTEM Kft.) az Evolve SmartProfile liszenszek biztosításáért.

Végezetül, de nem utolsó sorban köszönöm feleségem és gyermekeim ösztönzését, támogatását és türelmét a doktori képzésem és kutatásom során.

PUBLIKÁCIÓK

A disszertáció témájához kapcsolódó publikációk

- [S-1.] Varga B., Mikó B. (2017) Szabad formájú mart felületek érdességének változása a simítási irány függvényében. International Engineering Symposium, IESB2017. *(magyar nyelvű konferencia előadás és absztrakt)*
- [S-2.] Mikó B., Varga B. (2017) Forgácsolási paraméterek hatása gömbvégű maróval mart sík felület érdességére. International Engineering Symposium, IESB2017. *(magyar nyelvű konferencia előadás és absztrakt)*
- [S-3.] Varga B., Mikó B. (2018) Curved surface roughness and cylindricity. Development in Machining Technology – Scientific Research Report Vol.8 pp.66-75 Ed.: W. Zebala, I. Manková; Cracow University of Technology, Cracow 2018. ISBN 978-80-553-2718-1 *(idegen nyelvű konferencia cikk)*
- [S-4.] Varga B., Mikó B. (2018) Szabad formájú mart felületek érdességének változása a simítási irány függvényében. Bánki közlemények 2 pp. 85-90., 6 p. *(magyar nyelvű folyóirat cikk)*
- [S-5.] Varga B., Mikó B. (2018) Investigate of geometric accuracy of free-form surface profile. Multiscience XXXII. MicroCAD International Multidisciplinary Scientific Conference, Miskolci Egyetem Paper D2, 8 p. *(idegen nyelvű konferencia cikk)*
- [S-6.] Varga B., Mikó B. Zebala W. (2019) The Effect of the Feed Direction on the Micro- and Macro Accuracy of 3D Ball-end Milling of Chromium-Molybdenum Alloy Steel. Materials 12(24) p. 4038 *(idegen nyelvű folyóirat cikk, Q2 IF3,057)*
- [S-7.] Varga B., Mikó B. (2019) Felületi érdesség változása szabad formájú felület marása során. Proceedings of the Engineering Symposium at Bánki (ESB2019) Óbudai Egyetem 94 p. pp. 49-54. *(magyar nyelvű konferencia cikk)*
- [S-8.] Varga B., Mikó B. (2021) Impact of Different CAM Strategies and Cutting Parameters on Machining Free-Form Surface with Ball-End Milling Tools in Terms of Micro and Macro Accuracy. Acta Polytechnica Hungarica 18(7) pp. 109-127. *(idegen nyelvű folyóirat cikk, Q2 IF1,711)*
- [S-9.] Varga B., Mikó B. (2022) CAD modelling of the chip shape in case ball-end milling. Engineering and IT Solutions 3(2) pp.30-38 doi:10.37775/EIS.2022.2.3 *(idegen nyelvű folyóirat cikk)*
- [S-10.] Varga B., Mikó B. (2022) The effect of the point sampling to the result of coordinate measuring of free-form surface. Cutting & Tooling in Technological Systems (Rezanie i instrumenty v tekhnologicheskikh sistemah) (ISSN 2078-7405) 96 pp.89-98 doi: 10.20998/2078-7405.2022.96.10 *(idegen nyelvű folyóirat cikk)*
- [S-11.] Varga B.; Mikó B. (2023) Investigation of the cutting force and surface profile error when free form milling. Acta Technica Jaurinensis, 16(1):27-33, 2023 DOI: 10.14513/actatechjaur.00685 *(idegen nyelvű folyóirat cikk)*
- [S-12.] Varga B.; Mikó B. (2023) Regression model of uncuted chip thickness when ball end milling. Proceedings of Development in Machining Conference - DiM 2023 ; Crakow, Poland 27-28.04.2023. Development in machining technology 11:xx-xx Ed.: W. Zebala, I. Manková; Cracow University of Technology, Cracow 2023 *(megjelenés alatt) (idegen nyelvű konferencia cikk)*

Egyéb publikációk

- [S-13.] Varga B., Mikó B. (2010) Energetikai rendszerek CAD/CAE tervezése szoftverek kombinálásával. CAD: CAD/CAM/CAE, PLM, RPT, FEA 1 pp. 22-25.
- [S-14.] Mikó B., Csesznok S., Varga B. (2013) Prototípus alkatrészgyártás lehetőségei. Gyártóeszközök, szerszámok, szerszámgépek 1pp. 58-61., 4 p.
- [S-15.] Mikó B., Varga B., Bille P., Vinis P. (2016) Gépipari alkatrészek digitalizálása. Gyártóeszközök, szerszámok, szerszámgépek 19: 1pp. 32-34.
- [S-16.] Varga B., Mikó B. (2017) A felületmodellezés jelentősége a fordított mérnöki munka során. Gyártóeszközök, szerszámok, szerszámgépek 1pp. 16-19., 4 p.
- [S-17.] Mikó B., Tóth B., Varga B. (2017) Comparison of Theoretical and Real Surface Roughness in Case of Ball-End Milling. Solid State Phenomena 261 pp. 299-304., 6 p.
- [S-18.] Mikó, B., Horváth, T., Varga, B. (2018) Cusp height and surface roughness in z-level milling. Development in Machining Technology – Scientific Research Report Vol.8
- [S-19.] Czifra Gy., Varga B. (2018) Modern Teaching Methods in Today's Engineering Education. Konferencia Pécs

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Kátai L. (szerk.)(2012) CAD tankönyv, Egyetemi jegyzet, ISBN: 978-963-279-534-8.
- [2] Poldermann B, Horvath I.; Surface-based design based on parametrized surface features. In Proceedings of the International Symposium on Tools and Methods for Concurrent Engineering, Budapest, 1996; 432-446
- [3] Nyirenda, P. J., Bronsvort, W. F., Langerak, T. R., Song, Y., & Vergeest, J. S. (2005). A generic taxonomy for defining freeform feature classes. *Computer-Aided Design and Applications*, 2(1-4), 497-506.
- [4] Jiang, X., Scott, P., & Whitehouse, D. (2007). Freeform surface characterisation-a fresh strategy. *CIRP Annals*, 56(1), 553-556.
- [5] Sarcar, M. M. M., Rao, K. M., & Narayan, K. L. (2008). *Computer aided design and manufacturing*. PHI Learning Pvt. Ltd.
- [6] Haleem, A., Javaid, M., Singh, R. P., Rab, S., Suman, R., Kumar, L., & Khan, I. H. (2022). Exploring the potential of 3D Scanning in Industry 4.0: An Overview. *International Journal of Cognitive Computing in Engineering*.
- [7] Buonamici, F., Carfagni, M., Furferi, R., Governi, L., Lapini, A., & Volpe, Y. (2018). Reverse engineering modeling methods and tools: a survey. *Computer-Aided Design and Applications*, 15(3), 443-464.
- [8] Ma, W., He, G., Han, J., & Xie, Q. (2020). Error compensation for machining of sculptured surface based on on-machine measurement and model reconstruction. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(7), 3177-3187.
- [9] Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A review of additive manufacturing. *International scholarly research notices*, 2012.
- [10] Prakash, K. S., Nancharaih, T., & Rao, V. S. (2018). Additive manufacturing techniques in manufacturing-an overview. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3873-3882.
- [11] Newman, S. T., Zhu, Z., Dhokia, V., & Shokrani, A. (2015). Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies. *CIRP annals*, 64(1), 467-470.
- [12] Tóth József: Merre tart a gépészeti CAD tervezés? *CADvilág* 2002. V. évf. 4. szám p. 46–48.
- [13] Imre, J., & Sándor, L. *Számítógépi grafika* 2004.
- [14] Huo, G., Jiang, X., Su, C., Lu, Z., Sun, Y., Zheng, Z., & Xue, D. (2019). CNC tool path generation for freeform surface machining based on preferred feed direction field. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20(5), 777-790.
- [15] Käsmodel, R. B., de Souza, A. F., Voigt, R., Basso, I., & Rodrigues, A. R. (2020). CAD/CAM interfaced algorithm reduces cutting force, roughness, and machining time in free-form milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(3), 1883-1900.
- [16] Kawalec, A., & Magdziak, M. (2011). An influence of the number of measurement points on the accuracy of measurements of free-form surfaces on

- CNC machine tool. *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 35(2), 17-27.
- [17] Scandiffio, I., Diniz, A. E., & de Souza, A. F. (2016). Evaluating surface roughness, tool life, and machining force when milling free-form shapes on hardened AISI D6 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 82(9), 2075-2086.
- [18] Elanchezian, C., & Sundar, G. S. (2007). *Computer aided manufacturing*. Firewall Media.
- [19] Chen, T., & Shi, Z. (2008). A tool path generation strategy for three-axis ball-end milling of free-form surfaces. *Journal of materials processing technology*, 208(1-3), 259-263.
- [20] Líska, K. (2014). CAM strategies at machining. *GRADUS*, 1(1), 163-168.
- [21] De Souza, A. F., & Bodziak, S. (2012). *Advanced Free Form Manufacturing by Computer Aided Systems-Cax*. INTECH Open Access Publisher.
- [22] Lasemi, A., Xue, D., & Gu, P. (2010). Recent development in CNC machining of freeform surfaces: A state-of-the-art review. *Computer-Aided Design*, 42(7), 641-654.
- [23] Koenderink, J. J., & Van Doorn, A. J. (1992). Surface shape and curvature scales. *Image and vision computing*, 10(8), 557-564.
- [24] Mawussi, K. B., & Tapie, L. (2011). A knowledge base model for complex forging die machining. *Computers & Industrial Engineering*, 61(1), 84-97.
- [25] Ižol, P., Vrabel, M., & Maňková, I. (2016). Comparison of milling strategies when machining freeform surfaces. In *Materials Science Forum* (Vol. 862, pp. 18-25). Trans Tech Publications Ltd.
- [26] Fountas, N. A., & Vaxevanidis, N. M. (2020). Intelligent 3D tool path planning for optimized 3-axis sculptured surface CNC machining through digitized data evaluation and swarm-based evolutionary algorithms. *Measurement*, 158, 107678.
- [27] Magalhães, L. C., & Ferreira, J. C. E. (2019). Assessment of tool path strategies for milling complex surfaces in hardened H13 steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 233(3), 834-849.
- [28] Pena, A. E., Anania, F. D., & Zapciu, M. (2015, October). Research concerning optimum cutting parameters according with tool path strategy for finishing procedures. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 95, No. 1, p. 012020). IOP Publishing.
- [29] Varga, J., & Spišák, E. (2020). Influence of the milling strategies on roundness of machined surfaces. *Acta Mechanica Slovaca*, 24(3), 20-27.
- [30] Sadílek, M., Kousal, L., Náprstková, N., Szotkowski, T., & Hajnyš, J. (2018). The Analysis of Accuracy of Machined Surfaces and Surfaces Roughness after 3axis and 5axis Milling.
- [31] Mikó, B., & Beňo, J. (2014). Effect of the working diameter to the surface quality in free-form surface milling. In *Key Engineering Materials* (Vol. 581, pp. 372-377). Trans Tech Publications Ltd.
- [32] Toh, C. K. (2004). A study of the effects of cutter path strategies and orientations in milling. *Journal of materials processing technology*, 152(3), 346-356.

- [33] Pena, A. E., Anania, F. D., & Mohora, C. (2018, August). Methodology for optimizing cutting parameters on milling process. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 400, No. 2, p. 022044). IOP Publishing
- [34] Vavruska, P., Zeman, P., & Stejskal, M. (2018). Reducing machining time by pre-process control of spindle speed and feed-rate in milling strategies. *Procedia CIRP*, 77, 578-581.
- [35] Salami, R., Sadeghi, M. H., & Motakef, B. (2007). Feed rate optimization for 3-axis ball-end milling of sculptured surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(5), 760-767.
- [36] Erkorkmaz, K., Layegh, S. E., Lazoglu, I., & Erdim, H. (2013). Feedrate optimization for freeform milling considering constraints from the feed drive system and process mechanics. *CIRP Annals*, 62(1), 395-398.
- [37] Kurt, M., & Bagci, E. (2011). Feedrate optimisation/scheduling on sculptured surface machining: a comprehensive review, applications and future directions. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 55(9), 1037-1067.
- [38] Larue, A., & Altintas, Y. (2005). Simulation of flank milling processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(4-5), 549-559.
- [39] Li, Z. L., & Zhu, L. M. (2018). An accurate method for determining cutter-workpiece engagements in five-axis milling with a general tool considering cutter runout. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 140(2), 021001.
- [40] Wojciechowski, S., Maruda, R. W., Barrans, S., Nieslony, P., & Krolczyk, G. M. (2017). Optimisation of machining parameters during ball end milling of hardened steel with various surface inclinations. *Measurement*, 111, 18-28.
- [41] Abainia, S., & Bey, M. (2018). Feedrate optimization for 3-axis sculptured surfaces finishing using flat-end tool. *Journées de Mécanique de l'EMP (JM'11-EMP)*.
- [42] Olufayo, O. A., Che, H., Songmene, V., Katsari, C., & Yue, S. (2019). Machinability of Rene 65 superalloy. *Materials*, 12(12), 2034.
- [43] Kaya, E., & Akyüz, B. (2017). Effects of cutting parameters on machinability characteristics of Ni-based superalloys: a review. *Open Engineering*, 7(1), 330-342.
- [44] Thakur, D. G., Ramamoorthy, B., & Vijayaraghavan, L. (2012). Effect of cutting parameters on the degree of work hardening and tool life during high-speed machining of Inconel 718. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 59(5), 483-489.
- [45] Mou, W., Zhu, S., Zhu, M., Han, L., & Jiang, L. (2020). A prediction model of cutting force about ball end milling for sculptured surface. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020.
- [46] Beňo, J., Maňková, I., & Ižol, P. (2016). An approach to the evaluation of multivariate data during ball end milling free-form surface fragments. *Measurement*, 84, 7-20.
- [47] Ju, G. G., Song, Q. H., & Liu, Z. Q. (2014). Prediction of cutter-workpiece engagement for five-Axis ball-end milling. In *Materials Science Forum* (Vol. 800, pp. 254-258). Trans Tech Publications Ltd.
- [48] Yigit, I. E., & Lazoglu, I. (2015). A solid modeler based engagement model for 5-axis ball end milling. *Procedia CIRP*, 31, 179-184.

- [49] Kim, G. M., Cho, P. J., & Chu, C. N. (2000). Cutting force prediction of sculptured surface ball-end milling using Z-map. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40(2), 277-291.
- [50] Wei, Z. C., Wang, M. J., Zhu, J. N., & Gu, L. Y. (2011). Cutting force prediction in ball end milling of sculptured surface with Z-level contouring tool path. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(5), 428-432.
- [51] Lazoglu, I. (2003). Sculpture surface machining: a generalized model of ball-end milling force system. *International journal of machine tools and manufacture*, 43(5), 453-462.
- [52] Fussell, B. K., Jerard, R. B., & Hemmett, J. G. (2003). Modeling of cutting geometry and forces for 5-axis sculptured surface machining. *Computer-Aided Design*, 35(4), 333-346.
- [53] Lim, E. M., Feng, H. Y., Menq, C. H., & Lin, Z. H. (1995). The prediction of dimensional error for sculptured surface productions using the ball-end milling process. Part 1: Chip geometry analysis and cutting force prediction. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 35(8), 1149-1169.
- [54] Imani, B. M., Sadeghi, M. H., & Elbestawi, M. A. (1998). An improved process simulation system for ball-end milling of sculptured surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 38(9), 1089-1107.
- [55] Zhu, R., Kapoor, S. G., & DeVor, R. E. (2001). Mechanistic modeling of the ball end milling process for multi-axis machining of free-form surfaces. *J. Manuf. Sci. Eng.*, 123(3), 369-379.
- [56] Tuysuz, O., Altintas, Y., & Feng, H. Y. (2013). Prediction of cutting forces in three and five-axis ball-end milling with tool indentation effect. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 66, 66-81.
- [57] Li, J. G., Yao, Y. X., Xia, P. J., Liu, C. Q., & Wu, C. G. (2008). Extended octree for cutting force prediction. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(9), 866-873.
- [58] Kim, Y. H., & Ko, S. L. (2006). Improvement of cutting simulation using the octree method. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(11), 1152-1160.
- [59] Zhang, L., Feng, J., Wang, Y., & Chen, M. (2009). Feedrate scheduling strategy for free-form surface machining through an integrated geometric and mechanistic model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(11), 1191-1201.
- [60] Maeng, S. R., Baek, N., Shin, S. Y., & Choi, B. K. (2003). A Z-map update method for linearly moving tools. *Computer-Aided Design*, 35(11), 995-1009.
- [61] Gupta, S. K., Saini, S. K., Spranklin, B. W., & Yao, Z. (2005). Geometric algorithms for computing cutter engagement functions in 2.5 D milling operations. *Computer-Aided Design*, 37(14), 1469-1480.
- [62] Sun, Y., & Guo, Q. (2011). Numerical simulation and prediction of cutting forces in five-axis milling processes with cutter run-out. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(10-11), 806-815.
- [63] Wei, Z. C., Guo, M. L., Wang, M. J., Li, S. Q., & Liu, S. X. (2018). Force predictive model for five-axis ball end milling of sculptured surface. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(5), 1367-1377.

- [64] Wei, Z. C., Guo, M. L., Wang, M. J., Li, S. Q., & Wang, J. (2019). Prediction of cutting force for ball end mill in sculptured surface based on analytic model of CWE and ICCE. *Machining Science and Technology*, 23(5), 688-711.
- [65] El-Mounayri, H., Briceno, J. F., & Gadallah, M. (2010). A new artificial neural network approach to modeling ball-end milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(5), 527-534. Ren, Q., Balazinski, M., Baron, L., & Jemielniak, K. (2010, June). Fuzzy cutting force modelling in micromilling using subtractive clustering for learning evaluation. In *CIRP 2nd international conference process machine interactions (CIRP-PMI 2010)*.
- [66] Parmar, J. G., Dave, K. G., Gohil, A. V., & Trivedi, H. S. (2021). Prediction of end milling process parameters using artificial neural network. *Materials Today: Proceedings*, 38, 3168-3176.
- [67] Arnaiz-González, Á., Fernández-Valdivielso, A., Bustillo, A., & López de Lacalle, L. N. (2016). Using artificial neural networks for the prediction of dimensional error on inclined surfaces manufactured by ball-end milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 83(5), 847-859.
- [68] Njiiri, J. G., Ikua, B. W., & Nyakoe, G. N. (2012, June). Cutting force control for ball end milling of sculptured surfaces using fuzzy logic controller. In *Scientific Conference Proceedings*.
- [69] Günay, M., Korkut, I., Aslan, E., & Şeker, U. (2005). Experimental investigation of the effect of cutting tool rake angle on main cutting force. *Journal of materials processing technology*, 166(1), 44-49.
- [70] Basheer, I. A., & Hajmeer, M. (2000). Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application. *Journal of microbiological methods*, 43(1), 3-31.
- [71] Dernoncourt, F. (2013). Introduction to fuzzy logic. *Massachusetts Institute of Technology*, 21, 50-56.
- [72] ISO 4287:1997 Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definition and surface texture parameters.
- [73] ISO 4288:1996 Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Rules and procedures for the assessment of surface texture.
- [74] Benardos, P. G., & Vosniakos, G. C. (2003). Predicting surface roughness in machining: a review. *International journal of machine tools and manufacture*, 43(8), 833-844.
- [75] Vyboishchik, A. V. (2016). Modelling topology of freeform surfaces with ball-end milling. *Procedia Engineering*, 150, 761-767.
- [76] Sekulic, M., Pejic, V., Brezocnik, M., Gostimirović, M., & Hadzistevic, M. (2018). Prediction of surface roughness in the ball-end milling process using response surface methodology, genetic algorithms, and grey wolf optimizer algorithm. *Advances in Production Engineering & Management*, 13(1), 18-30.
- [77] Felhő, C., & Kundrak, J. (2014). Comparison of theoretical and real surface roughness in face milling with octagonal and circular inserts. In *Key Engineering Materials* 581, 360-365.
- [78] Rybicki, M. (2014, March). Problems during milling and roughness registration of free-form surfaces. In *Journal of Physics: Conference Series* 483(1) 012007

- [79] Bílek, O., Pata, V., Kubišová, M., & Řezníček, M. (2018). Mathematical methods of surface roughness evaluation of areas with a distinctive inclination. *Manufacturing Technology*, 18(3), 363-368.
- [80] Mgherony, A., Mikó, B., & Farkas, G. (2021). Comparison of Surface Roughness When Turning and Milling. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 65(4), 337-344.
- [81] Farkas G. (2010). Esztergált műszaki műanyag felületek mikrotopográfiai jellemzői. PhD Doktori értekezés, Szent István Egyetem, Gödöllő.
- [82] Szőrös G.; Felületi érdesség mérése, megállapítása; Nemzeti Szakképzési és Felnőttképzési Intézet; Budapest 2008
- [83] Farkas, G., & Drégelyi-Kiss, Á. (2018, November). Measurement uncertainty of surface roughness measurement. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 448(1) 012020
- [84] Kovács K., Palásti K. B. (1999): Műszaki felületek mikrotopográfiájának jellemzése háromdimenziós paraméterekkel. I. A háromdimenziós topográfiai paraméterek áttekintése, *Gépgyártástechnológia*, 39 (8) 31-38.
- [85] ISO 1101-2017 Geometrical Product Specifications (GPS)—Geometrical Tolerancing—Tolerances of Form, Orientation, Location and Run-Out; ISO: Geneva, Switzerland, 2017
- [86] Mikó Balázs: Tűrésezési folyamat kapcsolatai és hatásai; III. Gépészeti Szakmakultúra Konferencia; 2018. Február 1. Budapest; ID: 2A1
- [87] Li, Y., & Gu, P. (2004). Free-form surface inspection techniques state of the art review. *Computer-Aided Design*, 36(13), 1395-1417.
- [88] Gosavi, A., & Cudney, E. (2012). Form errors in precision metrology: a survey of measurement techniques. *Quality Engineering*, 24(3), 369-380.
- [89] Zhao, D., Wang, W., Zhou, J., Jiang, R., Cui, K., & Jin, Q. (2018). Measurement point sampling method for inspection of parts with free-form surfaces. *Advances in mechanical engineering*, 10(11), 1687814018809577.
- [90] Zahmati, J., Amirabadi, H., & Mehrad, V. (2018). A hybrid measurement sampling method for accurate inspection of geometric errors on freeform surfaces. *Measurement*, 122, 155-167.
- [91] Rajamohan, G., Shunmugam, M. S., & Samuel, G. L. (2011). Practical measurement strategies for verification of freeform surfaces using coordinate measuring machines. *Metrology and Measurement Systems*, 18(2), 209-222.
- [92] Mali, R. A., Gupta, T. V. K., & Ramkumar, J. (2021). A comprehensive review of free-form surface milling—Advances over a decade. *Journal of Manufacturing Processes*, 62, 132-167.
- [93] Mikó, B. (2021). Assessment of flatness error by regression analysis. *Measurement*, 171, 108720.

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat: 42CrMo4 összetétele	39
2. táblázat: Fraisa X7450.450 gömbvégű marószerszám geometriai tulajdonságai	40
3. táblázat Nagyoló megmunkálás beállításai	41
4. táblázat: Elősimító megmunkálás beállításai	42
5. táblázat: Simítás beállításai	43
6. táblázat: Forgácsolási paraméterek	51
7. táblázat: Regressziós táblázat	59
8. táblázat: Forgácsolási paraméterek	64
9. táblázat: Példa 36 pontra	65
10. táblázat: Vizsgált felületpontok normálvektorai	77
11. táblázat: A felületi profilhibák regressziós egyenletei	87
12. táblázat: Forgácsolási paraméterek	91

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A vizsgálat folyamata	9
2. ábra: Szabad formájú felületek felhasználásának példái	11
3. ábra: Transzlációs felület létrehozása [1]	12
4. ábra: Vonalfelület generálása [1]	12
5. ábra: A felületek normálvektora	14
6. ábra: Szabad formájú felületek felosztása [3]	14
7. ábra: Szabad formájú felületek előállítás	16
8. ábra: Vizsgálati szempontok csoportosítása	17
9. ábra: Gömbvégű marószerszám	19
10. ábra: Marási jellemzők és stratégiák egymásra hatása [24]	20
11. ábra: Marási jellemzők és a szerszám egymásra hatása [24]	20
12. ábra: Négy különböző szerszám pálya orientáció [32]	21
13. ábra: Forgácsalak testmodellezéssel történő előállítása [48]	24
14. ábra: Z-map módszer [60]	25
15. ábra: Kibővített Octree modell a munkadarab és a szerszám átfedésének ábrázolására [57]	26
16. ábra: Objektumok Dixel ábrázolása [59]	26
17. ábra: Többszörös metszéspontok a szerszám pálya burkológörbe és a dixel elemek között [59]	27
18. ábra: Szerszám élgeometria gömbvégű maró esetén [64]	28
19. ábra: Egyszerű, biológiai ihletésű neurális háló ($x_1 \dots x_n$ - bemeneti paraméterek; y – kimeneti érték; $w_1 \dots w_n$ - súlyparaméterek) [70]	29
20. ábra: Neurális hálózat felépítése [65]	30
21. ábra: Egyenetlenség magasság [82]	32
22. ábra: Átlagos felületi érdesség [82]	32
23. ábra: Alak- és helyzetűrések ISO 1101 szerint [85]	34
24. ábra: Az FFMS (Free Form Surface Milling) pontosságát befolyásoló tényezők [92]	35
25. ábra: A kísérletek folyamata	36
26. ábra: Domború (konvex) és homorú (konkáv) munkadarab	38
27. ábra: Domború és homorú munkadarab CAD modellje	38
28. ábra: Fraisa X7450.450 gömbvégű marószerszám	40

29. ábra: MAZAK Nexus 410 A-II típusú megmunkálóközpont és tulajdonságai	41
30. ábra: Nagyoló megmunkálás (legyártott tesztadarab (a), CAM-es térfogatszimuláció (b) és szerszámpálya (c))	42
31. ábra: Elősimítő megmunkálás (legyártott tesztadarab (a), CAM-es térfogatszimuláció (b) és szerszámpálya (c))	43
32. ábra: DMG Mori EcoMILL 50	44
33. ábra: Simító megmunkálás az öttengelyes marógépen	44
34. ábra: a) Marh Perten Concept GD120 b) MFW tapintórendszer	45
35. ábra: Felületi érdesség mérése	46
36. ábra: Mitutoyo Crysta Plus 544 koordináta mérőgép és tapintófej	47
37. ábra: Koordináta pontok mérése a méret és geometriai meghatározásához	47
38. ábra: KISTLER 5019 típusú erősítő (a), KISTLER 9257B erőmérőpad (b)	48
39. ábra: A forgácsalakot meghatározó tényezők	50
40. ábra: A modellezés folyamata	51
41. ábra: A szimuláció CAD modellje	52
42. ábra: Modellezett forgácsalak	52
43. ábra: A modellezés során vizsgált szerszám pozíciók	53
44. ábra: A forgácstérfogat és a közepes forgácsvastagság változása a marási irány szerint a vizsgált mérési pozíciókban	54
45. ábra A forgácstérfogat és a közepes forgácsvastagság változása a marási paraméterek függvényében 90°-os marási irány esetén.	55
46. ábra Átlagértékek az íves (R45) szakaszon.	56
47. ábra A forgácstérfogat átlaga és szórása marási irány szerint.	57
48. ábra Közepes forgácsvastagság átlaga és szórása marási irány szerint.	58
49. ábra: A CAD szimulációval és a regresszióval számolt forgácsvastagság értékek ...	60
50. ábra: A regressziós függvények összegzett négyzetes hibája	61
51. ábra: Példák forgácsvastagság értékekre különböző számítási módszere esetén	61
52. ábra: Forgácsvastagság regressziós függvénnyel becsülve (CX, fz=0,08mm, ae=0,15mm)	62
53. ábra: Felület alakeltérése térképe	62
54. ábra: Példa 36 pontos mintavétel	66
55. ábra: Mátrix pont mintavétel	67
56. ábra: Halton-Zaremba pont mintavétel	67

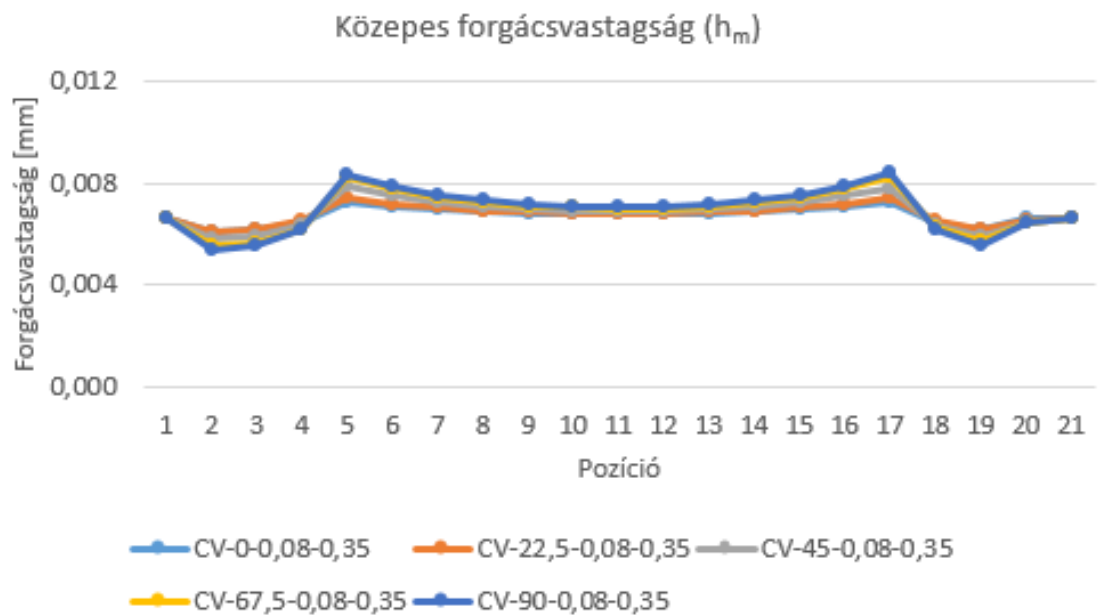
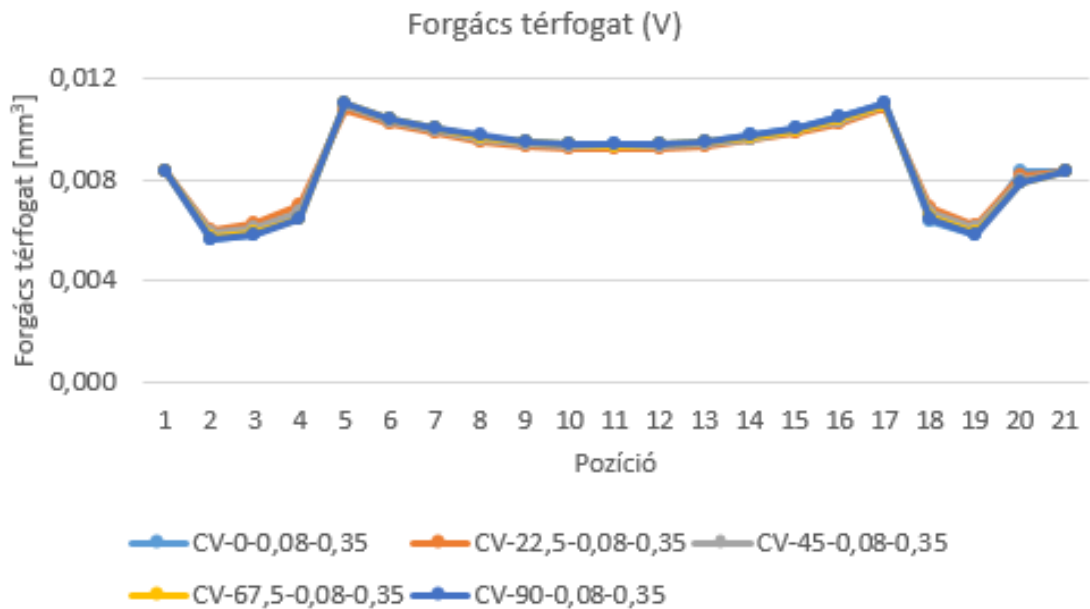
57. ábra: A hengeresség és a felületi profilhiba meghatározása az ISO 1101 szabvány alapján.....	68
58. ábra: A mért méret- és geometriai adatok.....	69
59. ábra: A felületi profil hibája NoP=36 esetén (CX-1; CV-1).....	70
60. ábra: A sugár főhatás ábrái	71
61. ábra: A sugár főhatás ábrái szeparált adatok alapján.....	71
62. ábra: A geometriai hibák főhatás diagramjai.....	72
63. ábra: Különböző szerszámpályák	74
64. ábra: Konvex (CX) és konkáv (CV) tesztadarab geometriája és a marás irányának meghatározása.....	75
65. ábra: Öttengelyes megmunkálás szerszámpályái.....	76
66. ábra: A felületi érdesség mérési pozíciói.....	77
67. ábra: A geometriai tűréshatárok meghatározása a Smart Profile és a tesztalkatrészek (CX-3, CV-3) esetében.	78
68. ábra: A mart felület sugár értékei	79
69. ábra: Rádiuszértékek az összes adatra vonatkozóan.....	79
70. ábra: Tesztadarabok R_z értékei különböző normálvektor értékeknél.....	81
71. ábra: Az R_z átlagértékei a marási irány függvényében.....	81
72. ábra: R_z felületi érdességi jellemző átlaga	82
73. ábra: A felületi érdességet befolyásoló tényezők	82
74. ábra: A geometriai hibák értékei (CX-1-5; CV-1-5)	83
75. ábra: Felületi profilhiba értékek (CV1-10 - CX1-10).....	84
76. ábra: Hibatérképes felületi eltérés értékek.....	85
77. ábra: A mért paraméterek főhatásábrái.....	86
78. ábra: A hengeresség mért és becsült értékei	86
79. ábra: A regressziós egyenlet alapján becsült hengeresség.....	87
80. ábra: Különböző marási stratégiák megmunkálási ideje	88
81. ábra: Megmunkálási idő - érdesség diagram	88
82. ábra: Fogankénti előtolás és oldallépés	92
83. ábra: Megmunkálási idő.....	92
84. ábra: F_z erő komponens mért és szűrt értékei	93
85. ábra: Konkáv és konvex tesztadarabok mért koordinátpontjai.....	93
86. ábra: Forgácsoló erők ($f_z=0,08$ mm; $a_e=0,35$ mm)	94
87. ábra: Átlagos forgácsolóerő	95

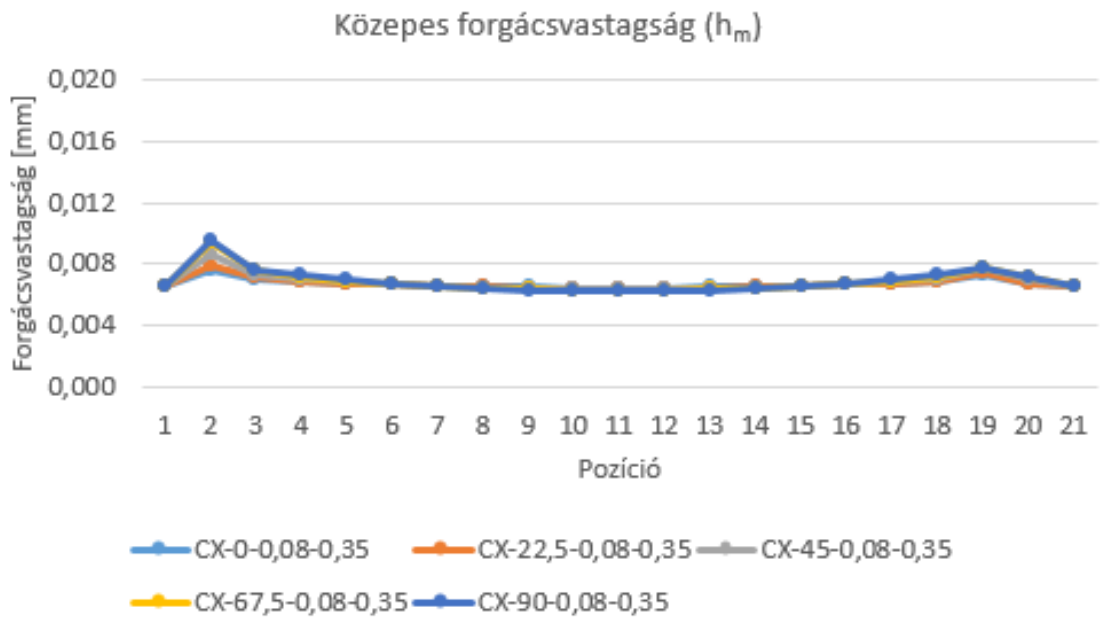
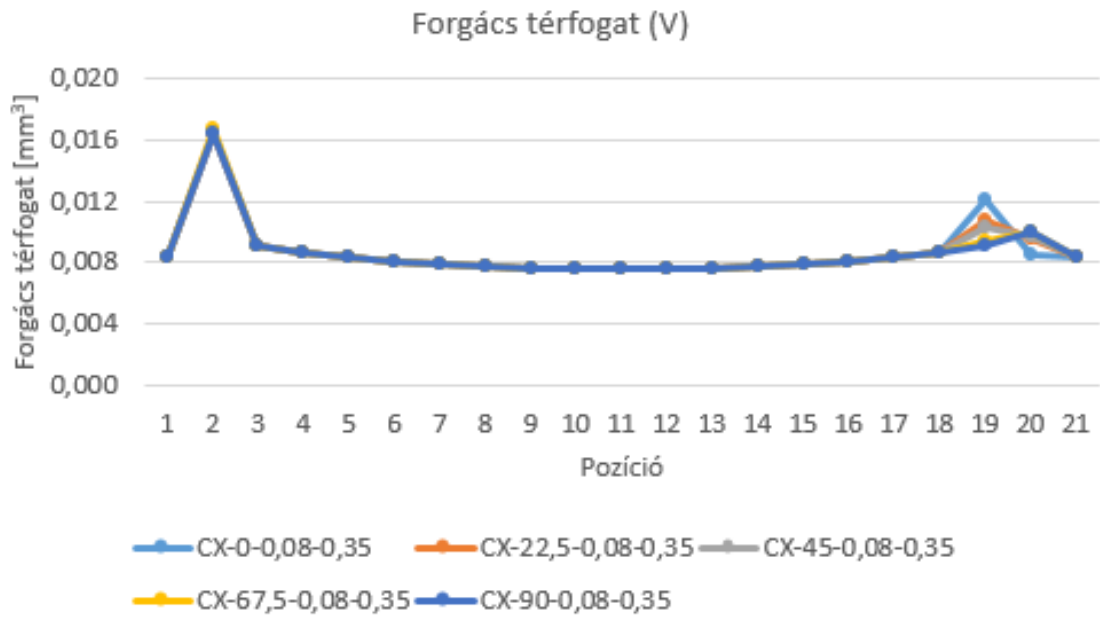
88. ábra: A forgácsolóerő szórása.....	95
89. ábra: Forgácsvastagság és forgácsolóerő (CV-CX; $f_z=0,08$ mm; $a_e=0,35$ mm)	96
90. ábra: Erőimpulzus egy szerszám pálya esetén.....	97
91. ábra: Erőimpulzus a felületen	97
92. ábra: Felületi profilhiba	98
93. ábra: Felületi profilhiba térkép (CV-CX; $f_z=0,08$ mm; $a_e=0,35$ mm).....	98

MELLÉKLET

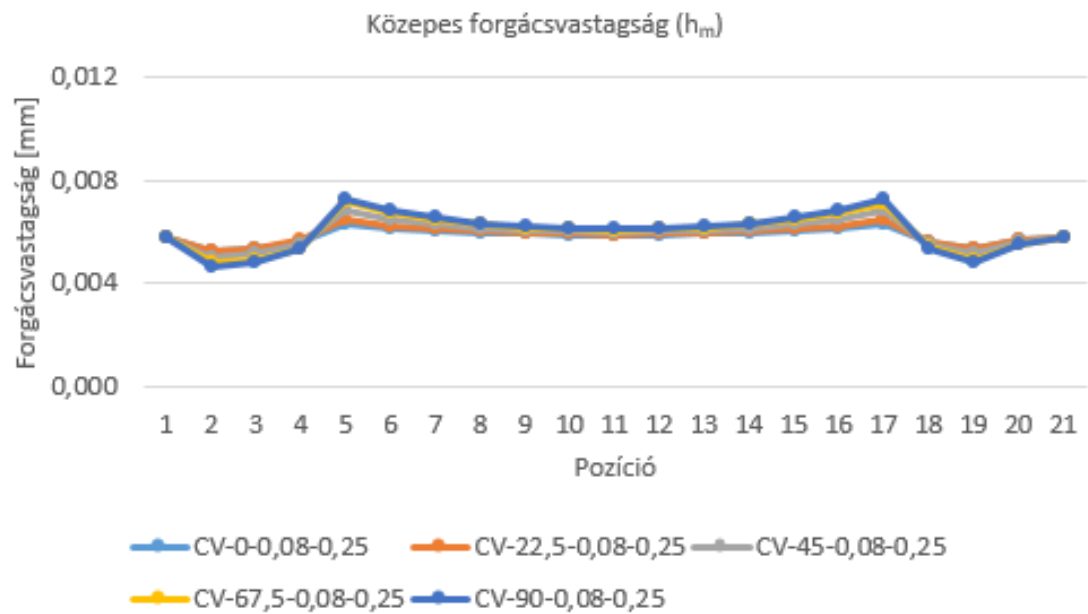
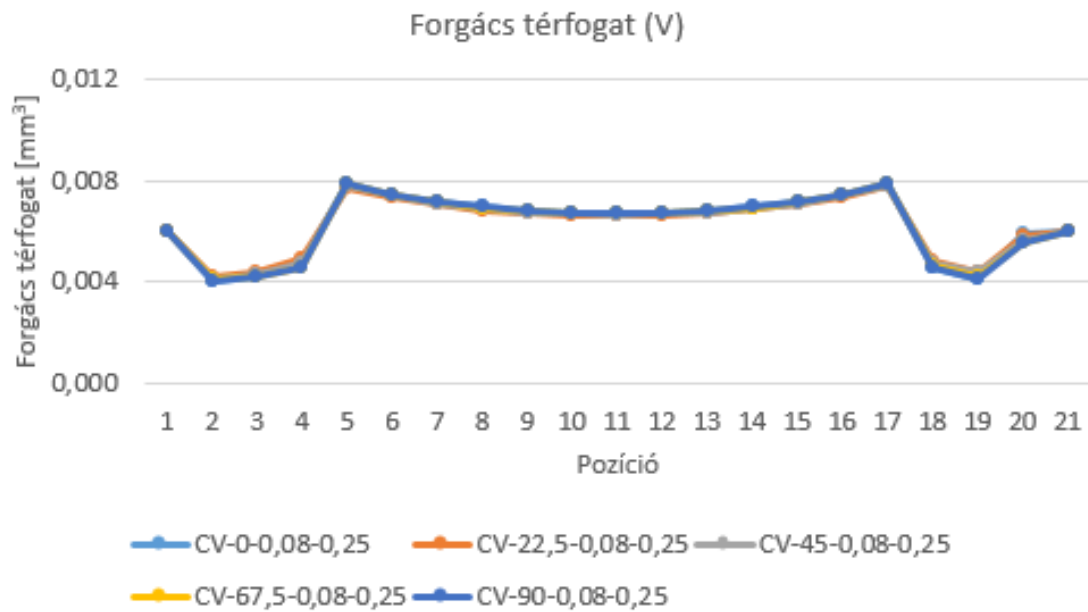
Forgácstérfogat és közepes forgácsvastagság változása a marási irány szerint a vizsgált mérési pozíciókban, a 4.2-es fejezetben ismertetett beállítások szerint

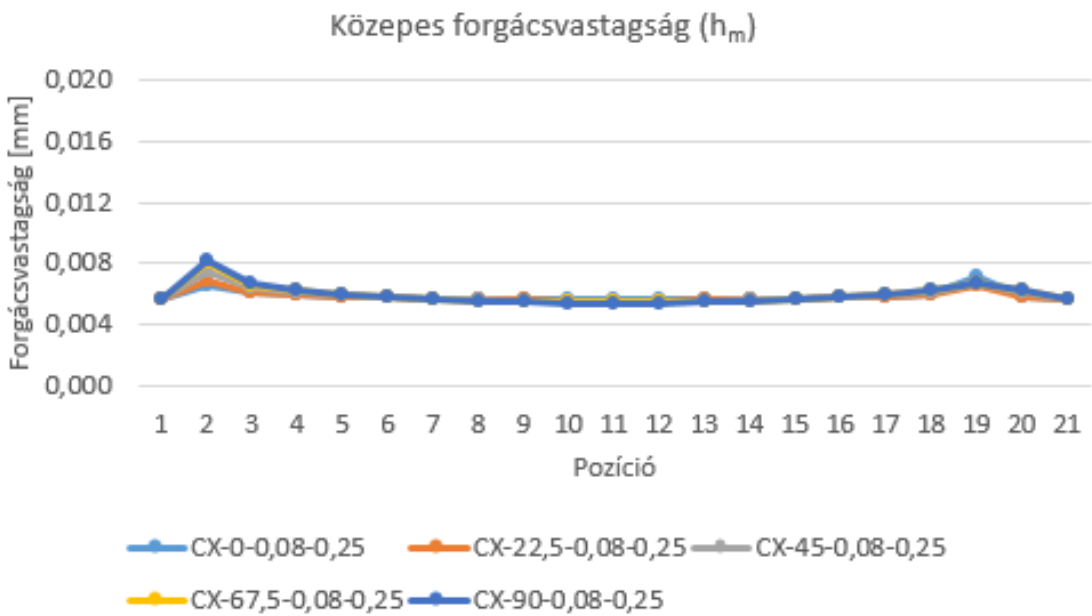
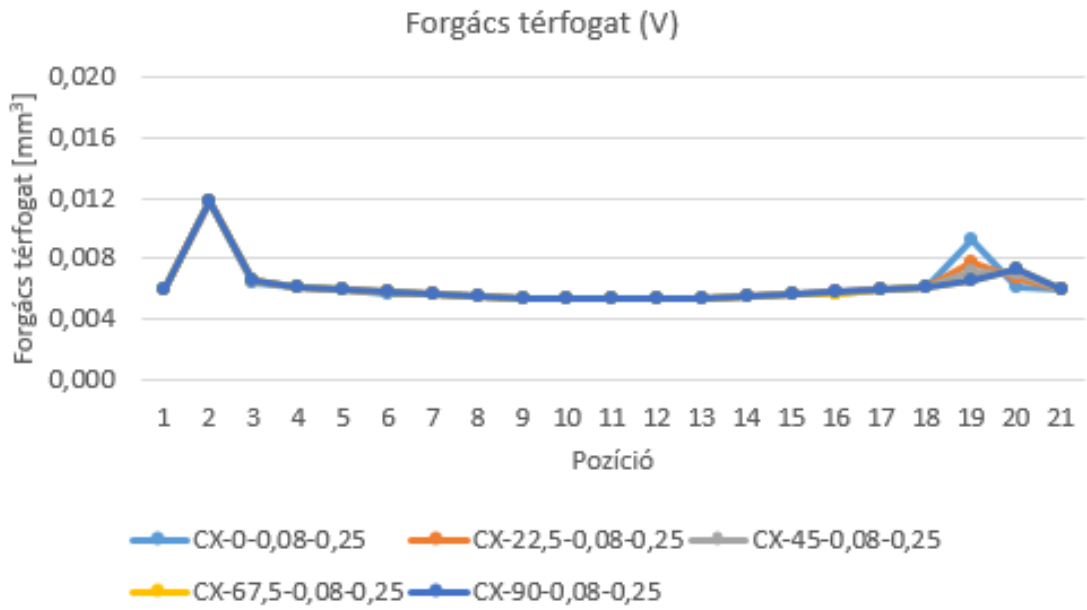
$f_z=0,08$ mm; $a_e=0,35$ mm



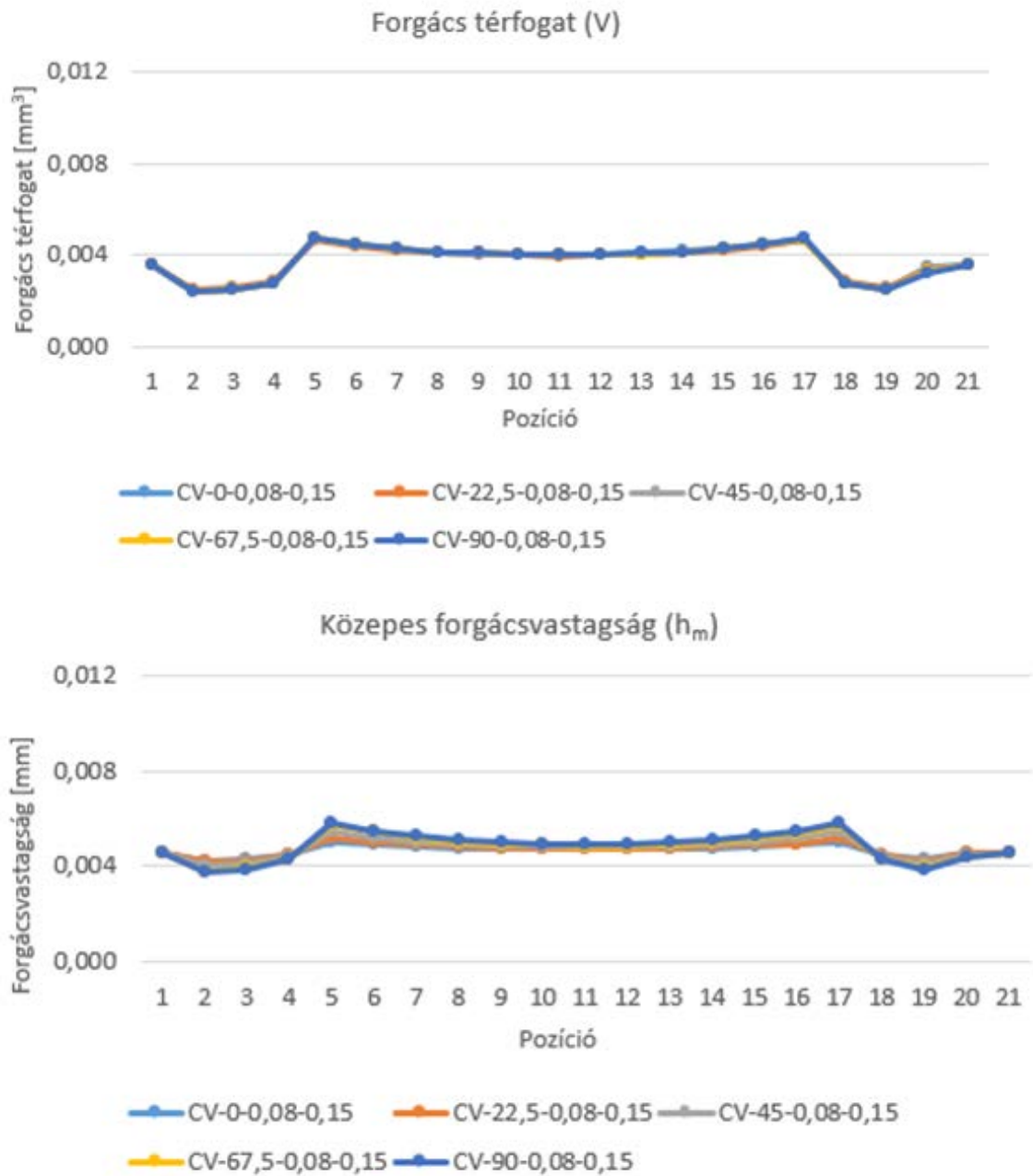


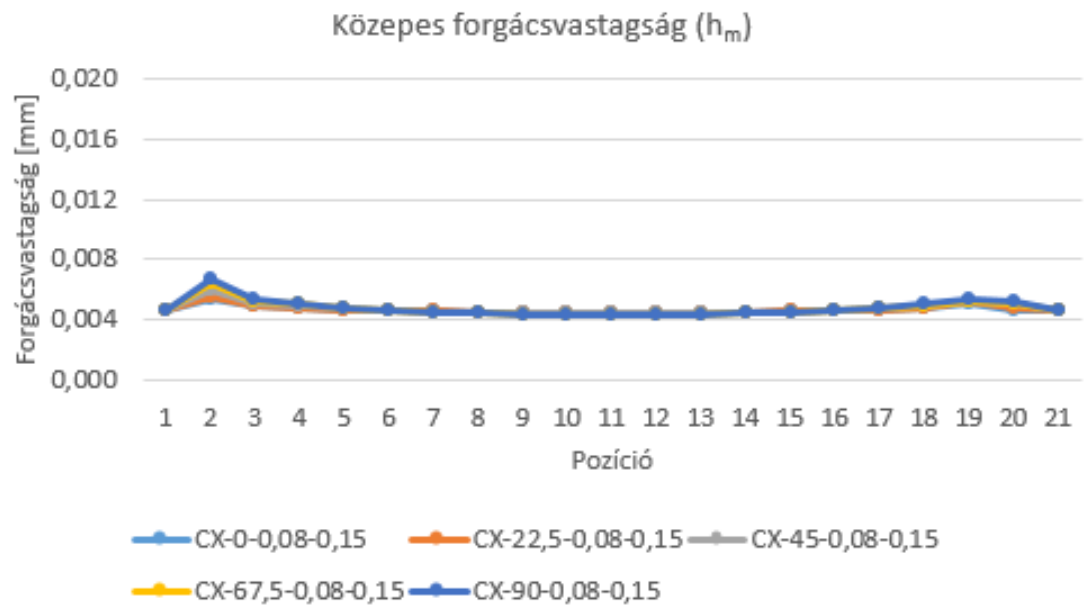
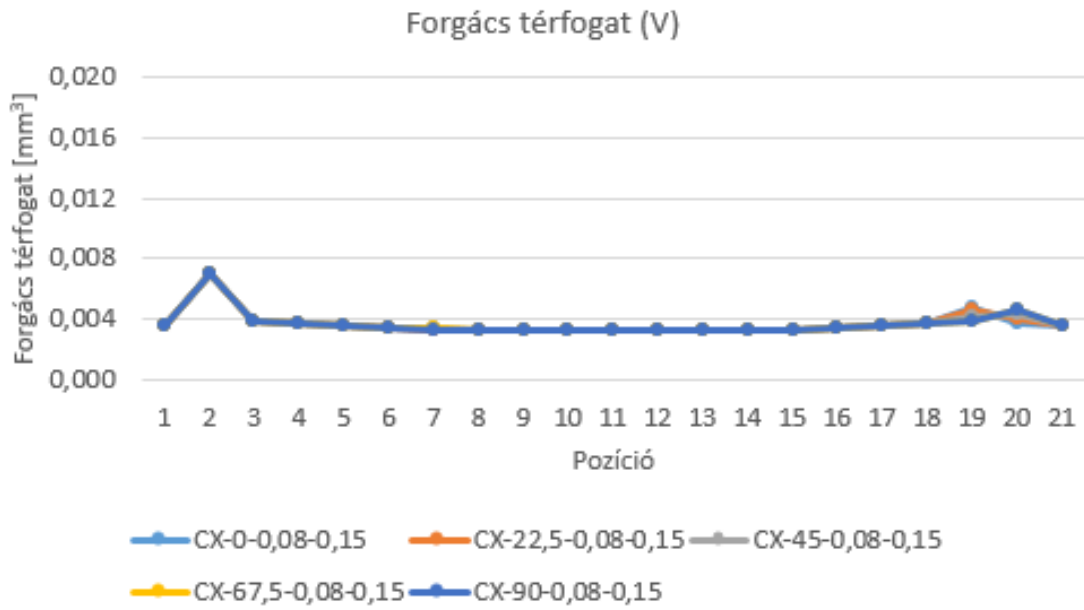
$f_z=0,08$ mm; $a_e=0,25$ mm



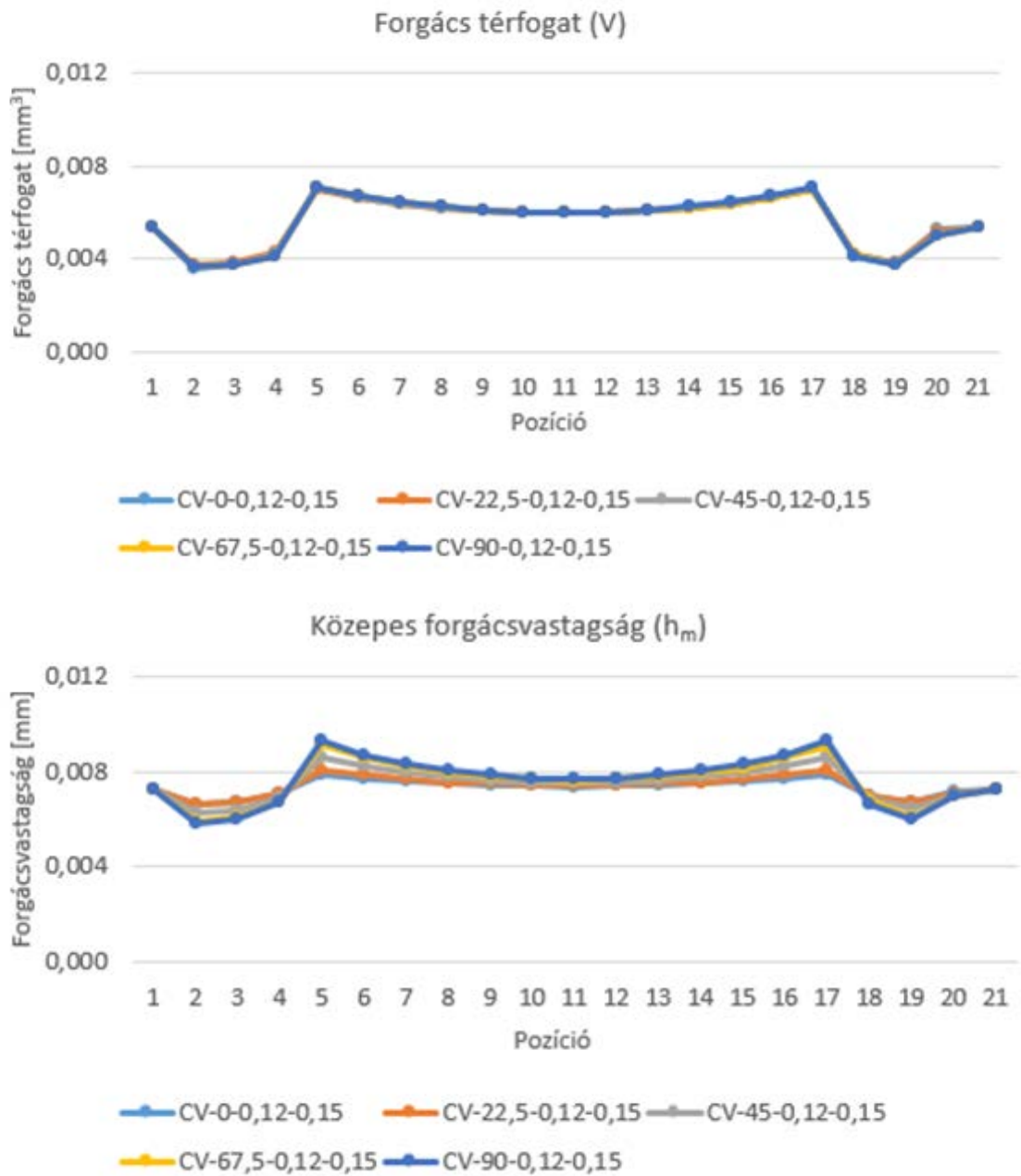


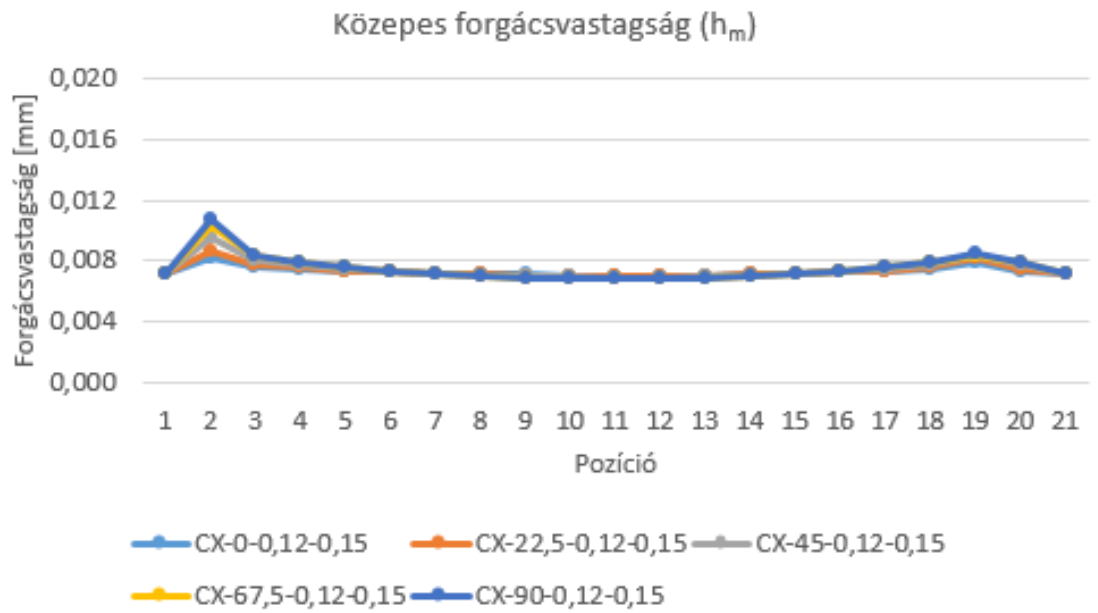
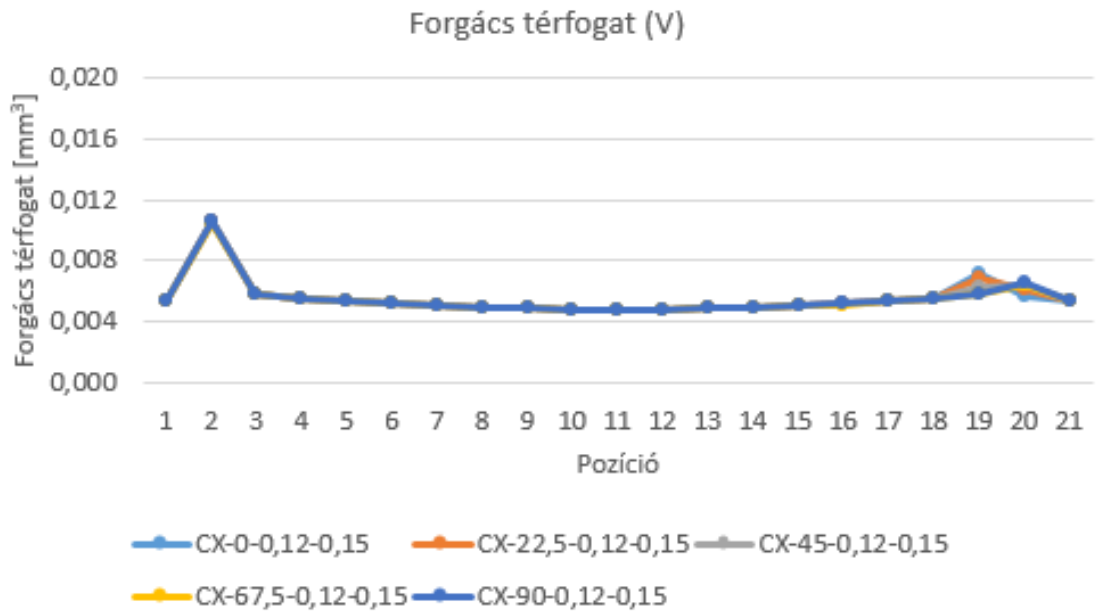
$f_z=0,08$ mm; $a_e=0,15$ mm



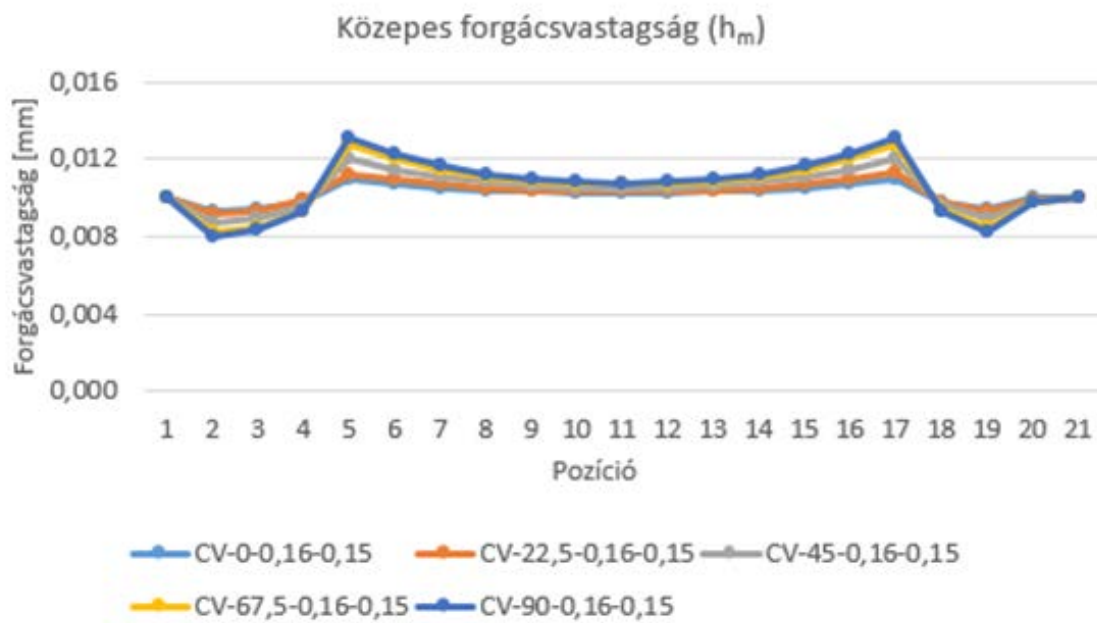
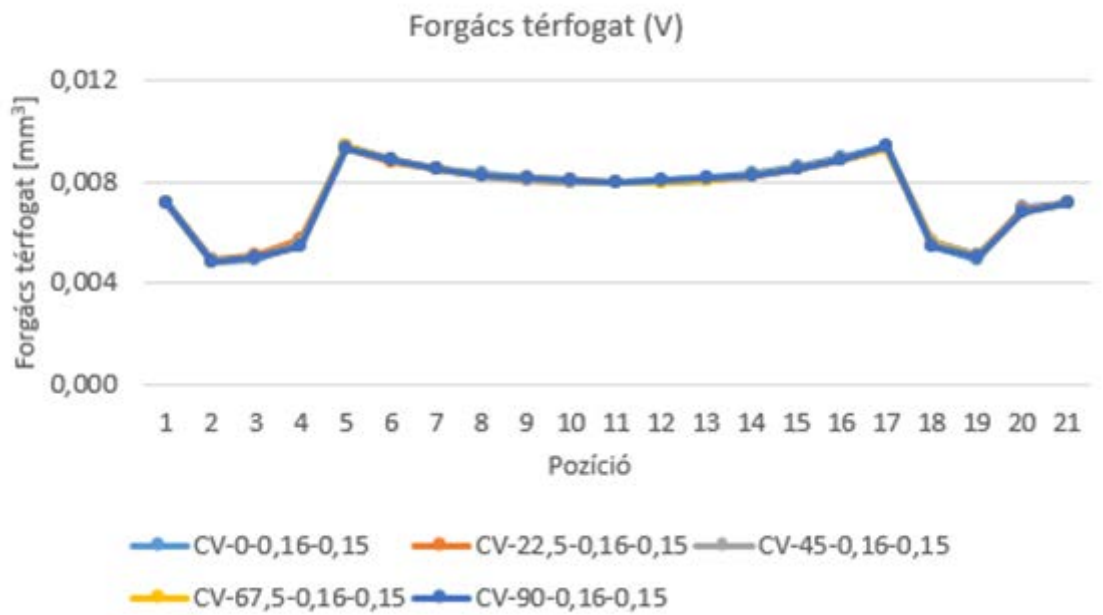


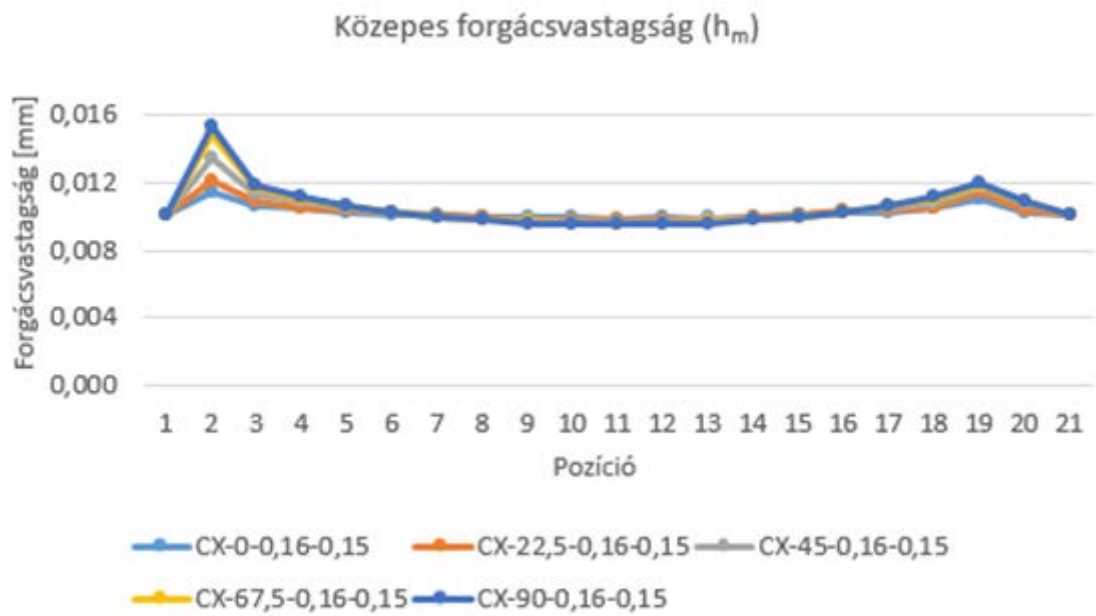
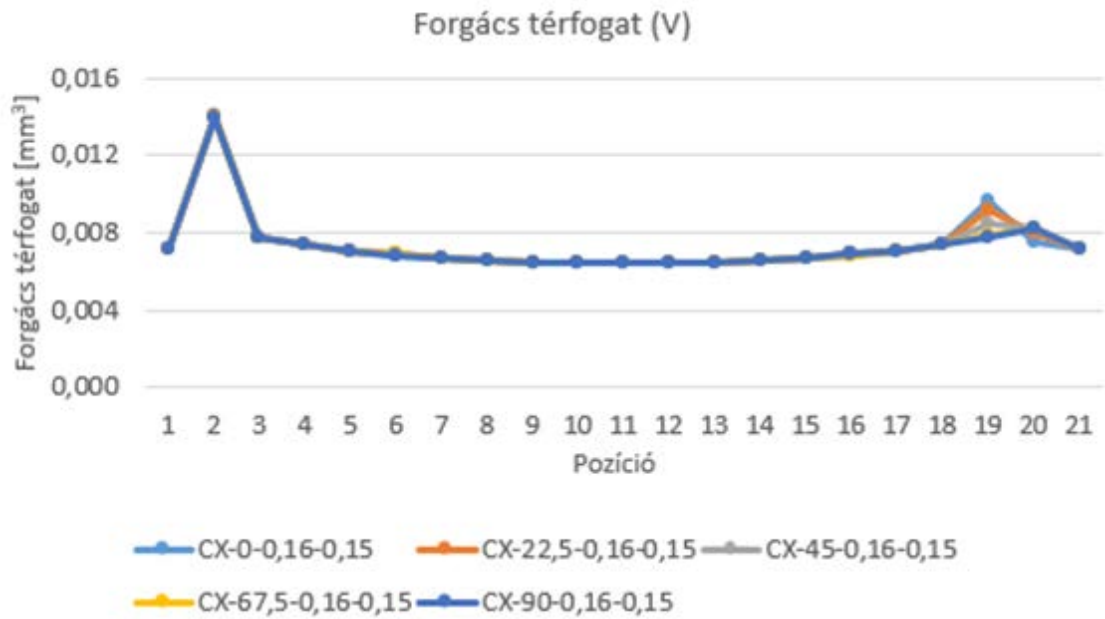
$f_z=0,12$ mm; $a_e=0,15$ mm



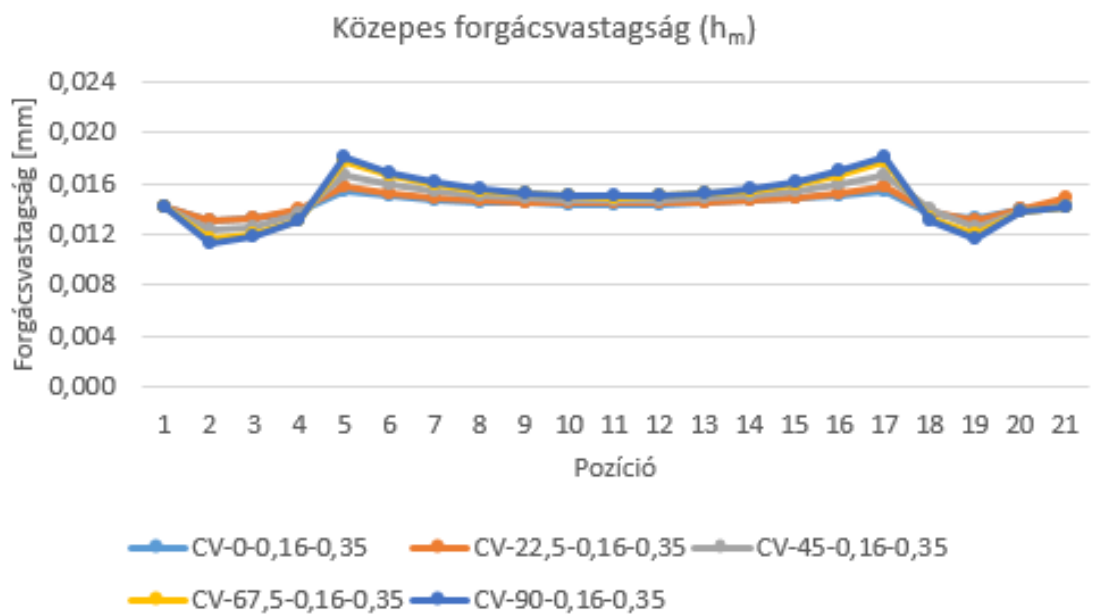
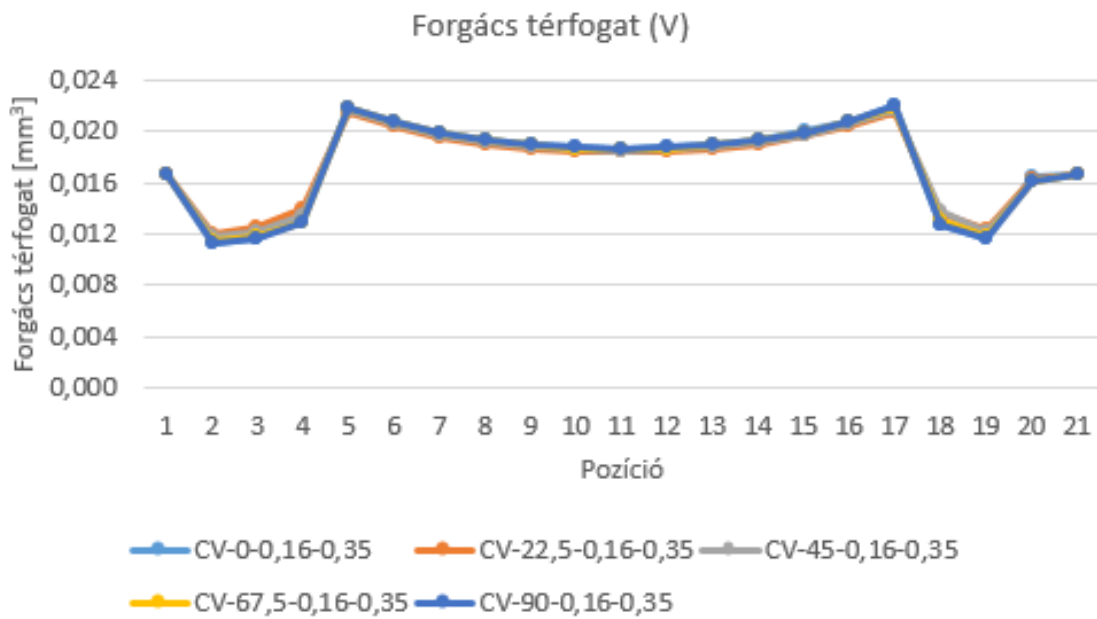


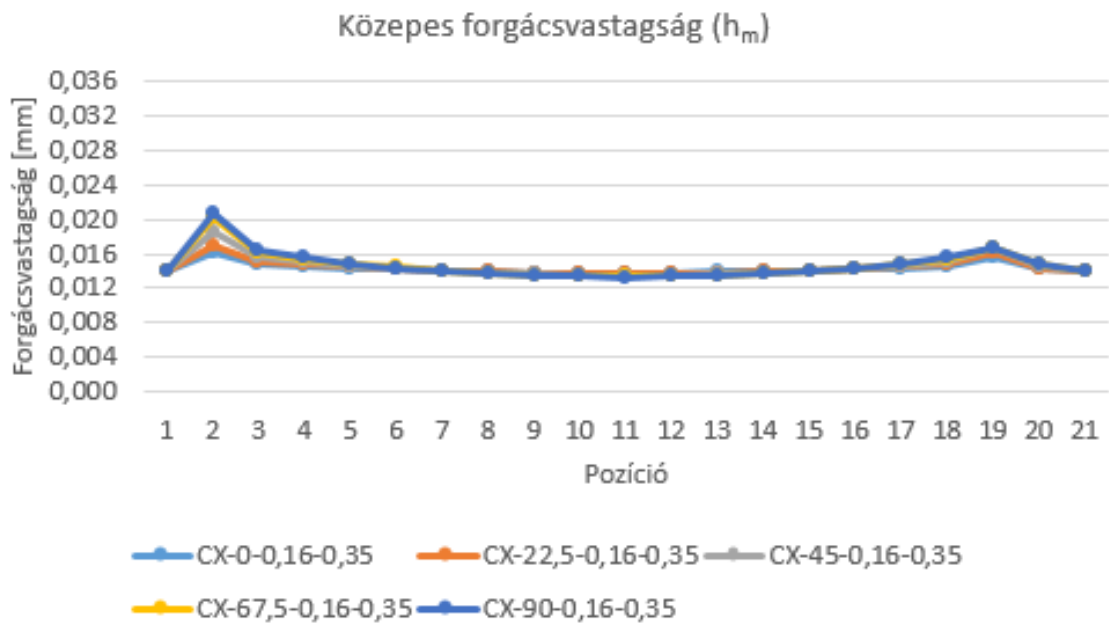
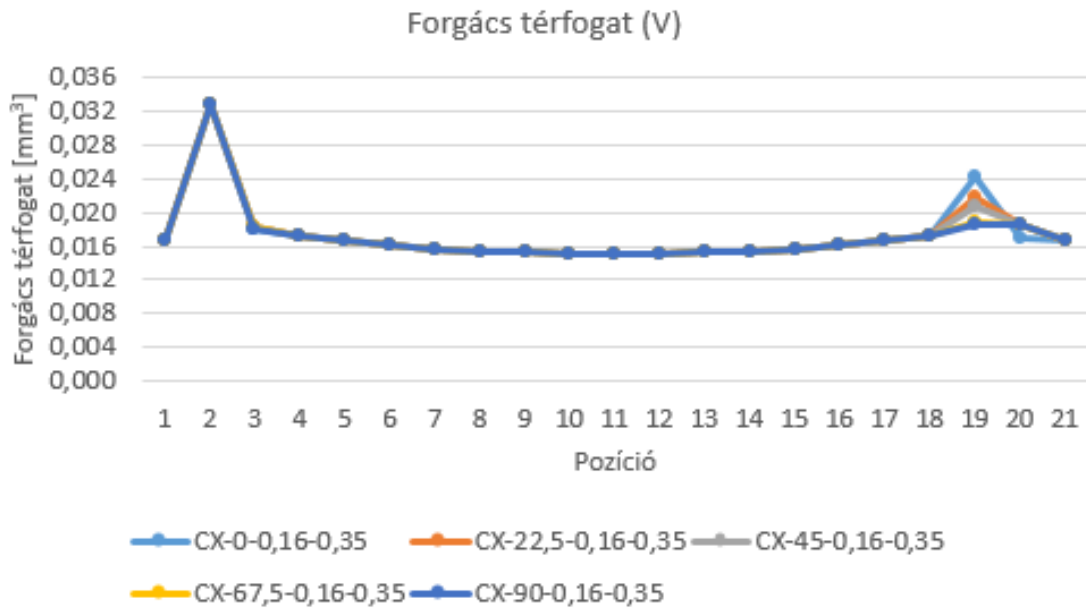
$f_z=0,16$ mm; $a_e=0,15$ mm



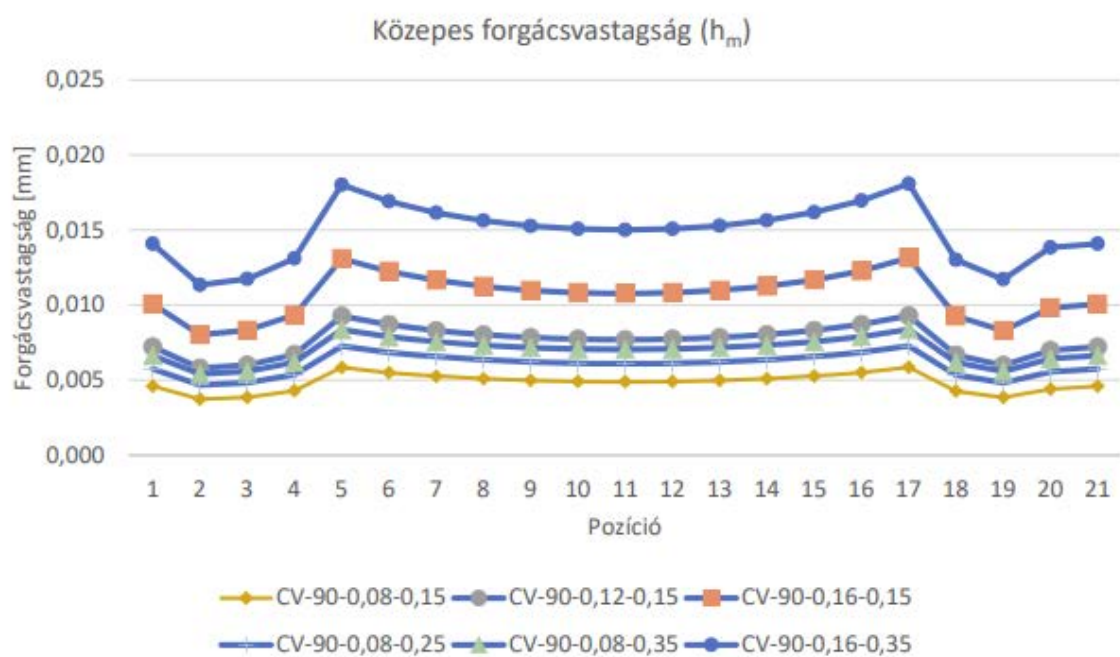
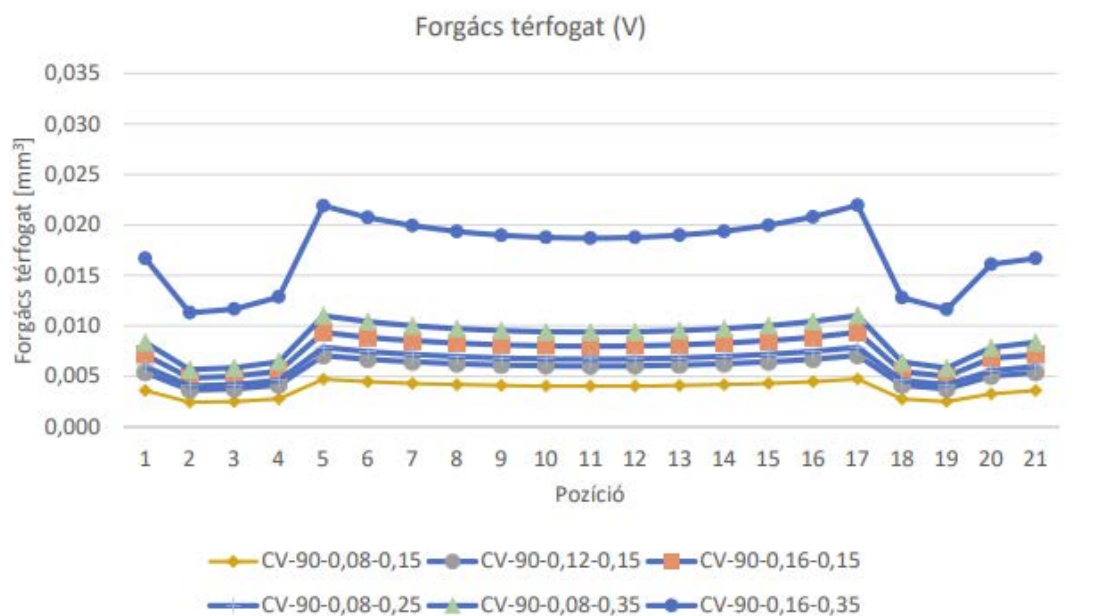


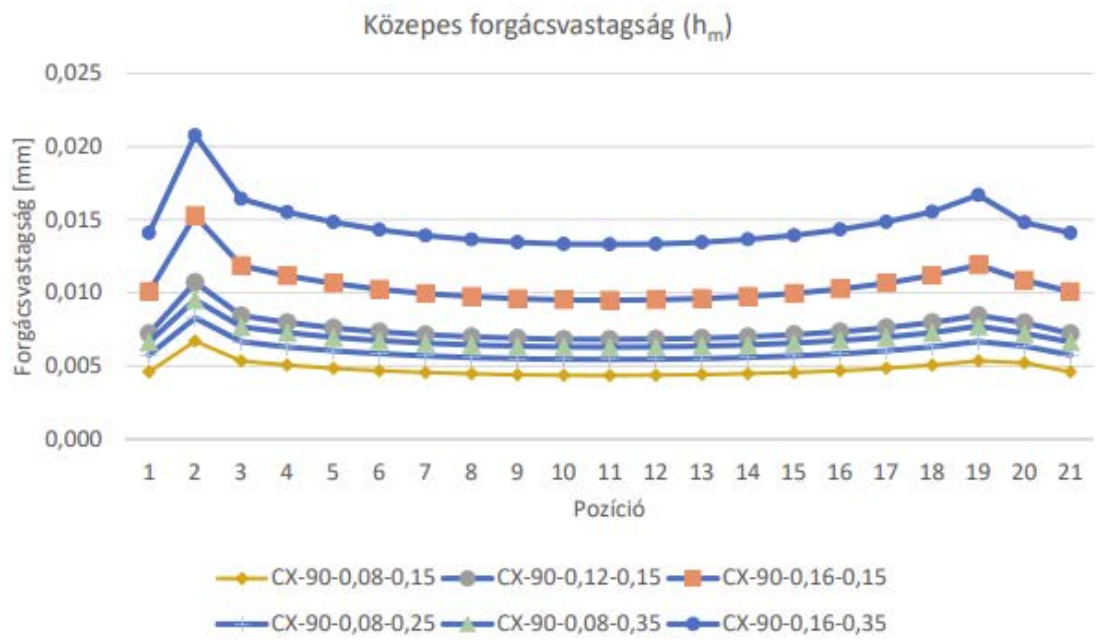
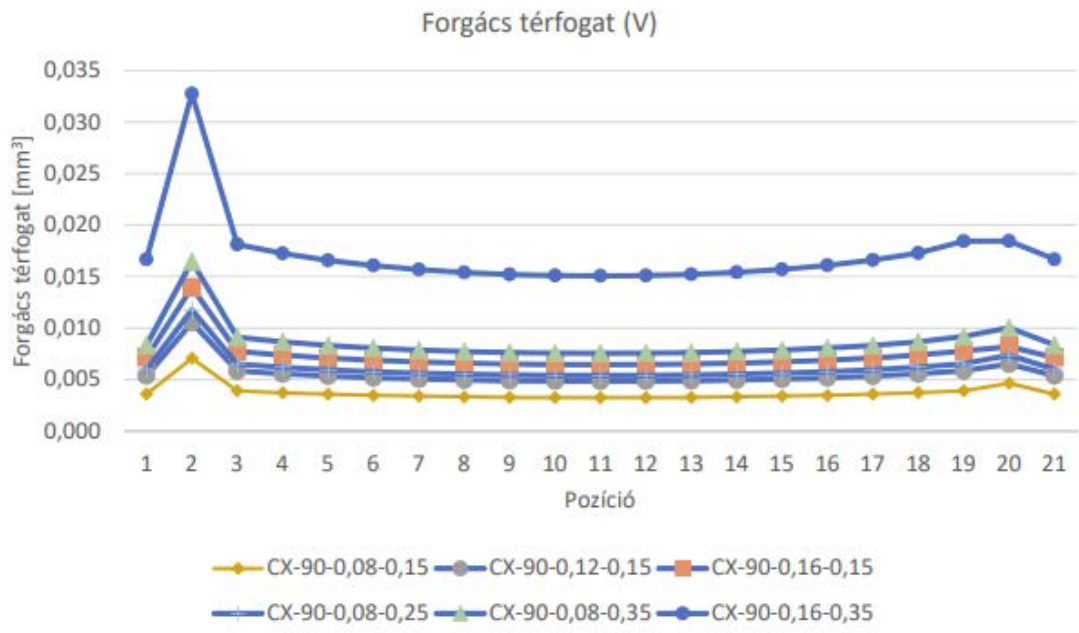
$f_z=0,16\text{mm}$; $a_e=0,35\text{ mm}$



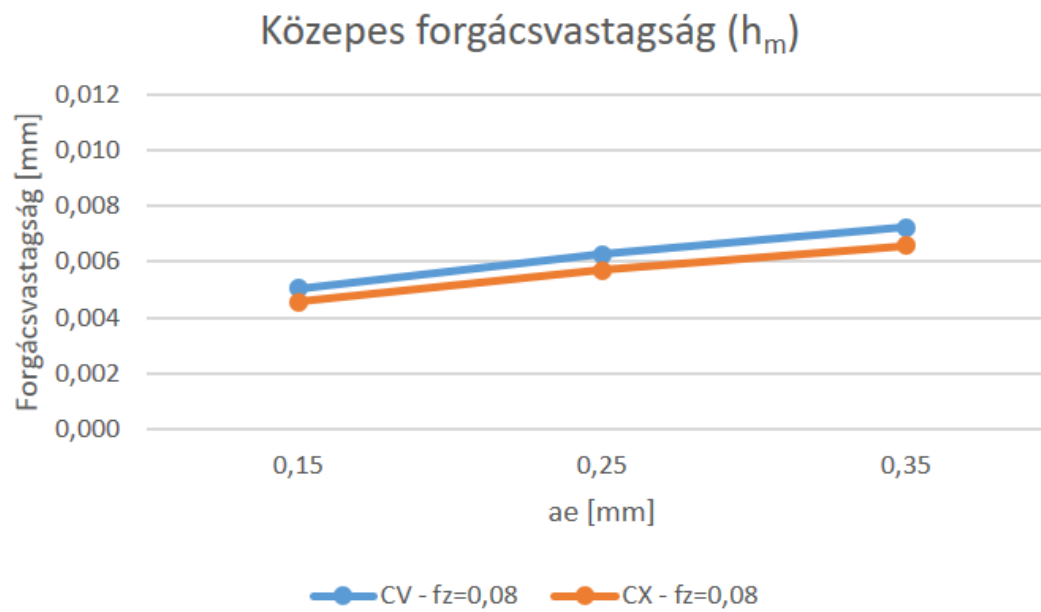
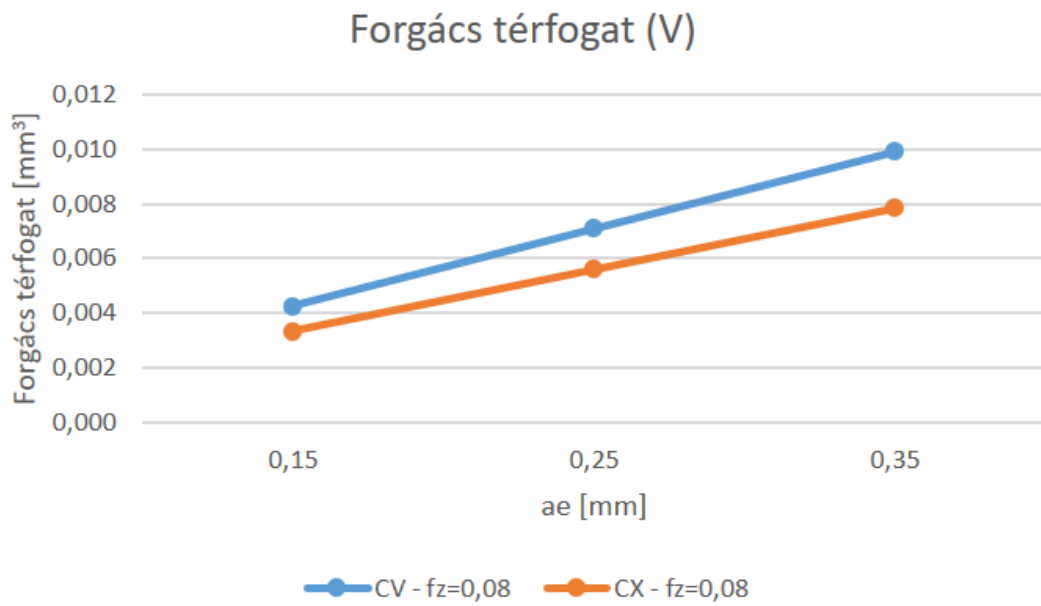


Forgácstérfogat és közepes forgácsvastagság változása a marási paraméterek függvényében 90°-os marási irány esetén, a 4.2-es fejezetben ismertetett beállítások szerint

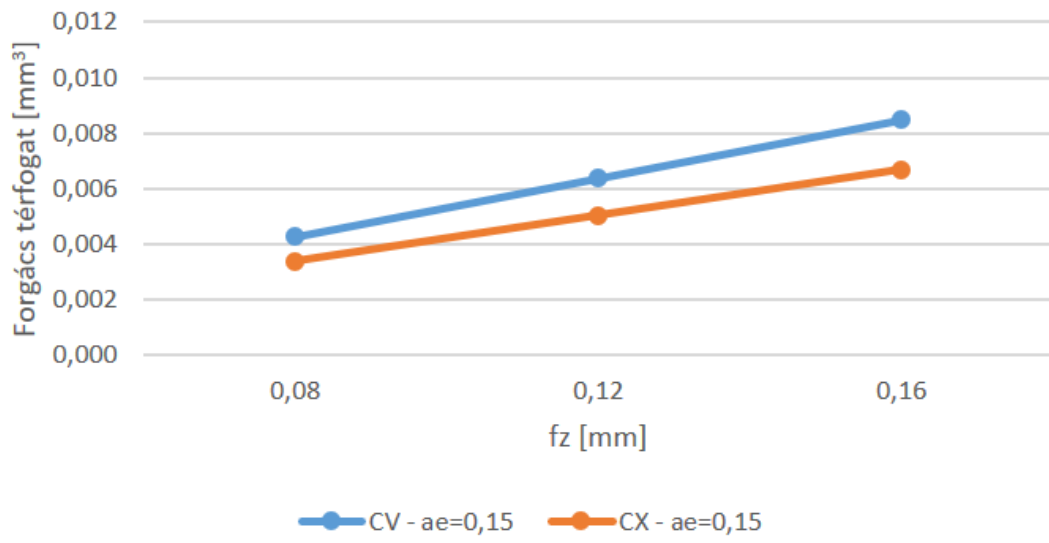




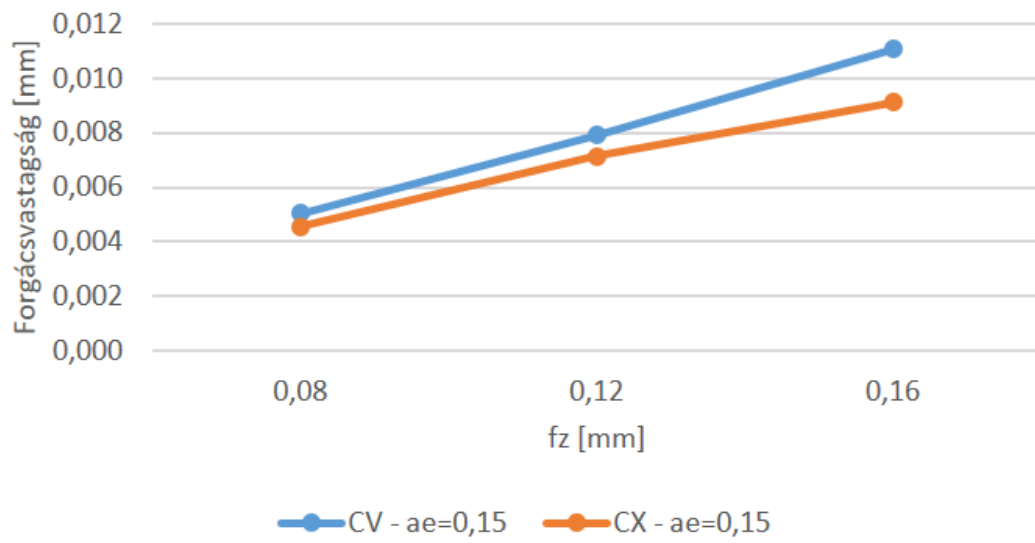
Átlagértékek az íves (R45) szakaszon a 4.2 fejezetben ismertetett beállítások szerint



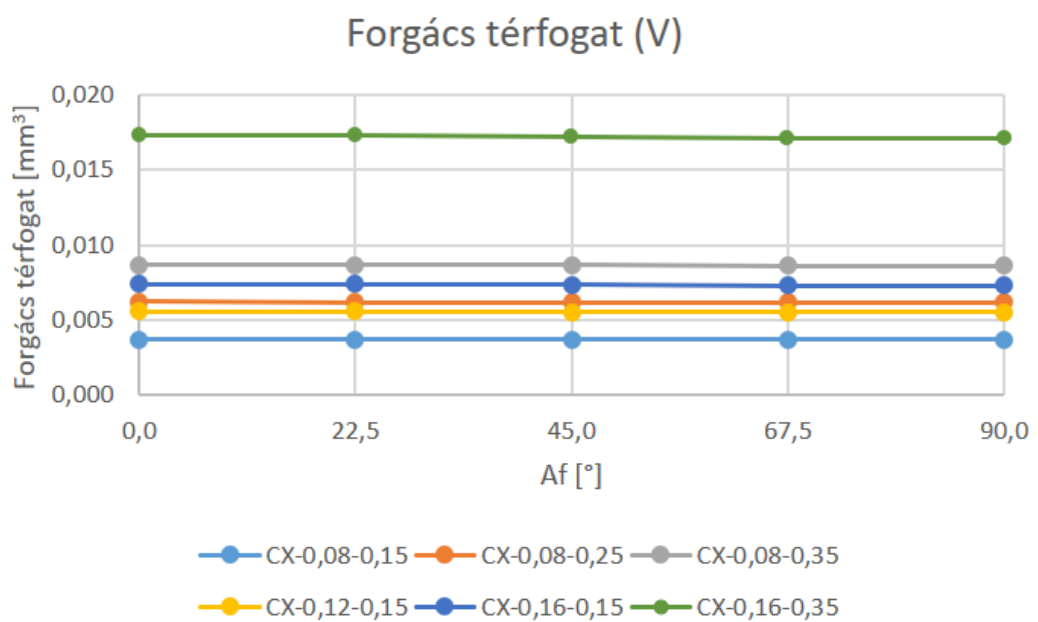
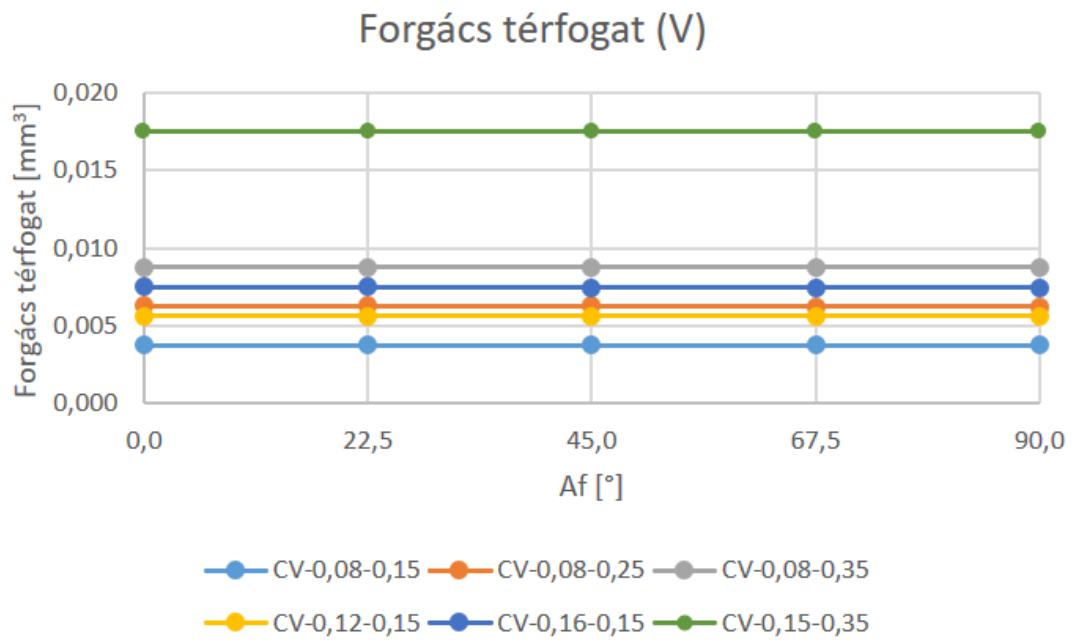
Forgács térfogat (V)



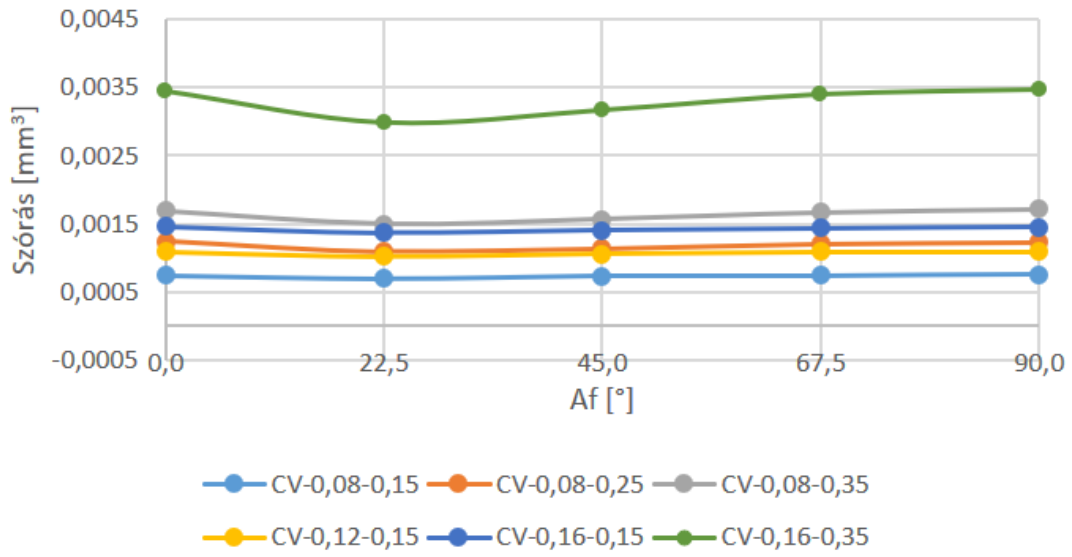
Közepes forgácsvastagság



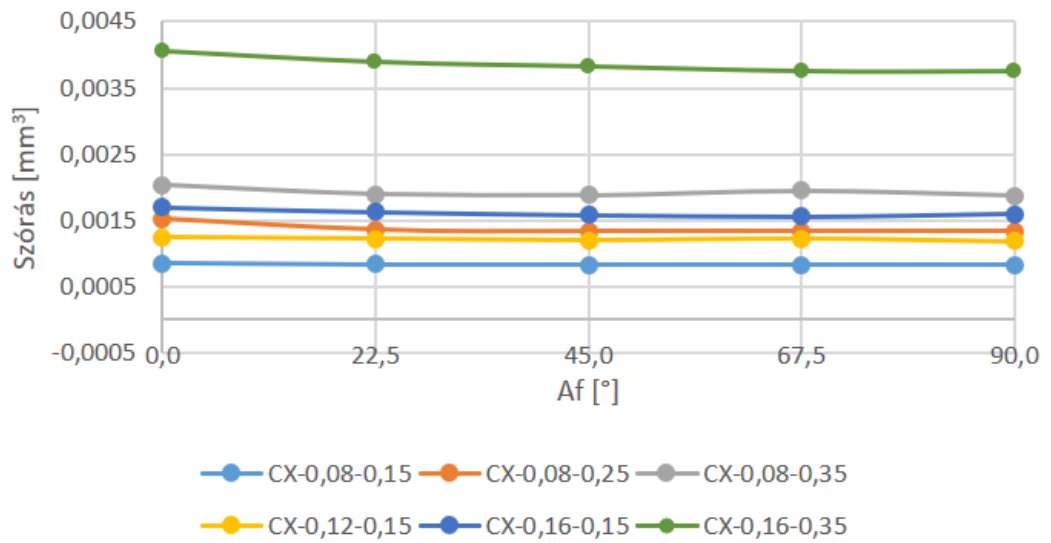
A forgácstérfogat átlaga és szórása a marási irány szerint a 4.2 fejezetben ismertetett beállítások szerint



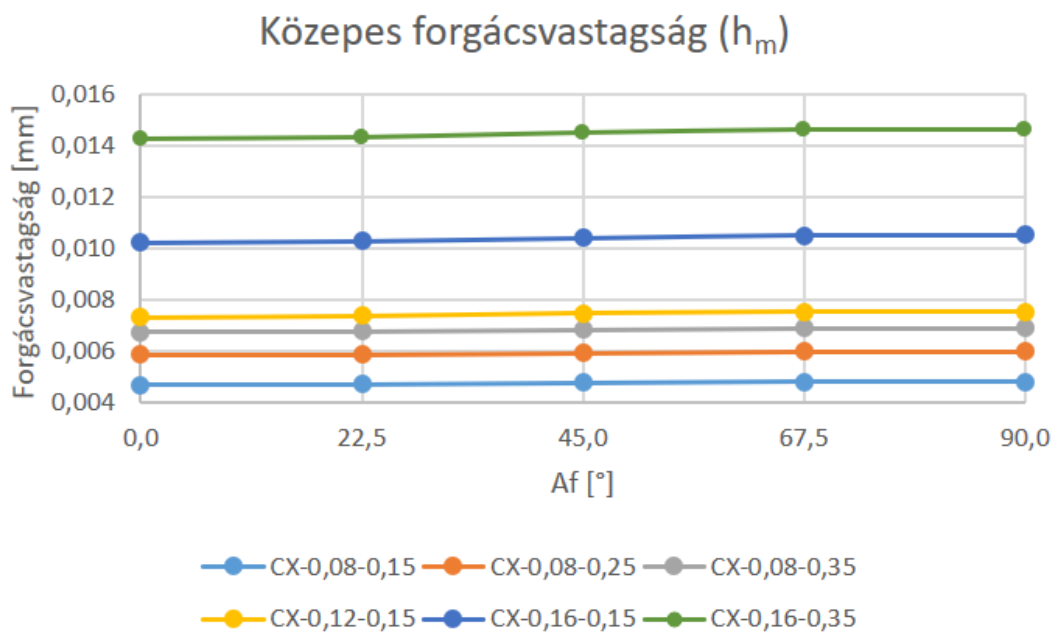
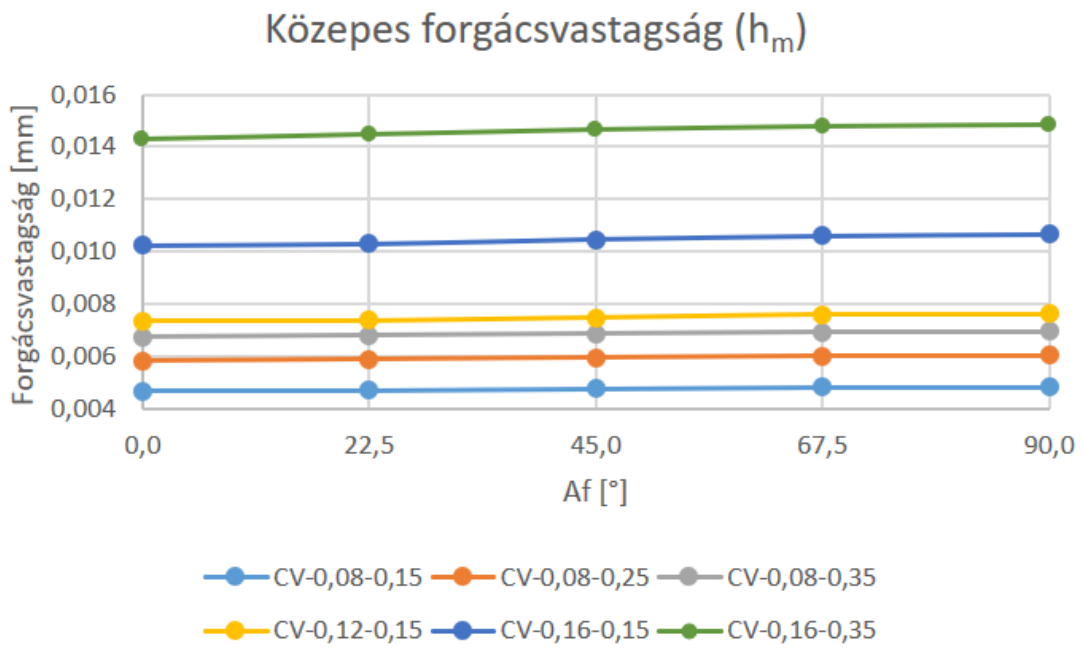
Forgács térfogat szórása (sV)



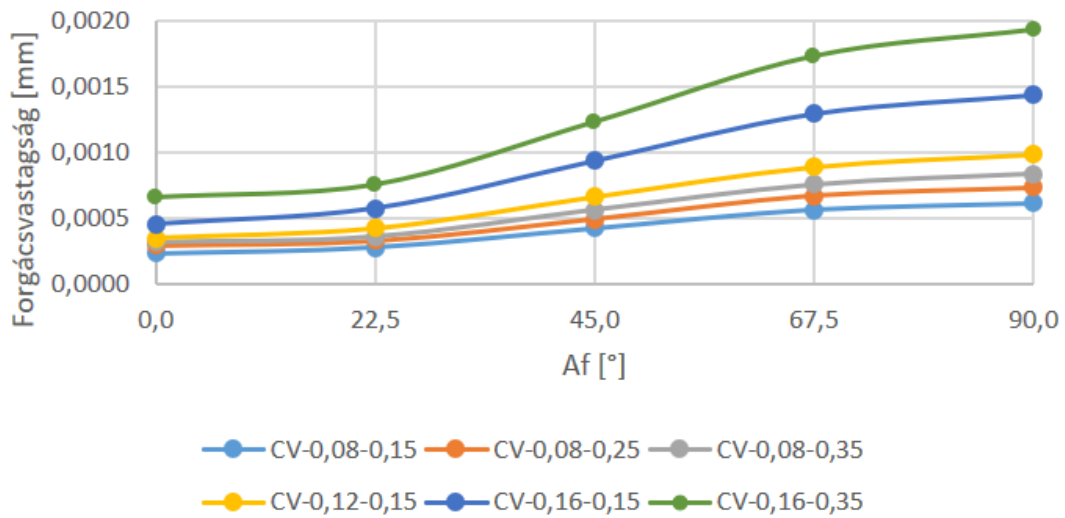
Forgács térfogat szórása (sV)



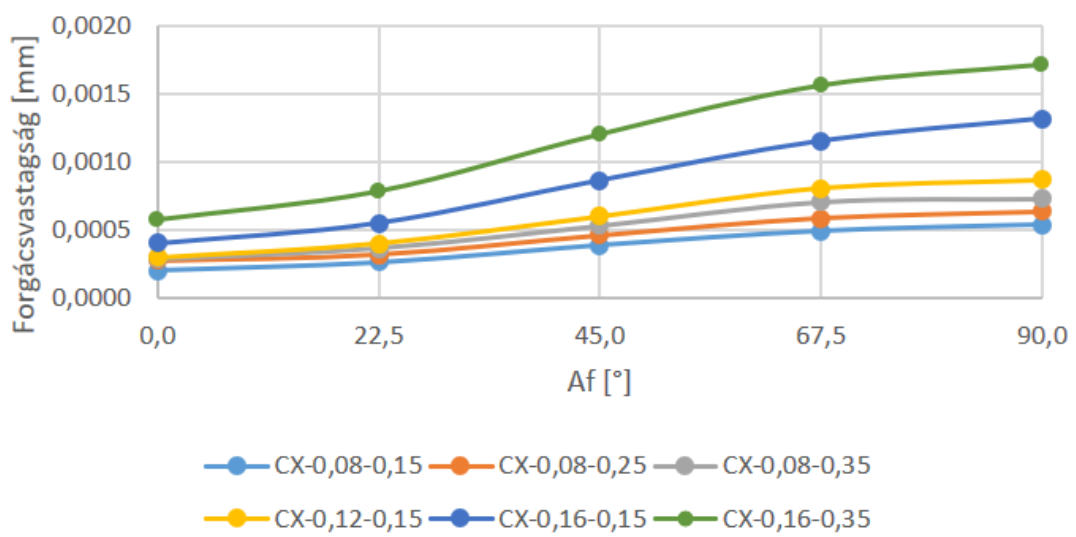
Közepes forgácsvastagság átlaga és szórása a marási irány szerint a 4.2-es fejezetben ismertetett beállítások szerint



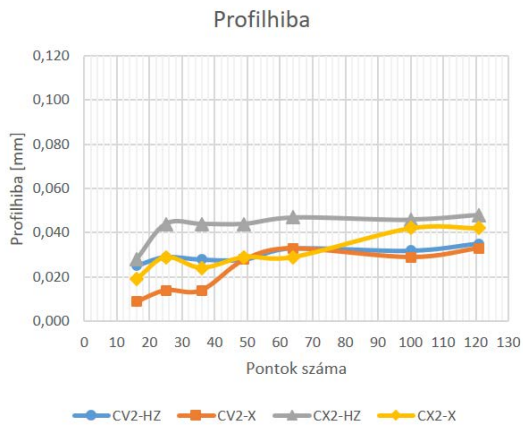
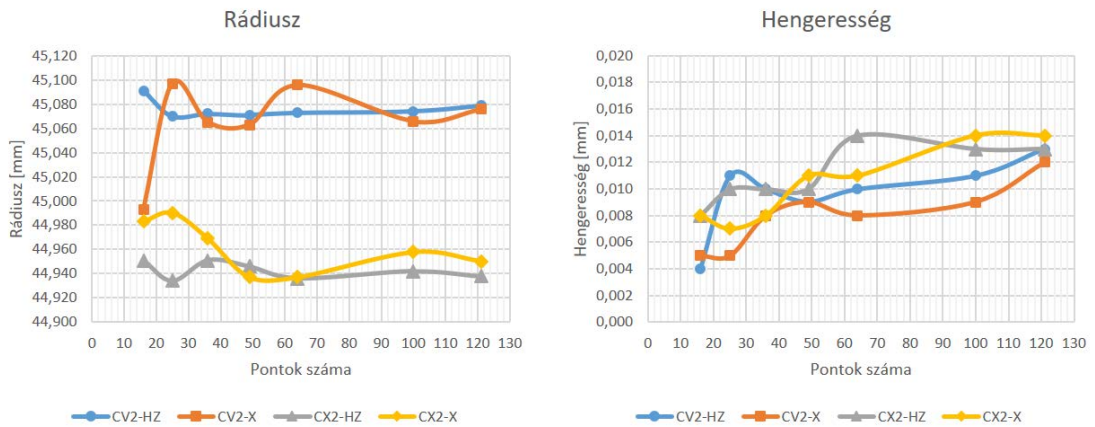
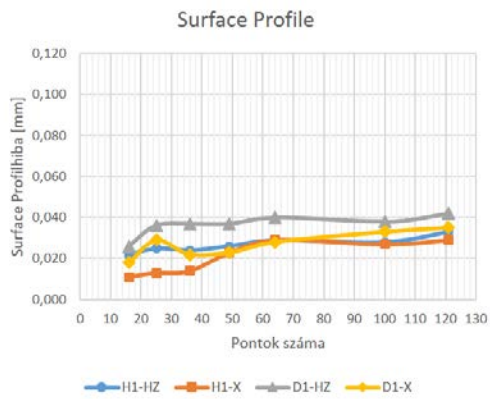
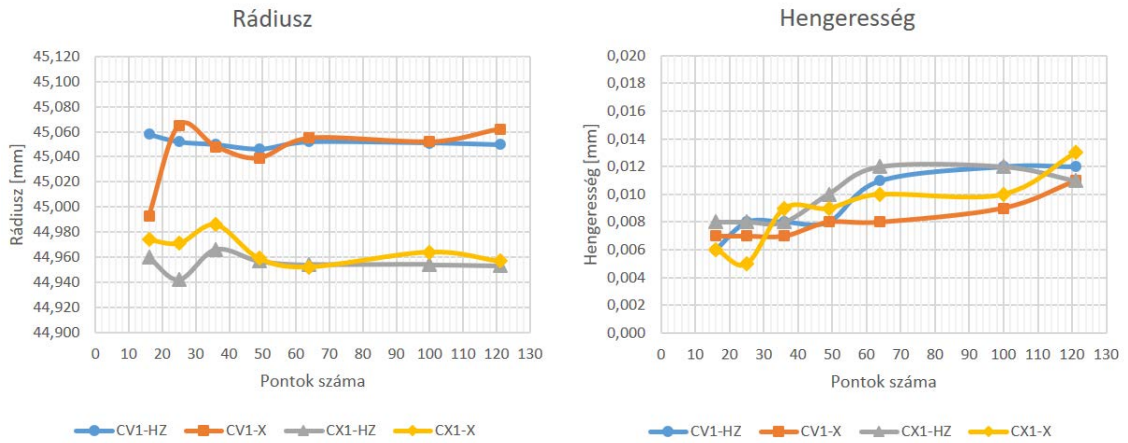
Közepes forgácsvastagság szórása (sh_{av})

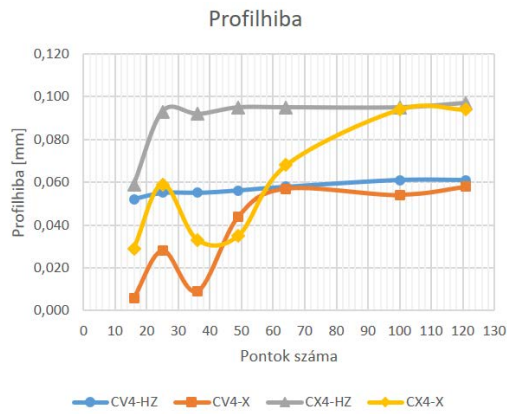
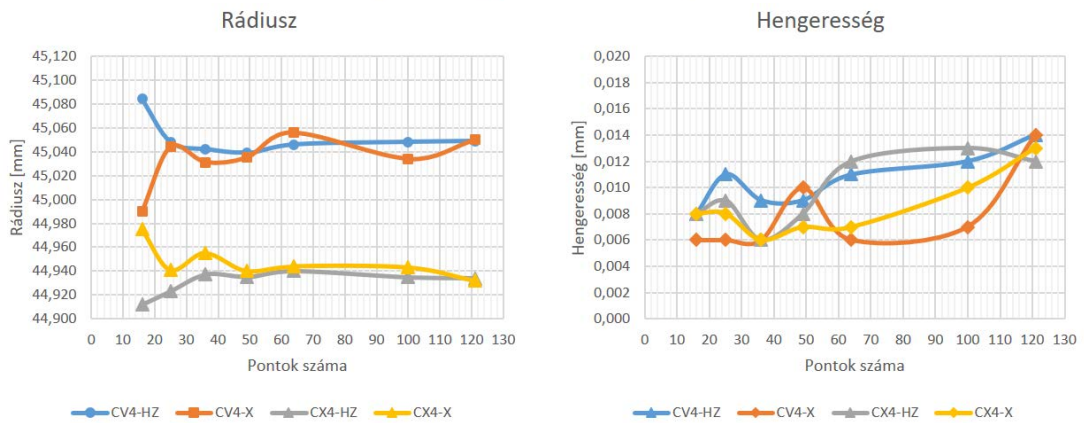
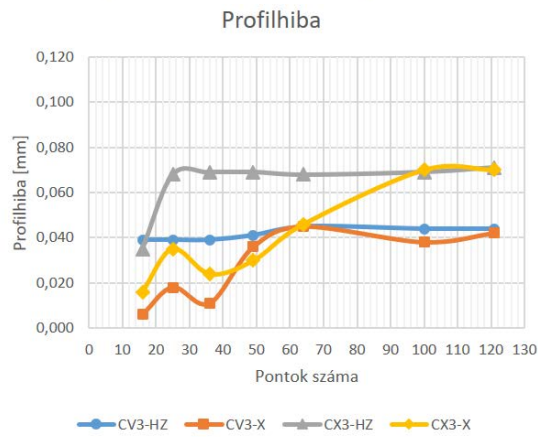
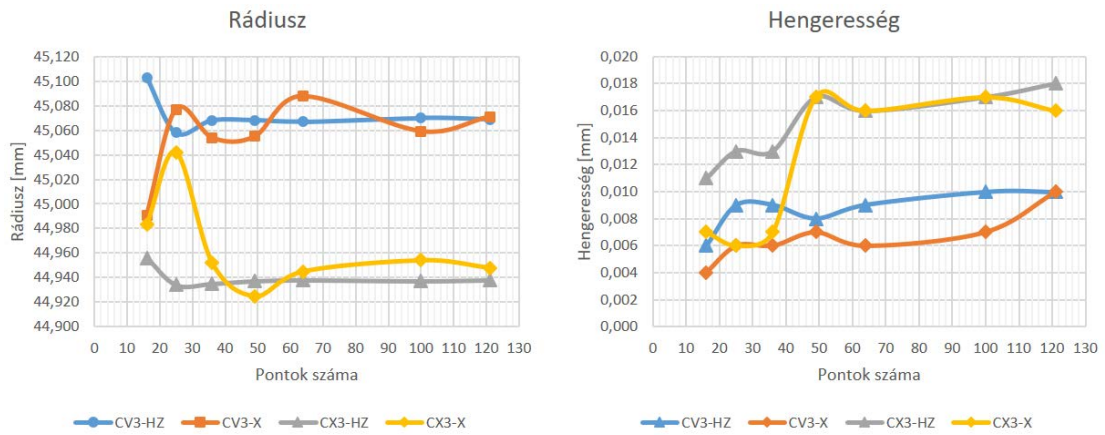


Közepes forgácsvastagság szórása (sh_{av})



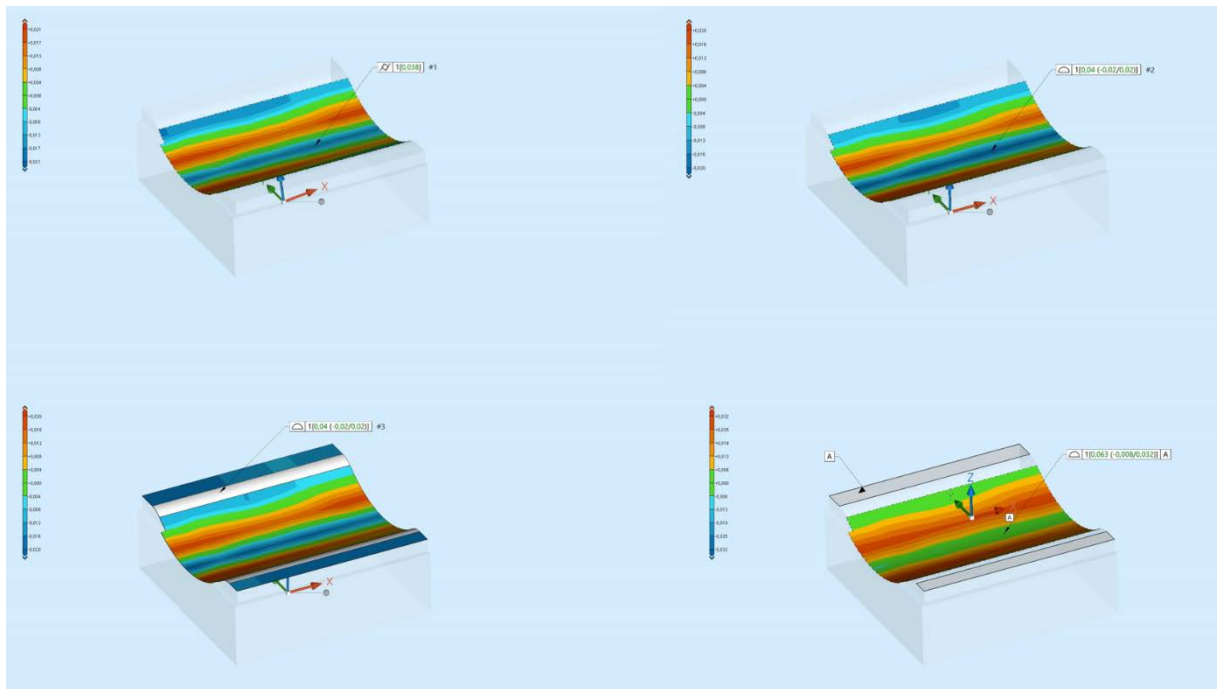
A mért méret- és geometriai adatok az 5.2-es fejezetben ismertetett beállítások szerint



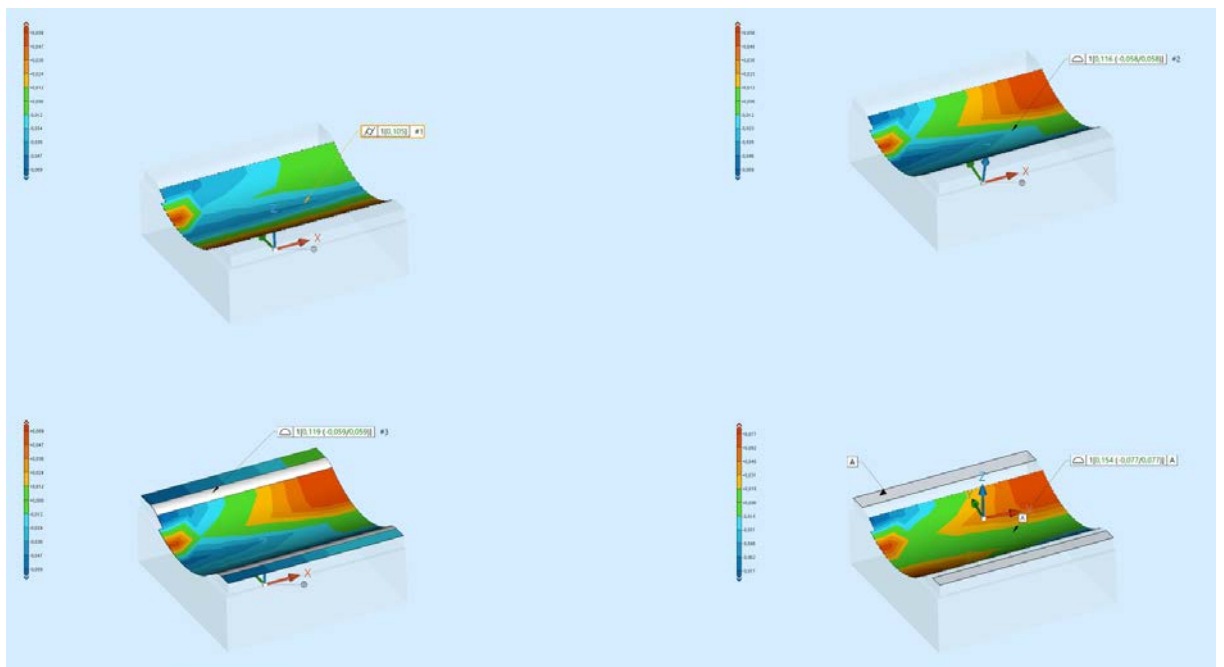


Alakpontosság és szintérképes felületi eltérések a 6.2-es fejezetben ismertetett beállítások szerint

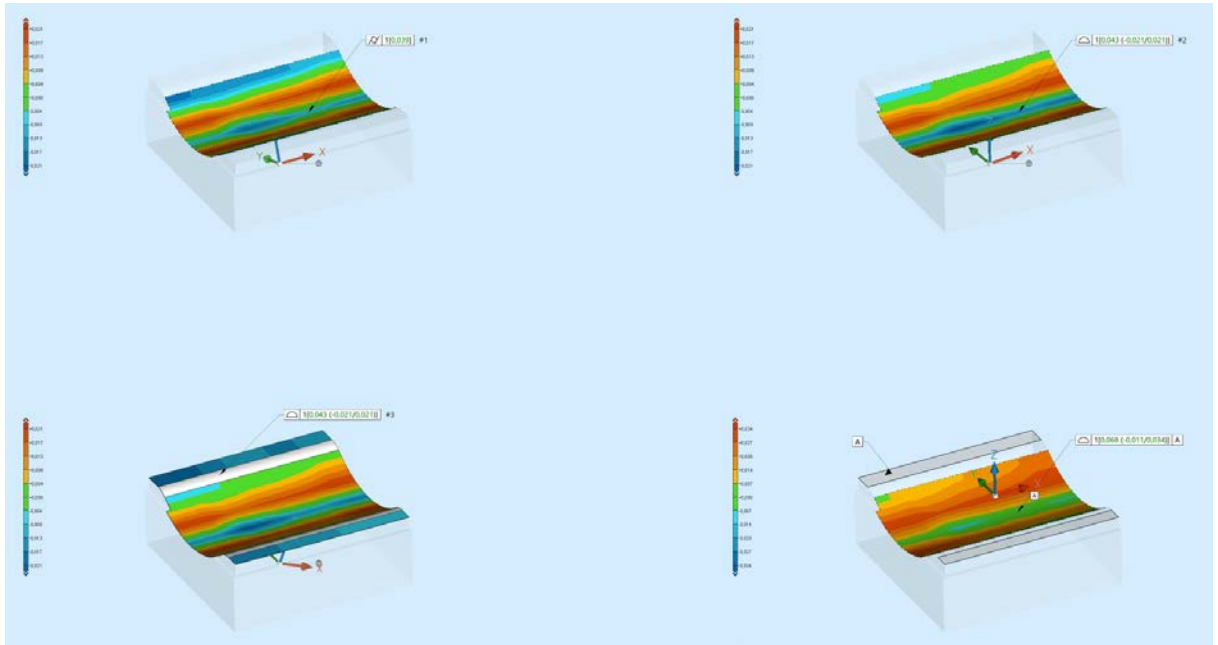
CV-1



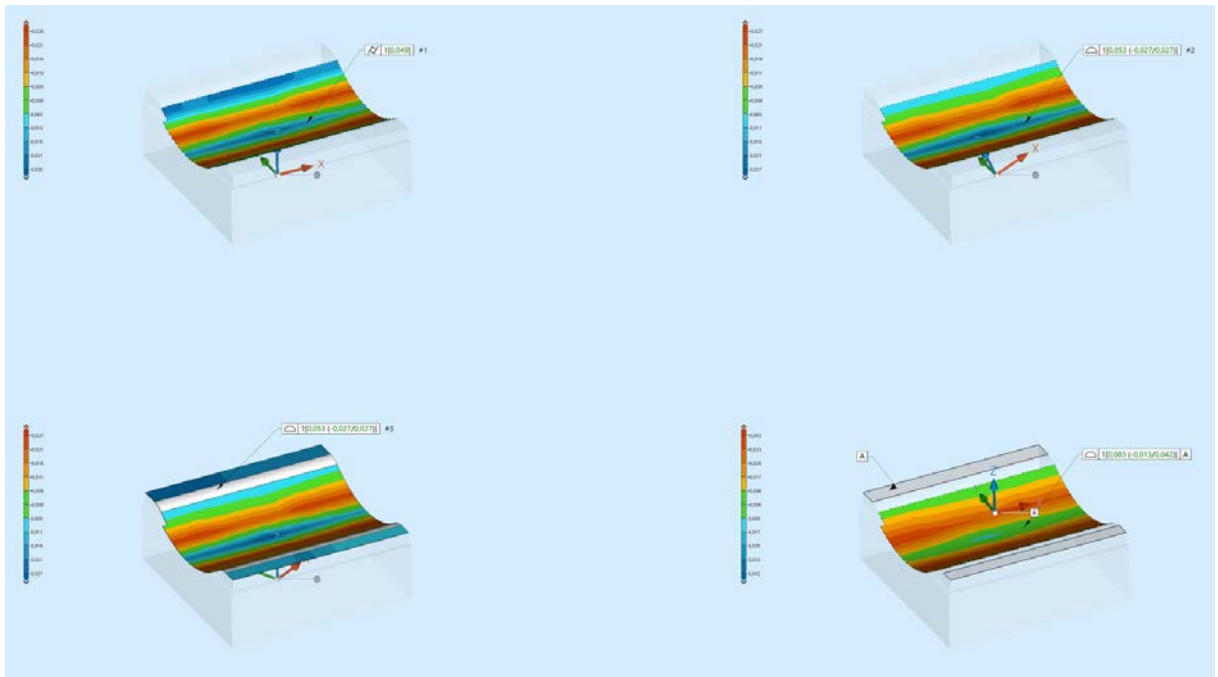
CV-2



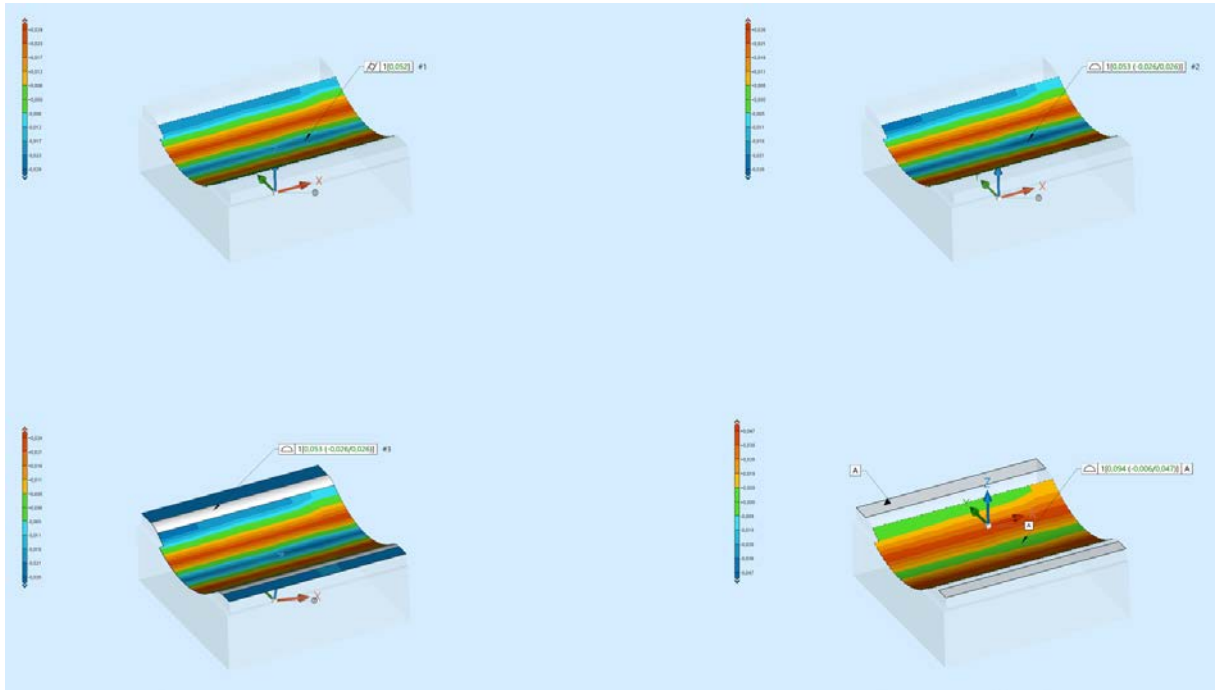
CV-3



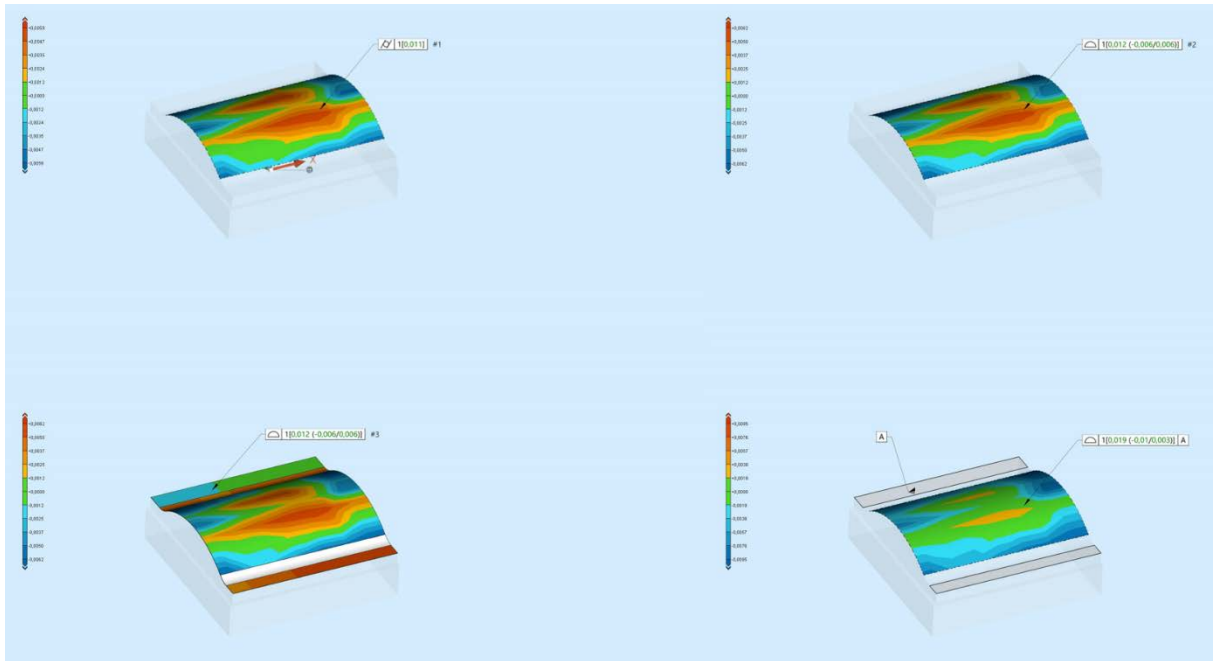
CV-4



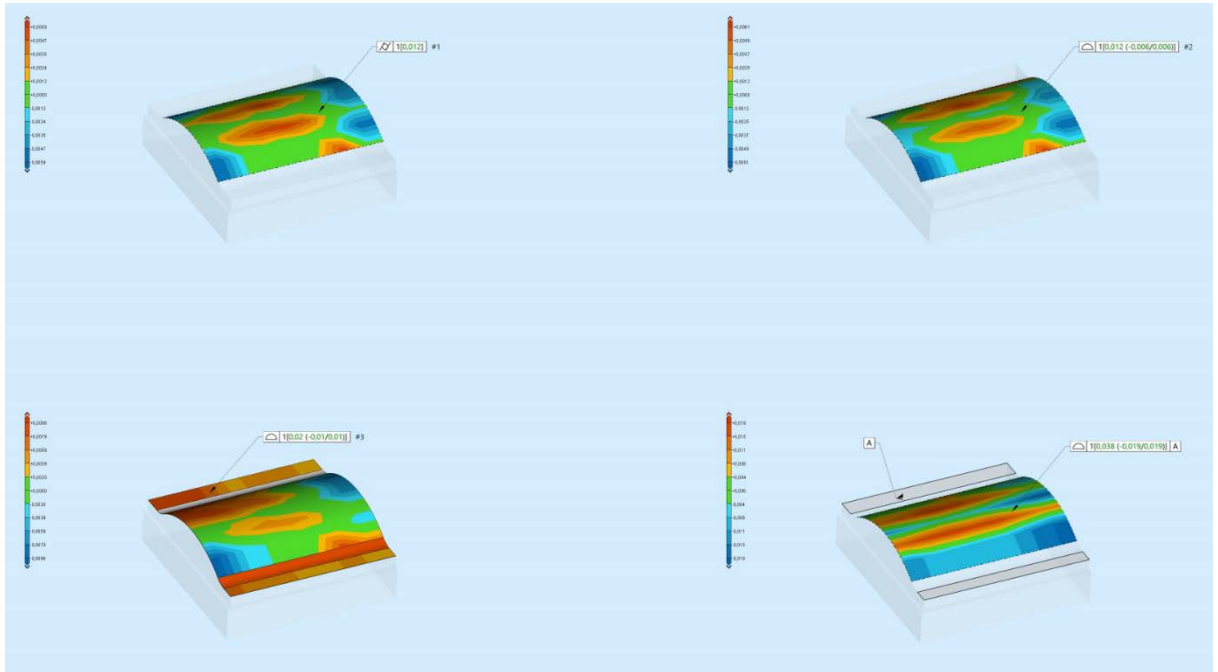
CV-5



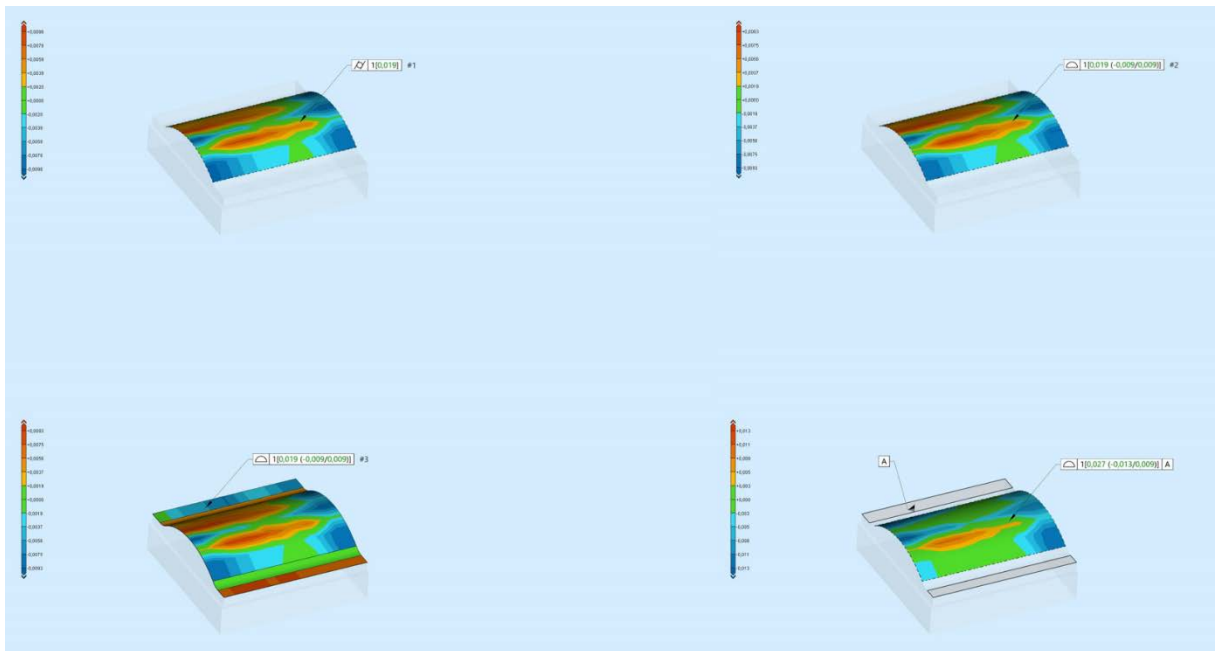
CX-1



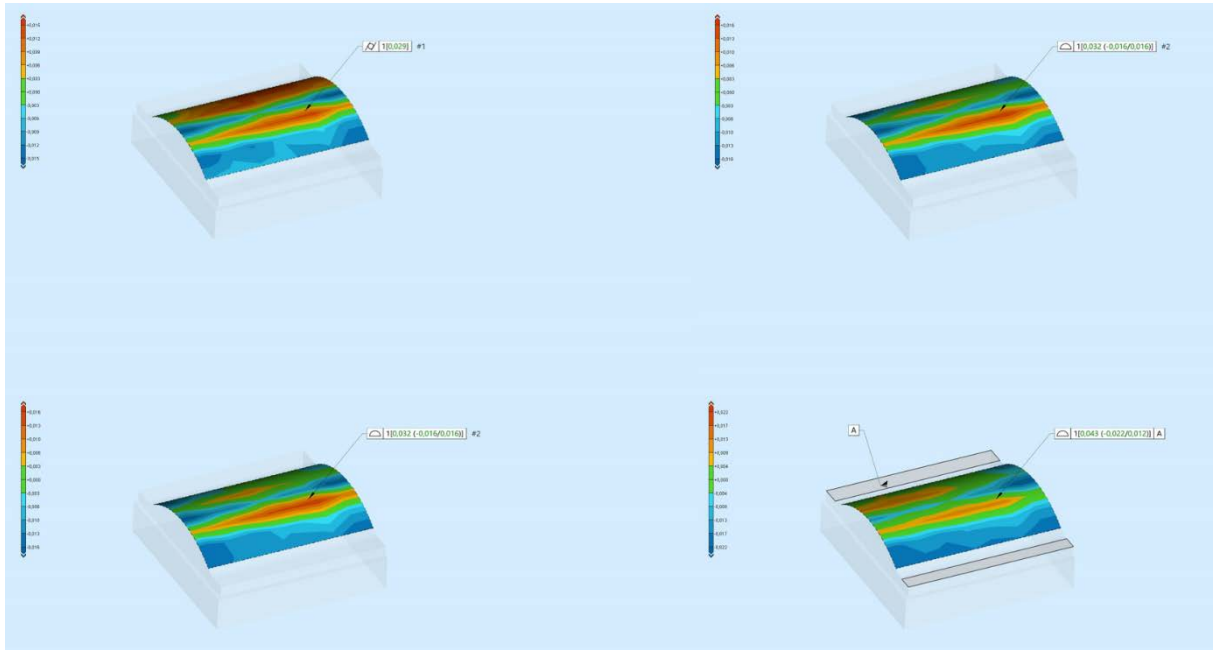
CX-2



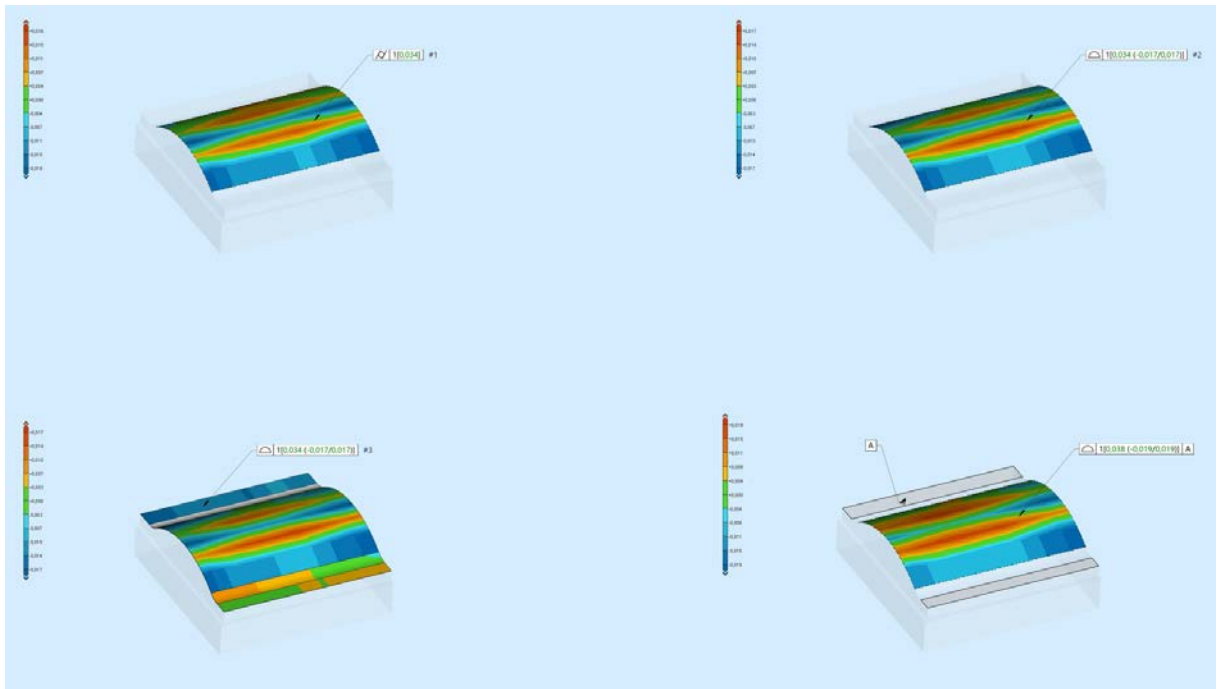
CX-3



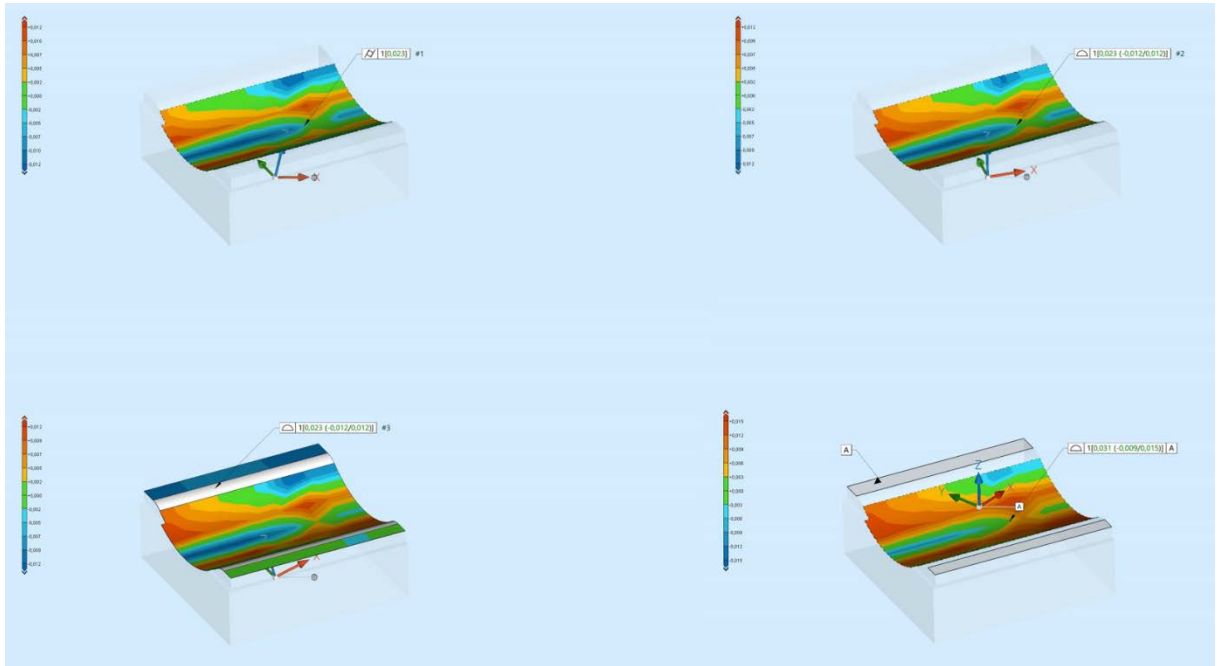
CX-4



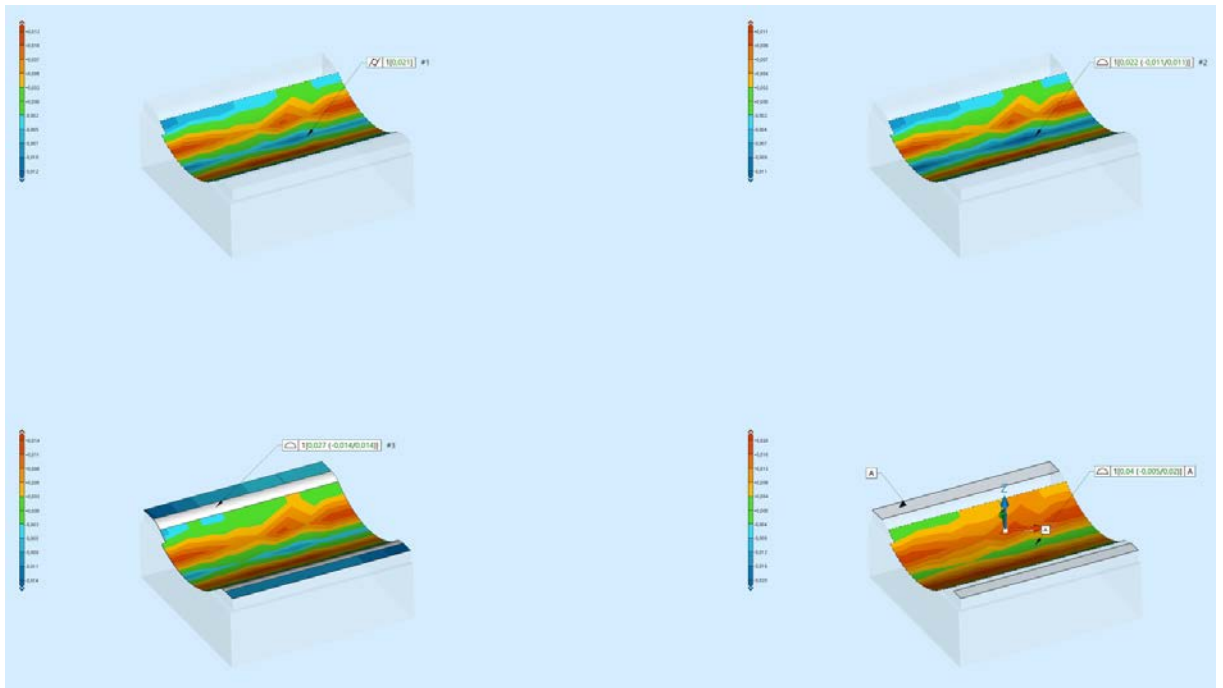
CX-5



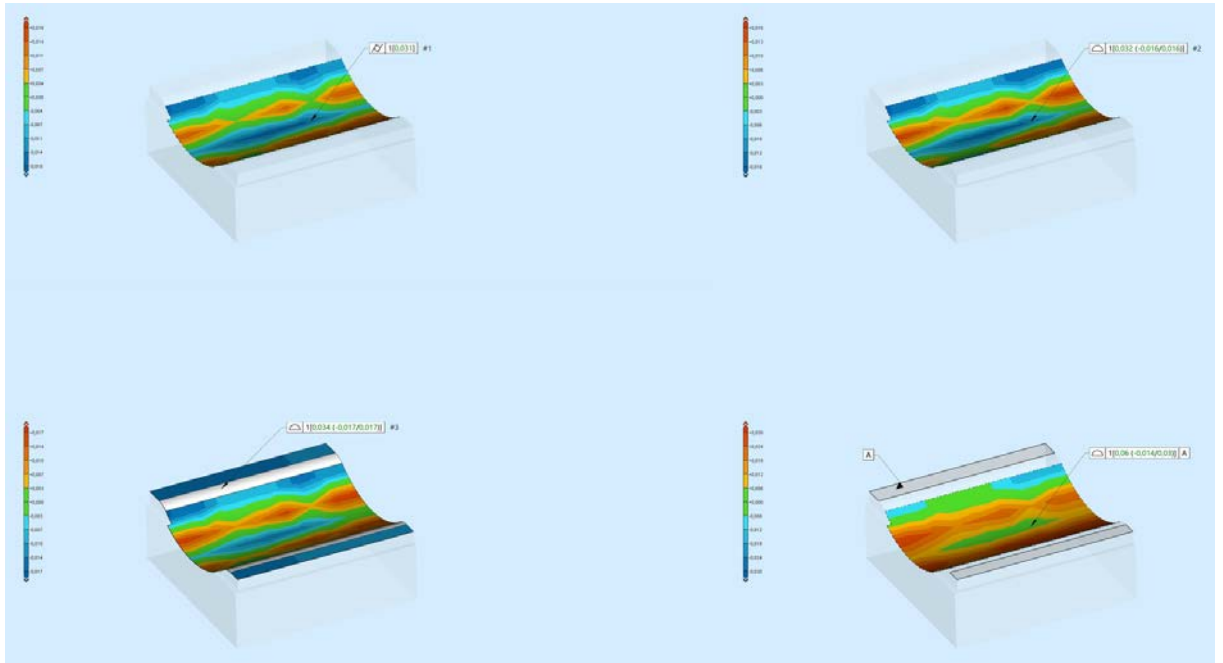
CV-6



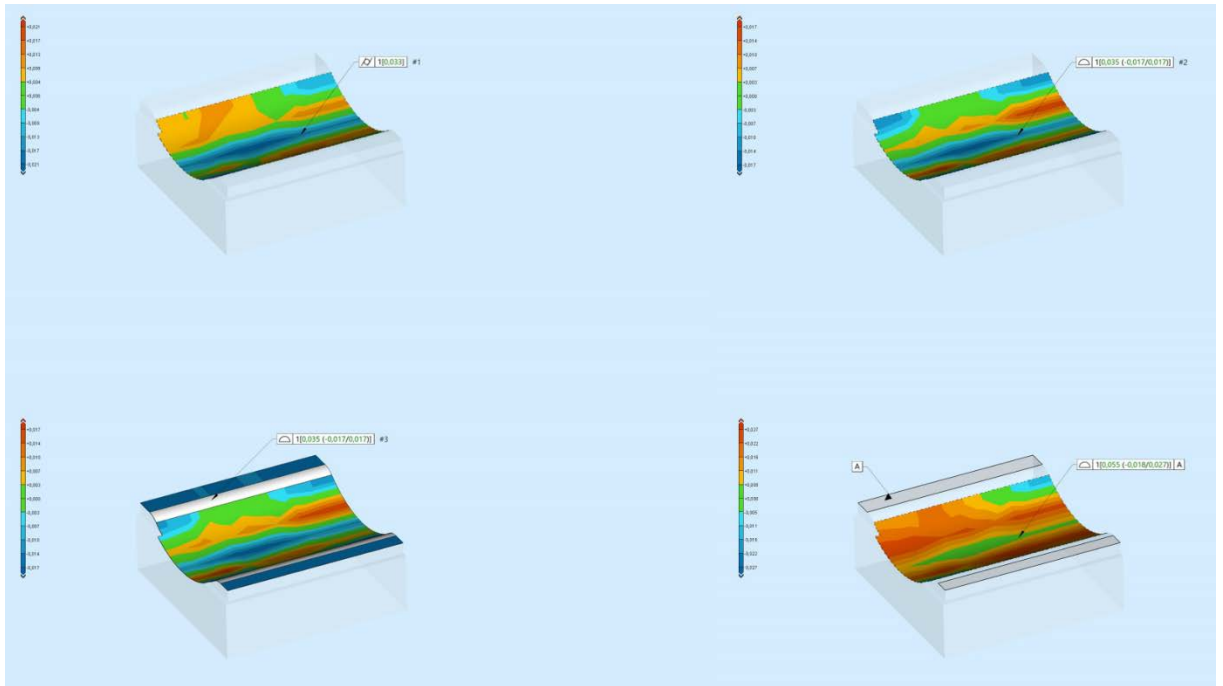
CV-7



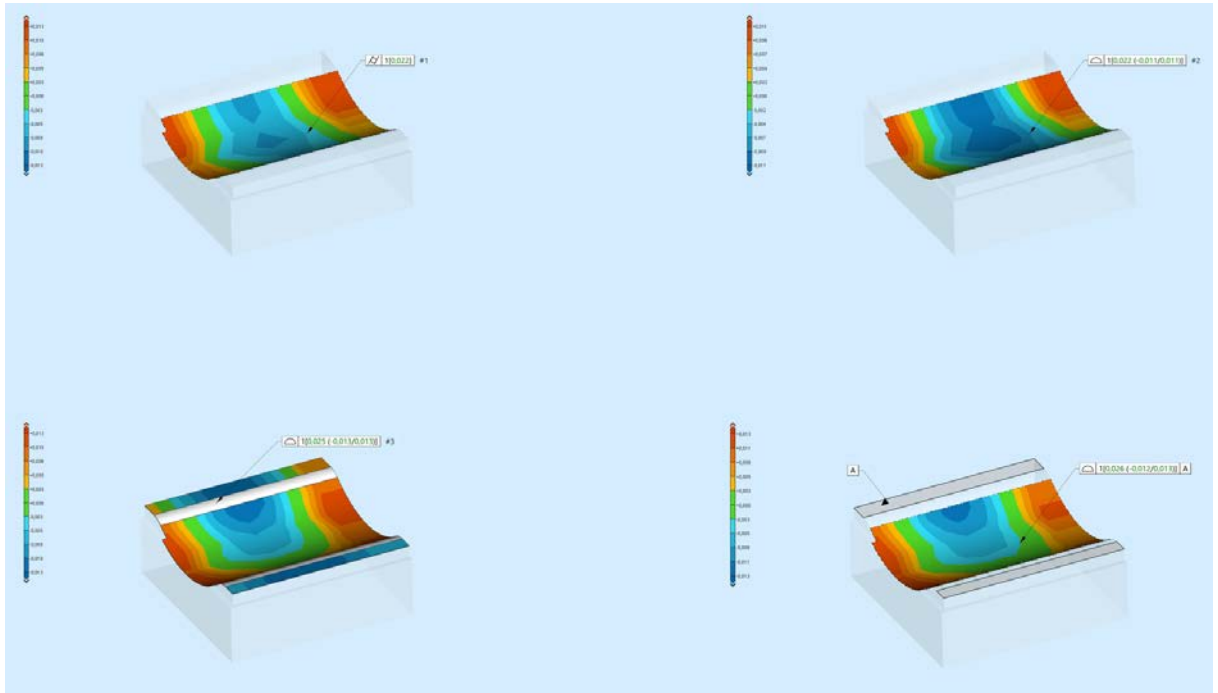
CV-8



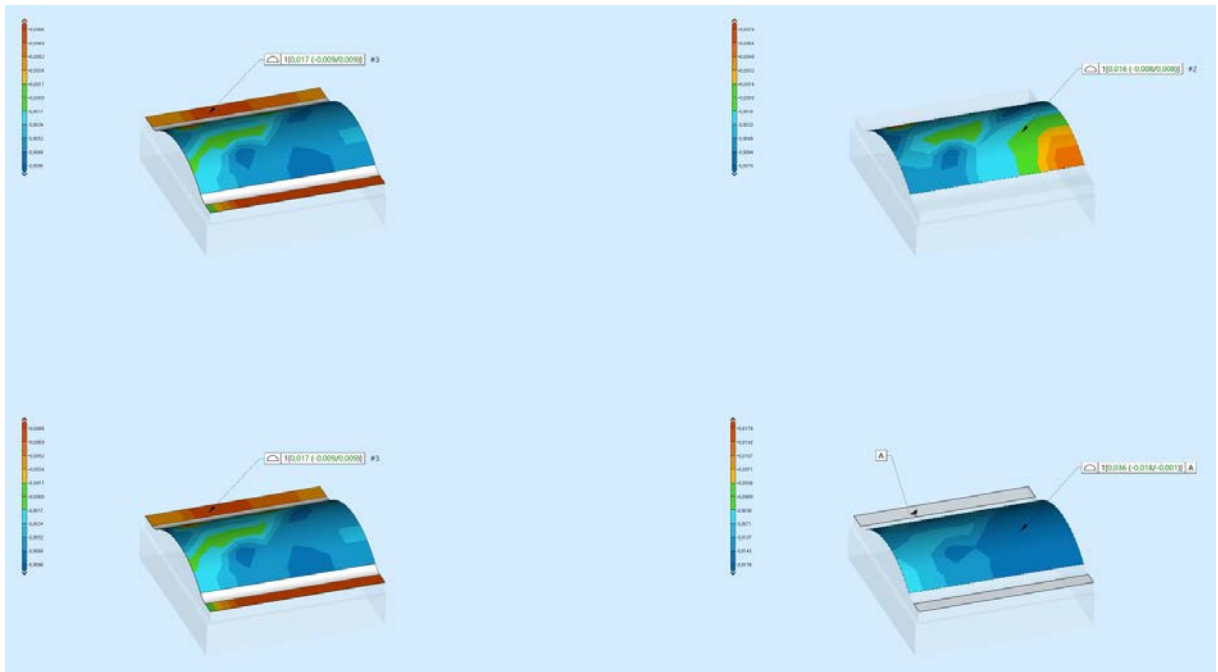
CV-9



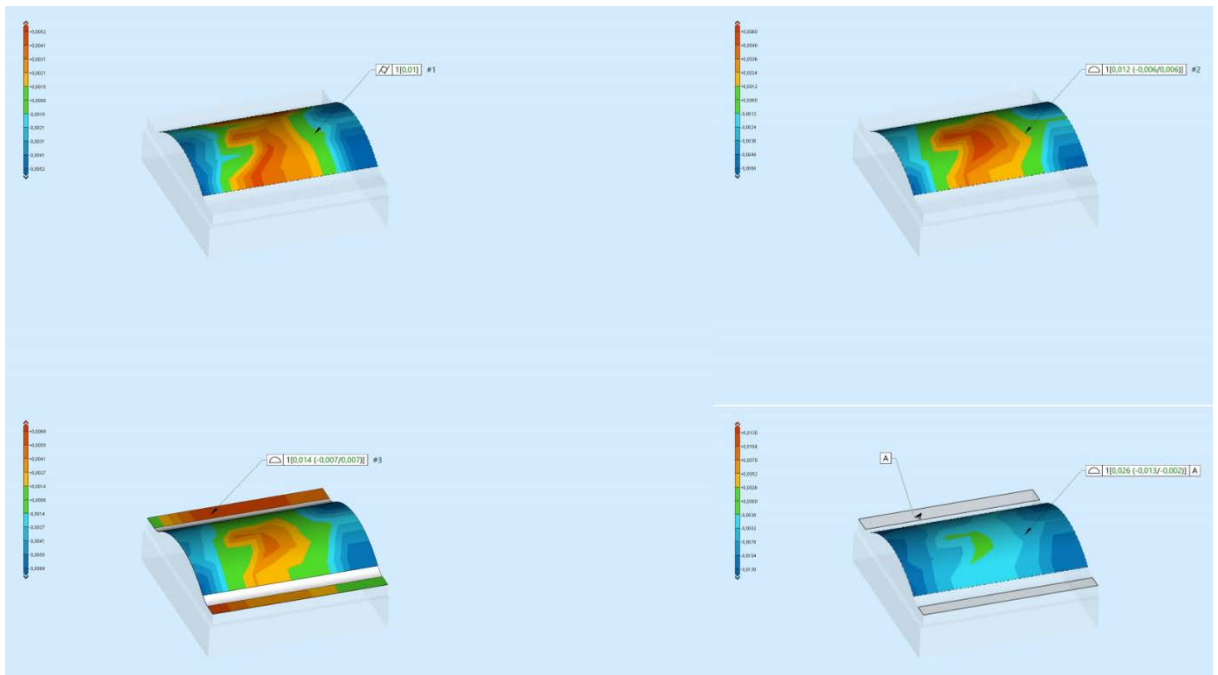
CV-10



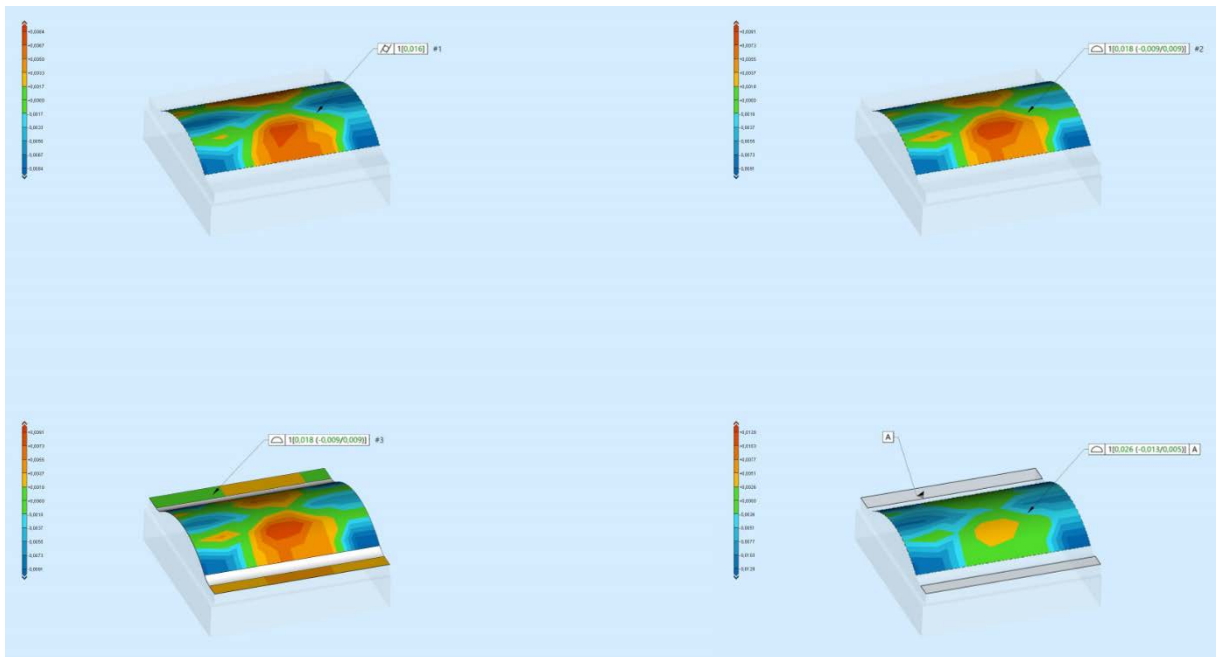
CX-6



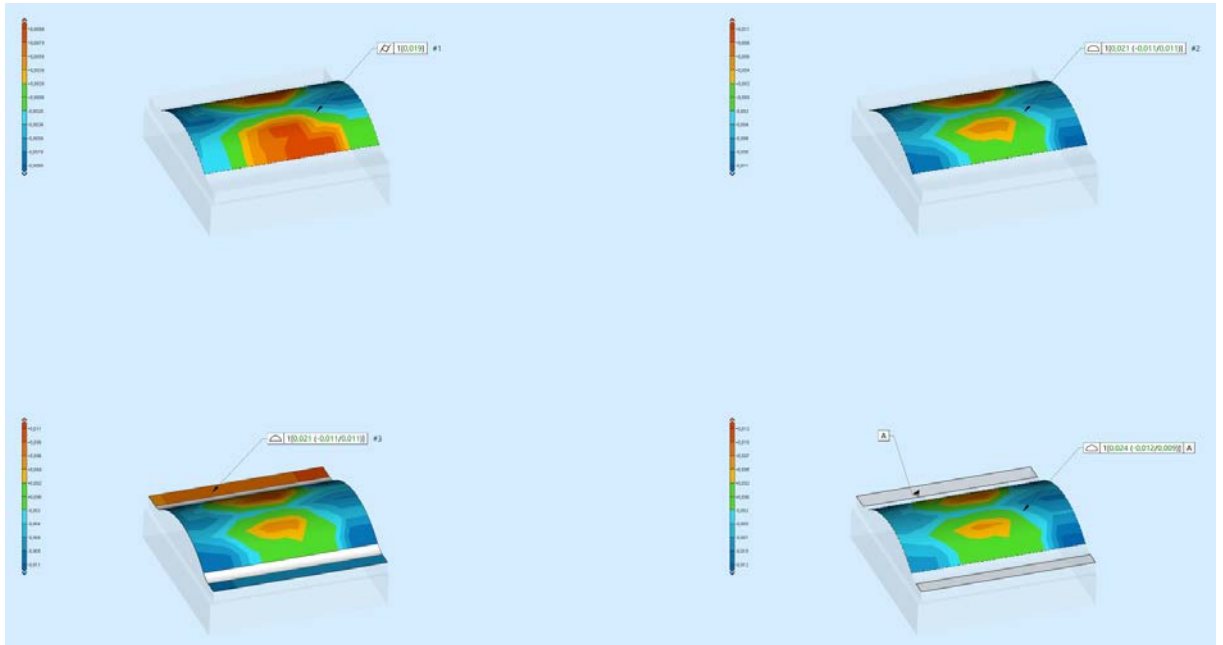
CX-7



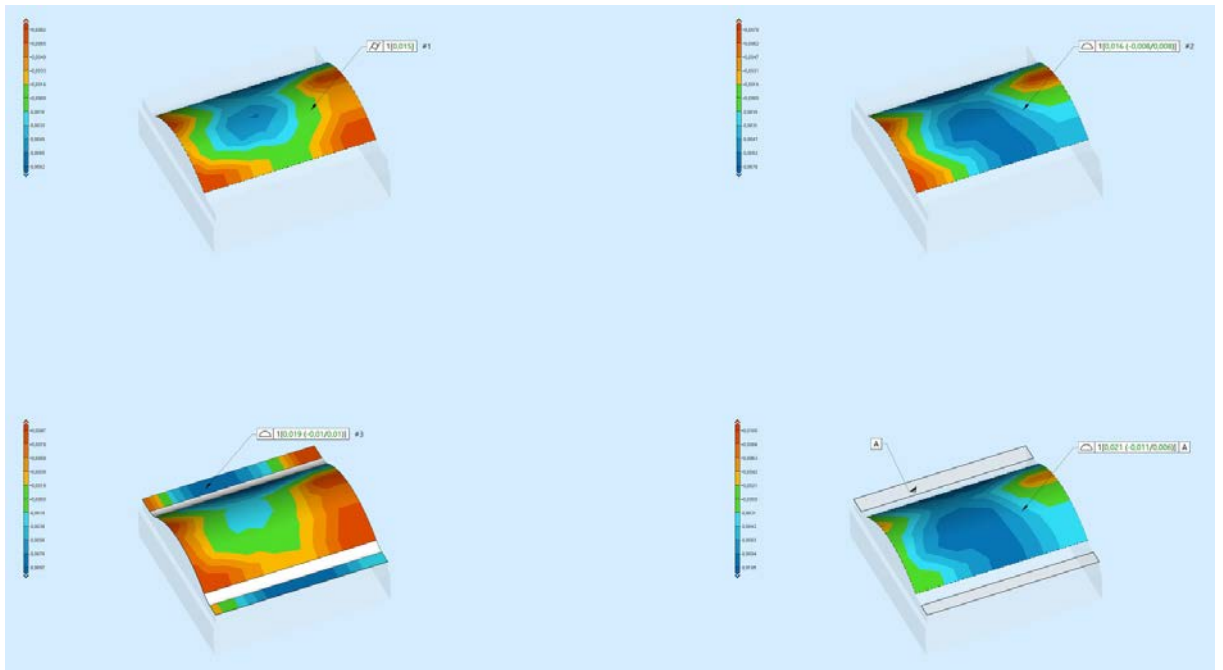
CX-8



CX-9

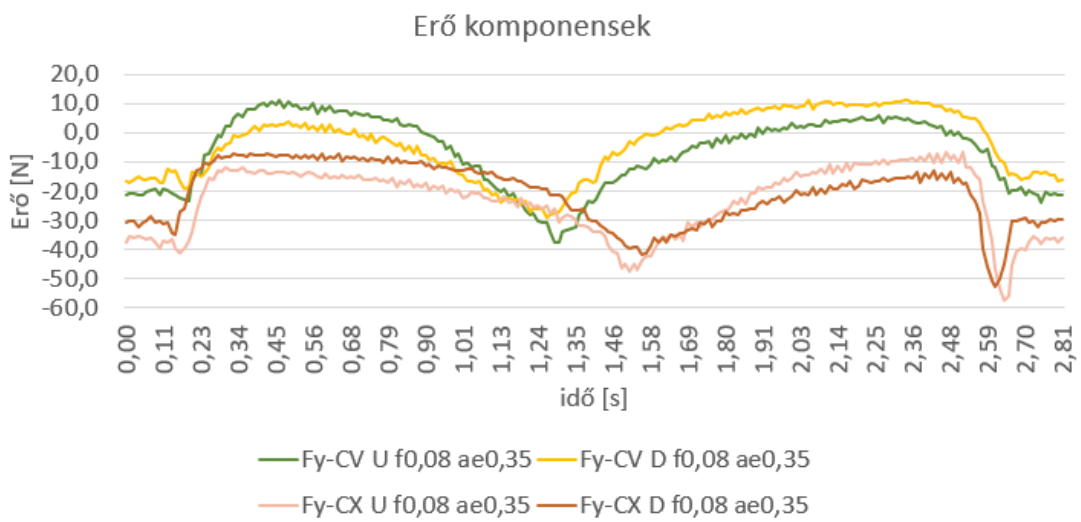
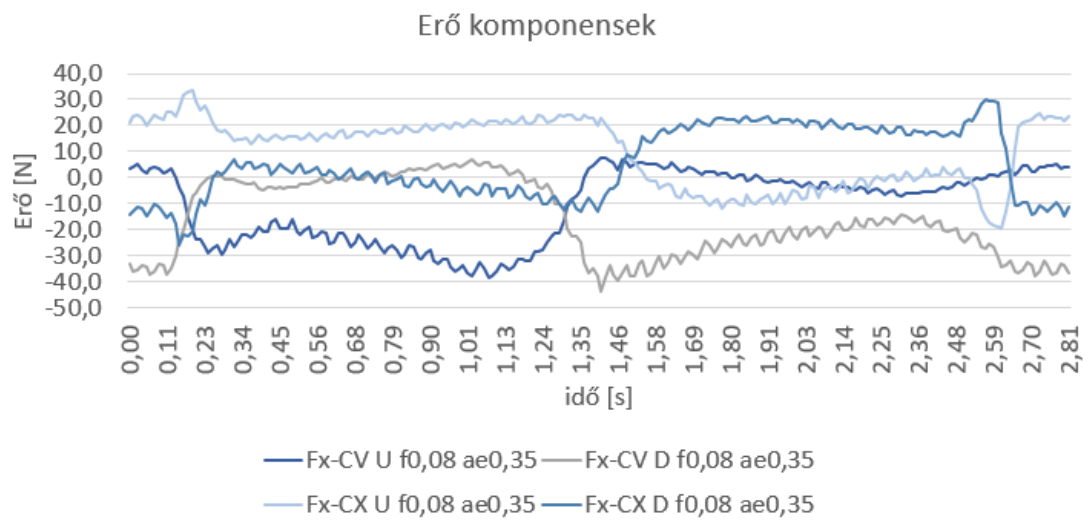


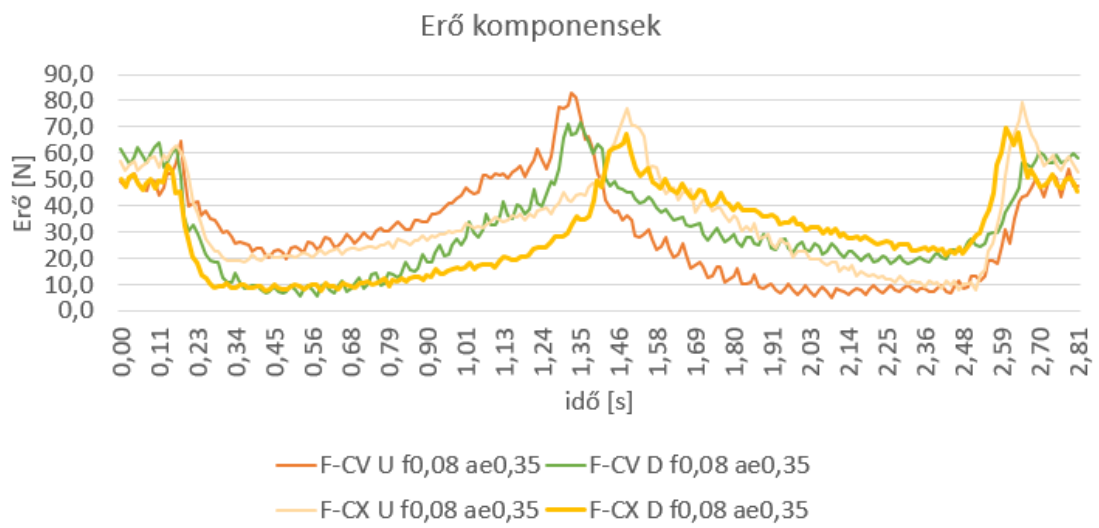
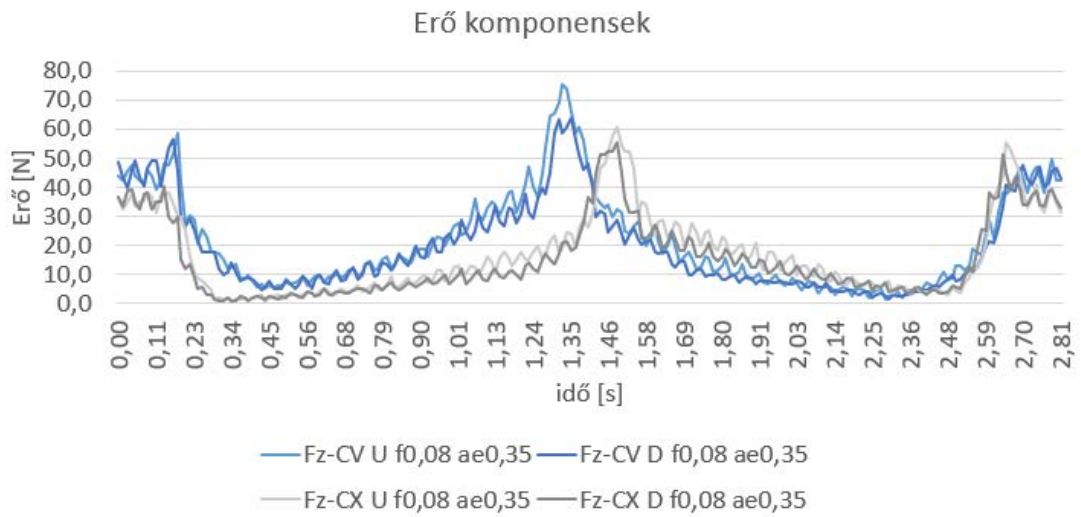
CX-10



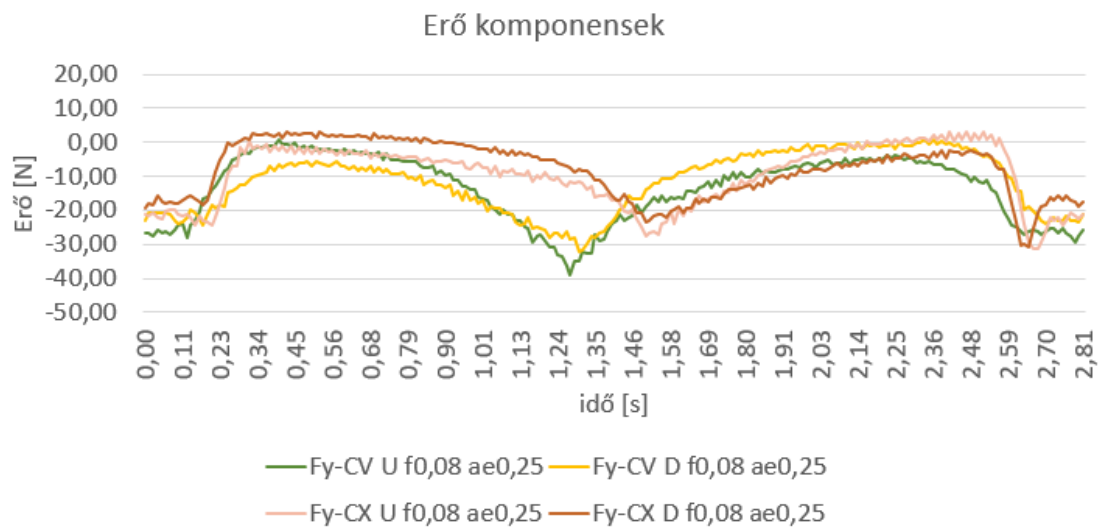
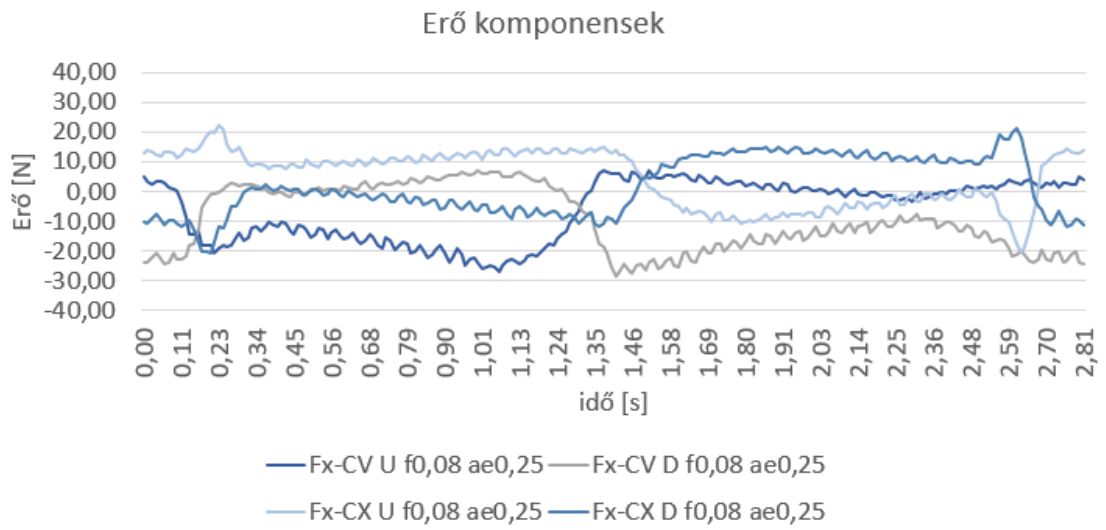
Erőértékek 7.2 fejezet kiegészítéseként

$f_z=0,08$ mm; $a_e=0,35$ mm

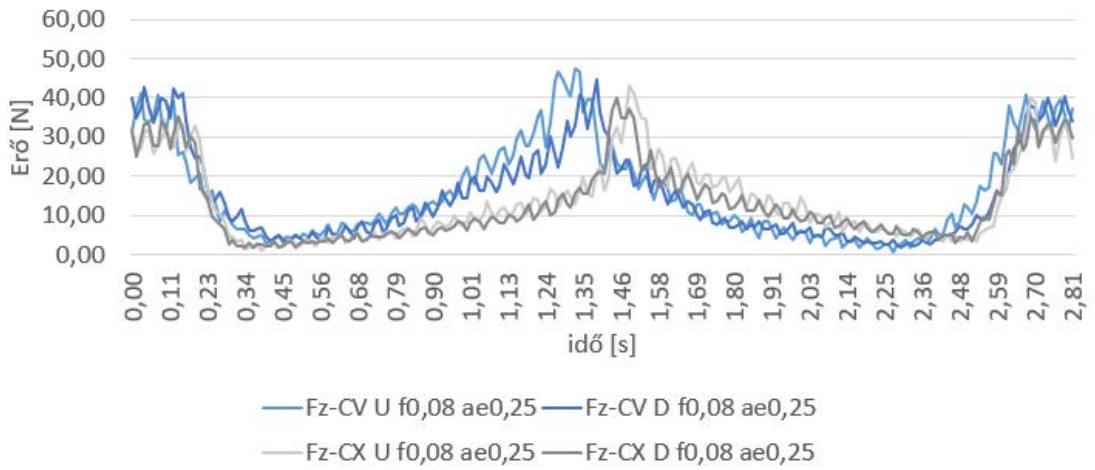




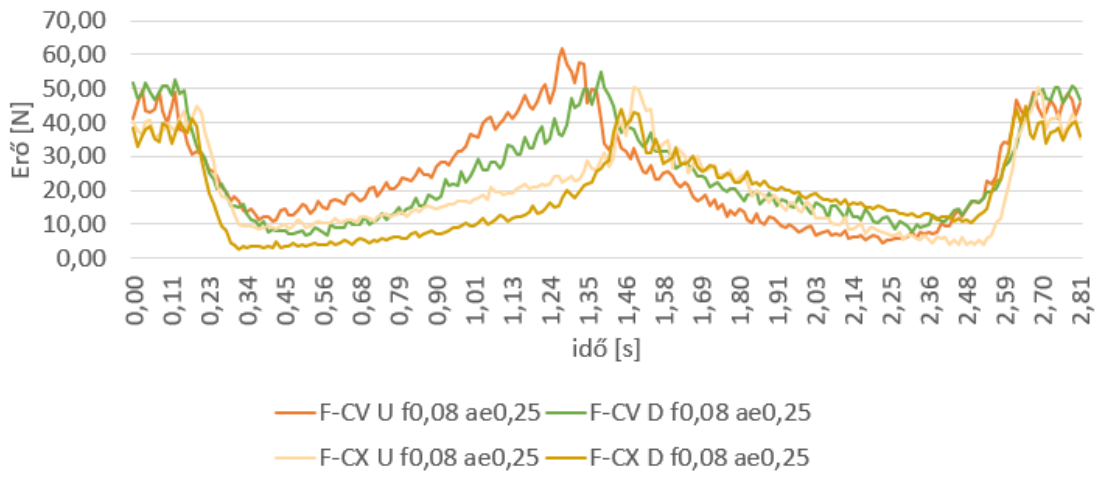
$f_z=0,08$ mm; $a_e=0,25$ mm



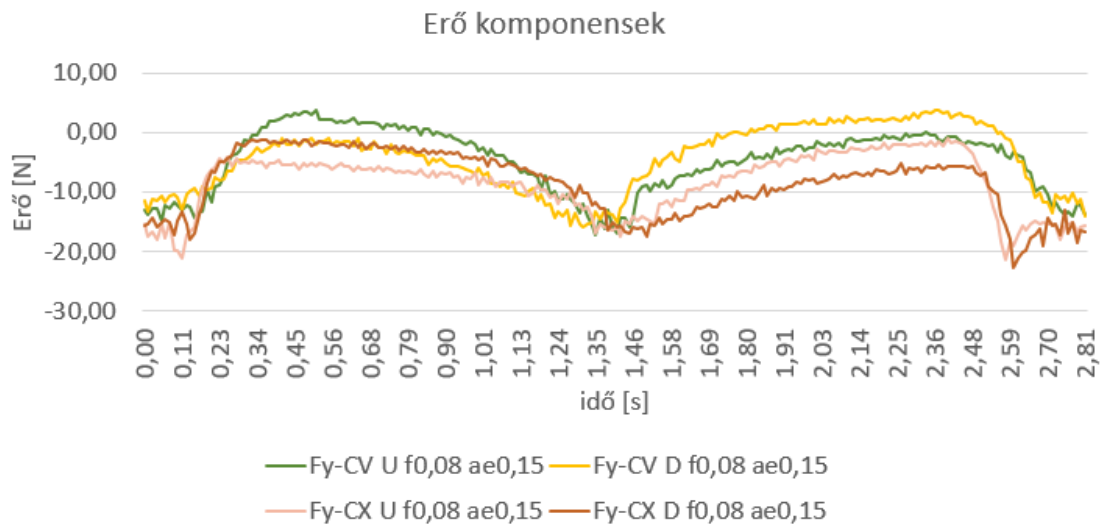
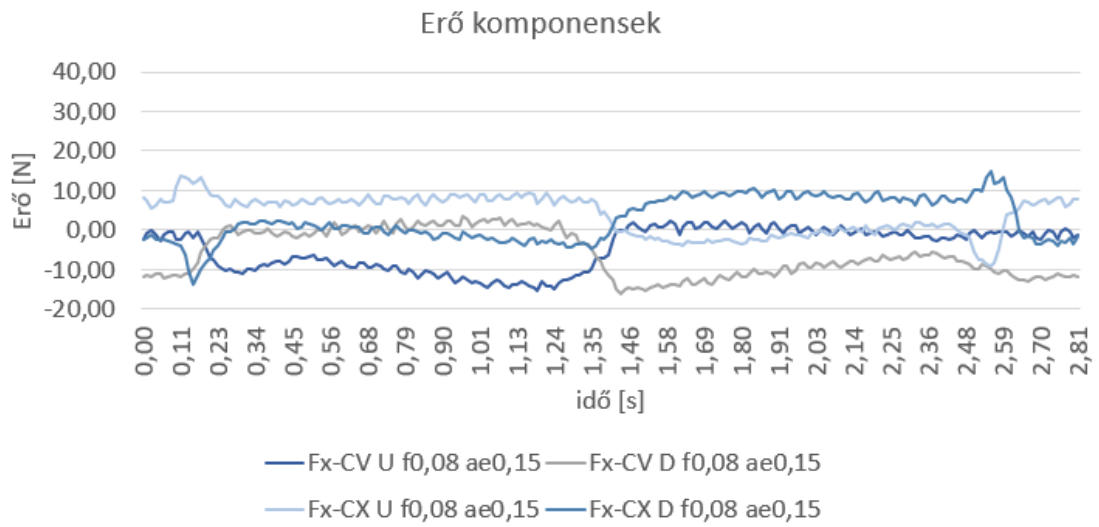
Erő komponensek



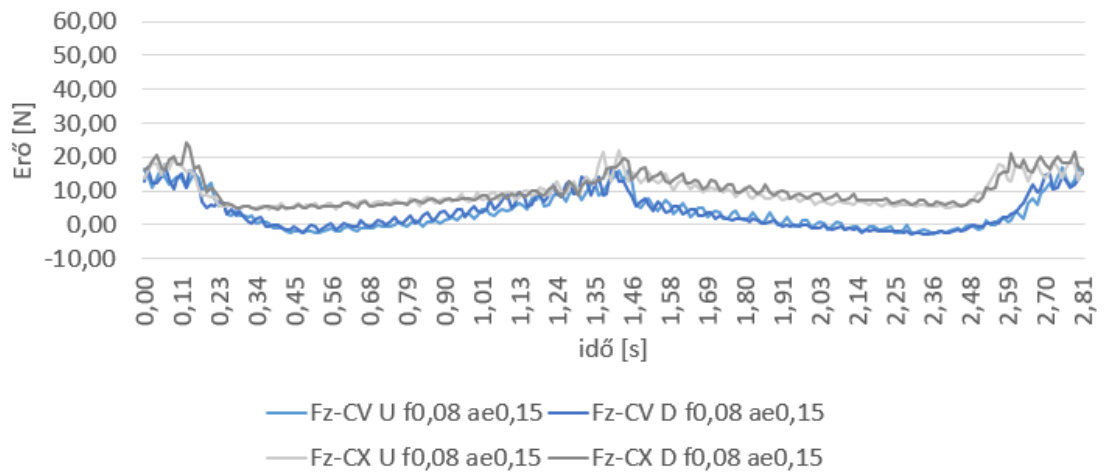
Erő komponensek



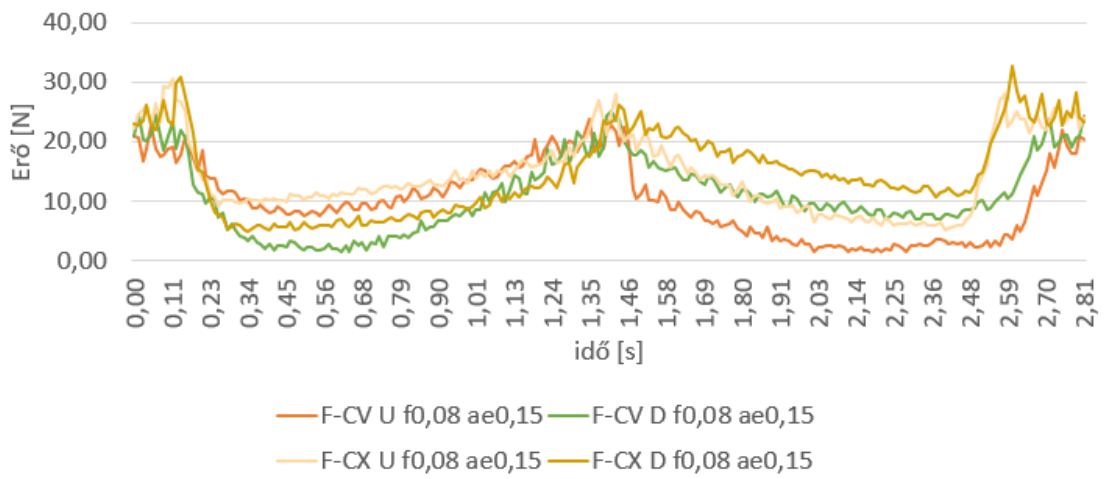
$f_z=0,08$ mm; $a_e=0,15$ mm



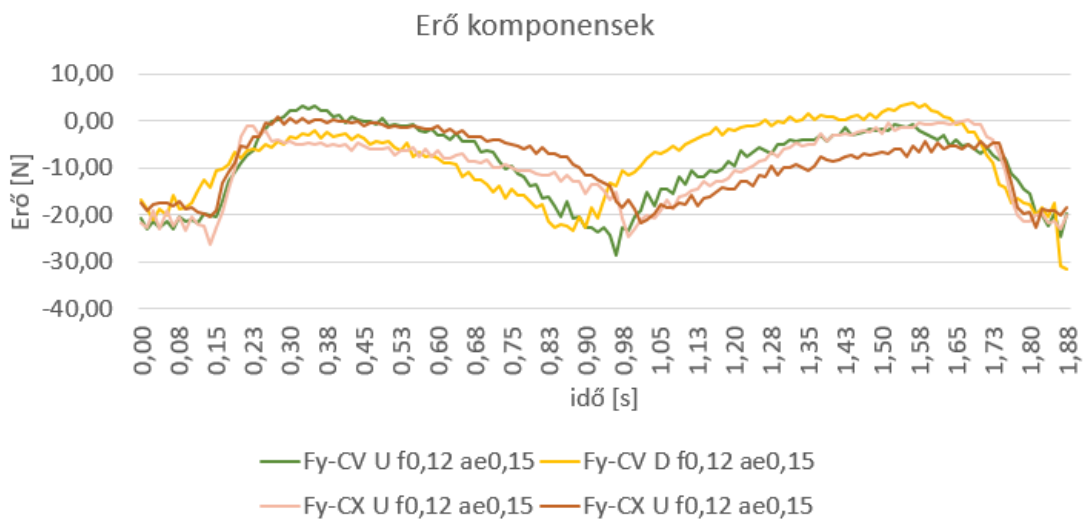
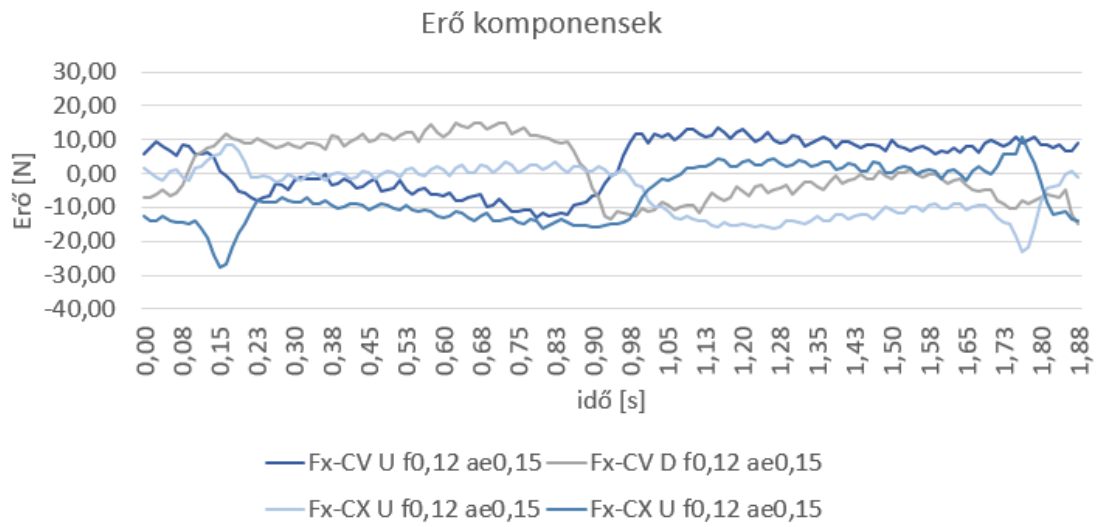
Erő komponensek

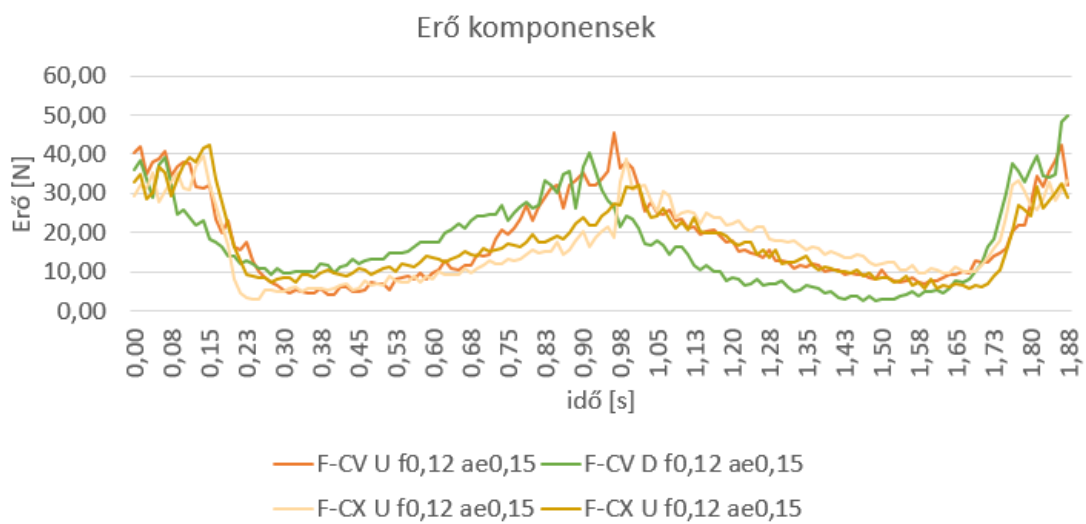
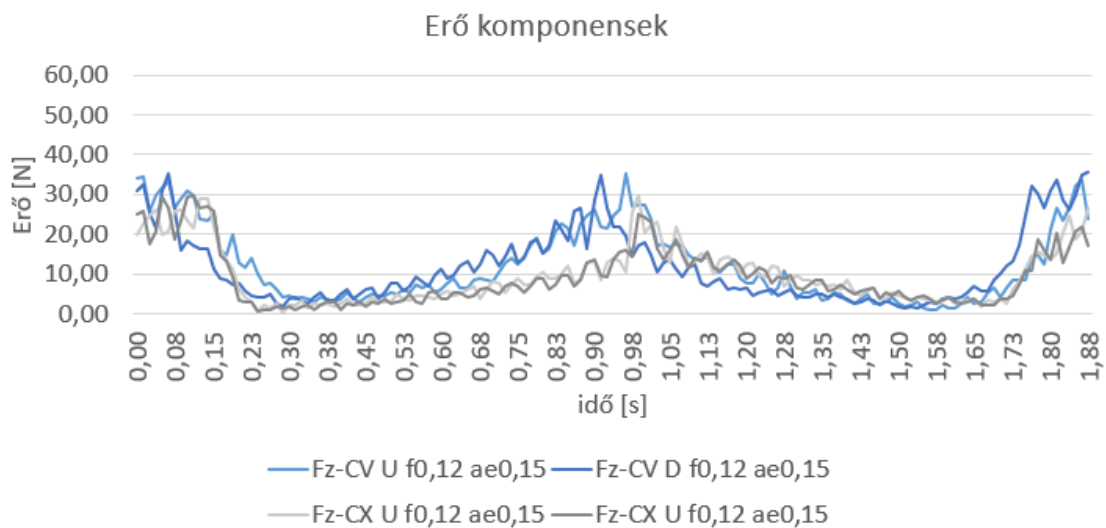


Erő komponensek

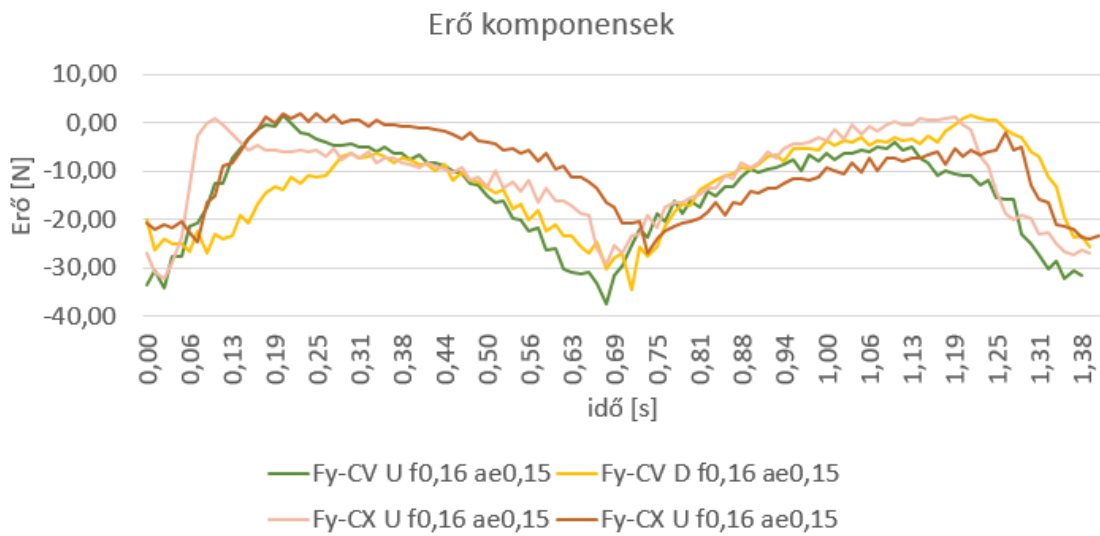
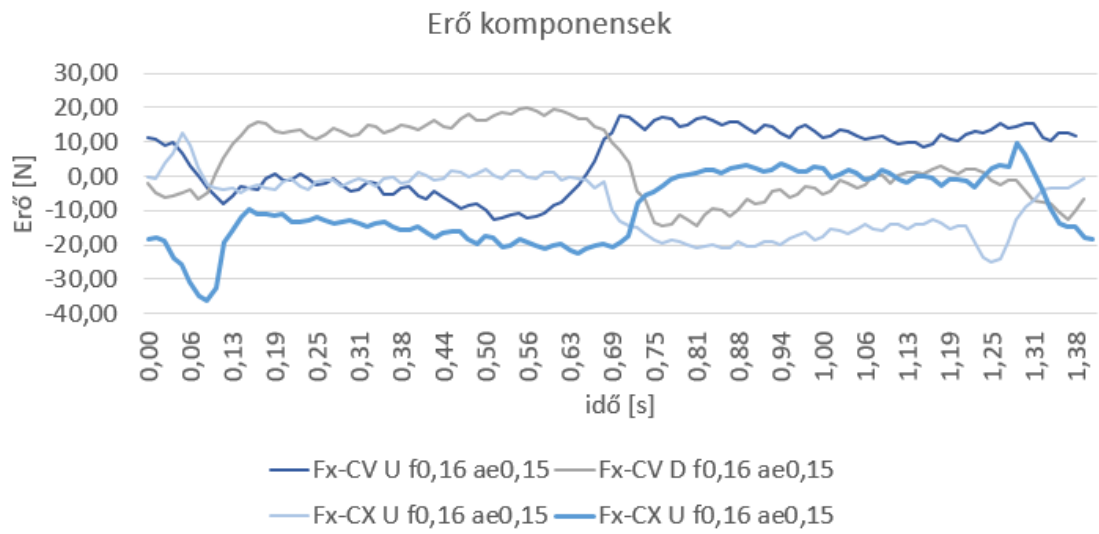


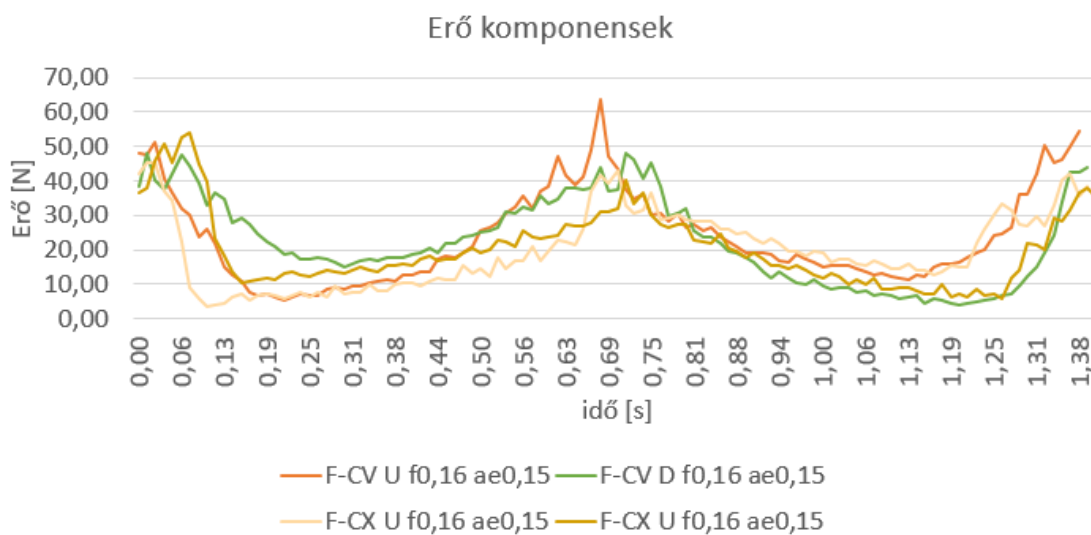
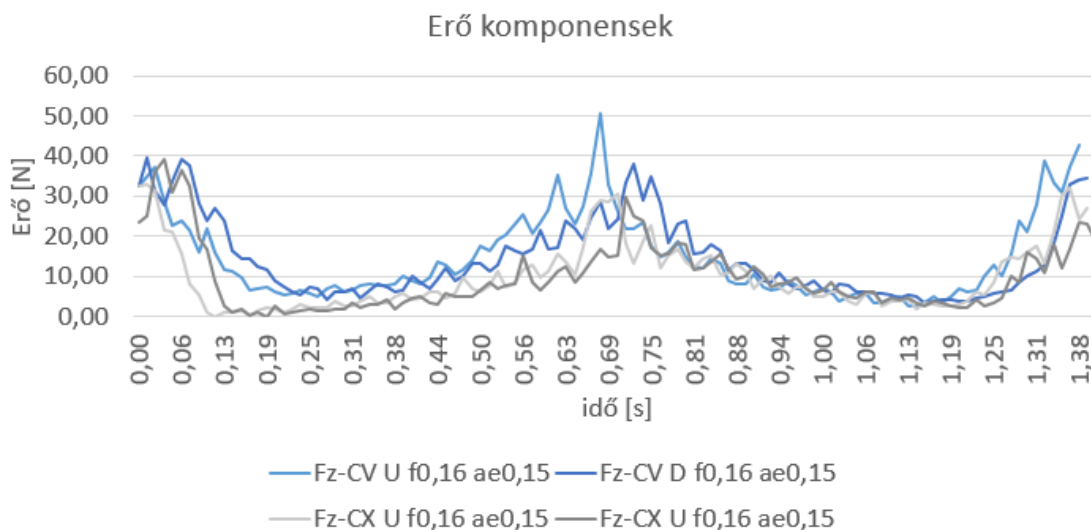
$f_z=0,12 \text{ mm}; a_e=0,15 \text{ mm}$



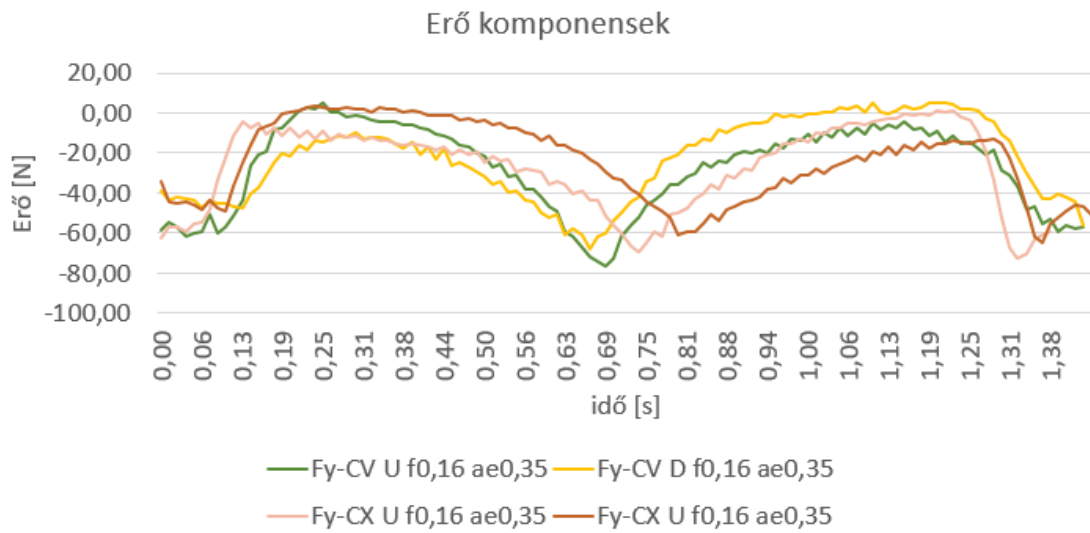
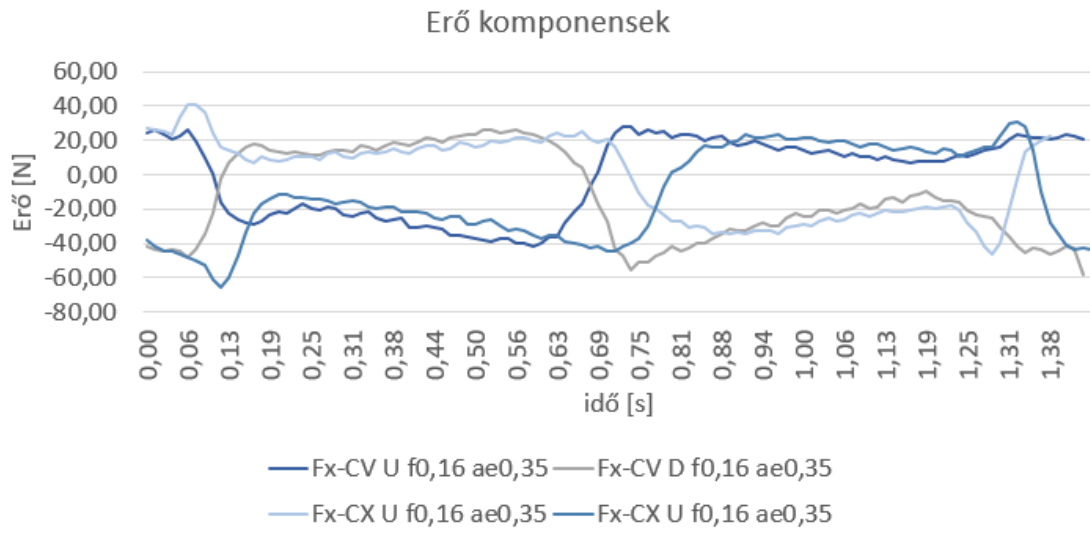


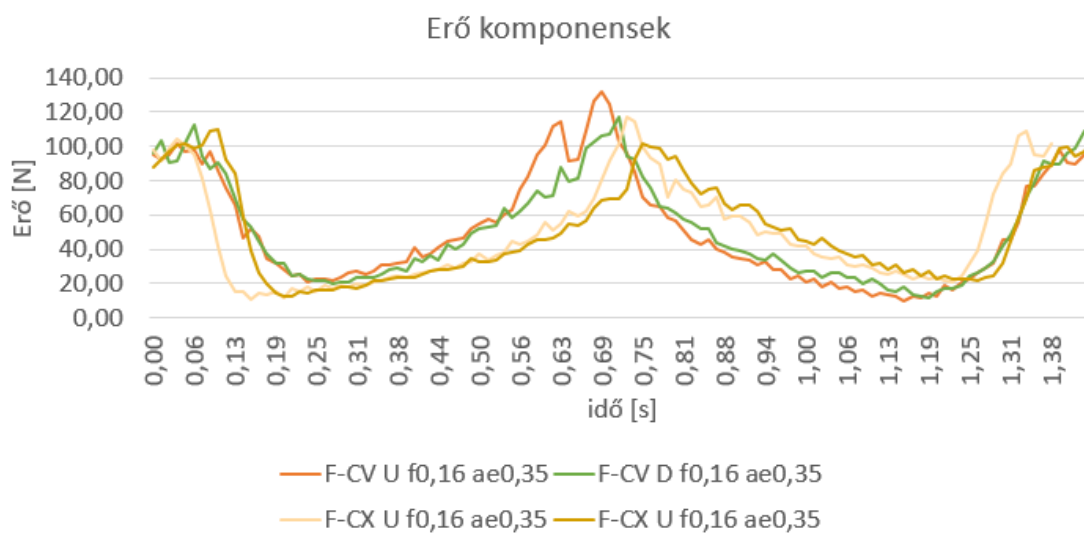
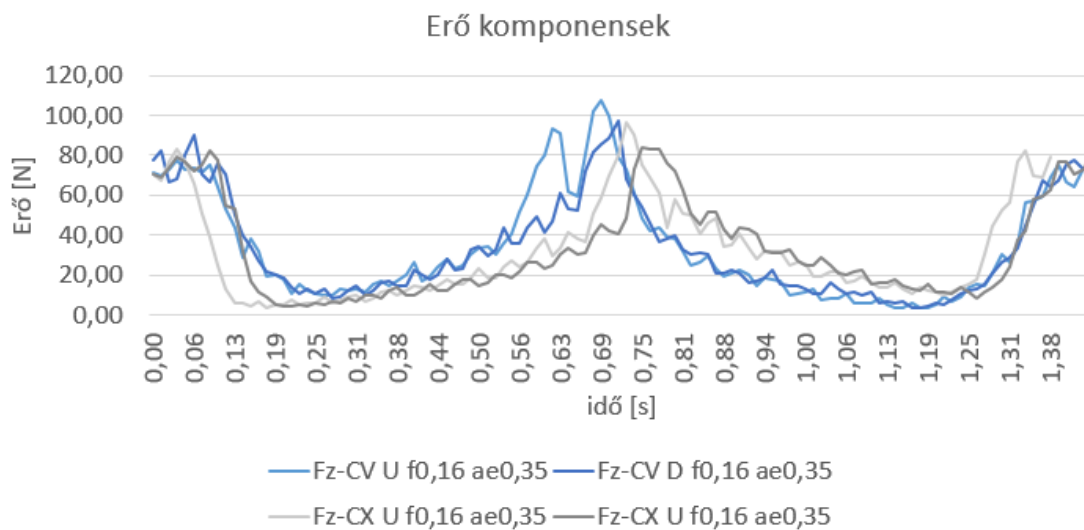
$f_z=0,16$ mm; $a_e=0,15$ mm



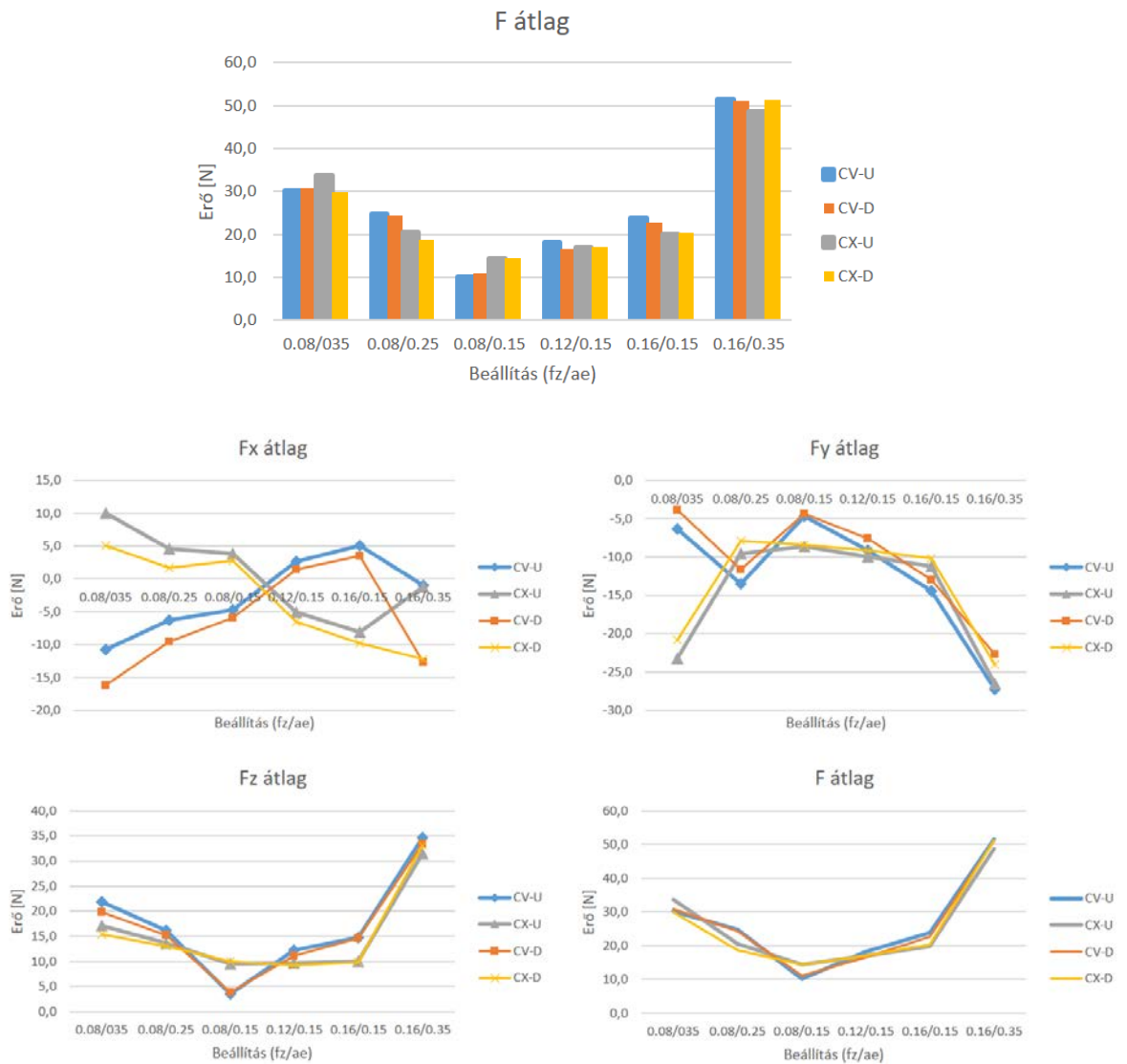


$f_z=0,16$ mm; $a_e=0,35$ mm



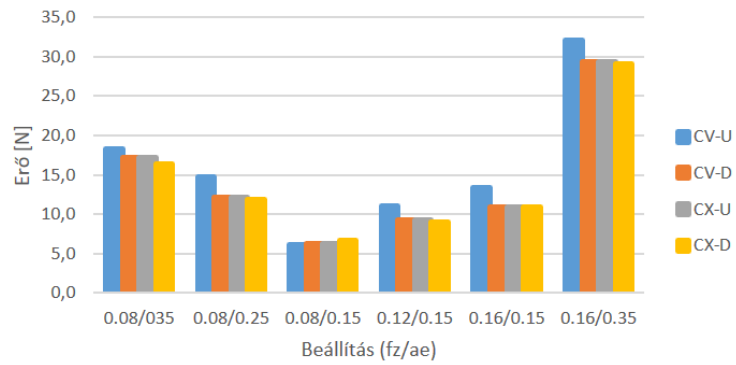


F átlag értékek

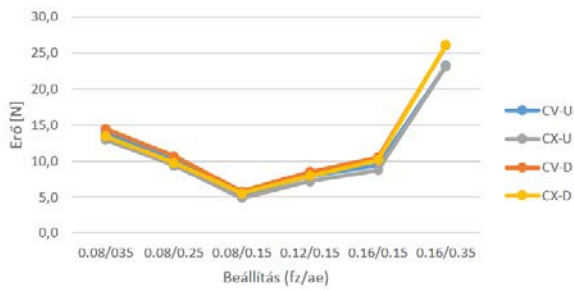


F szórás értékek

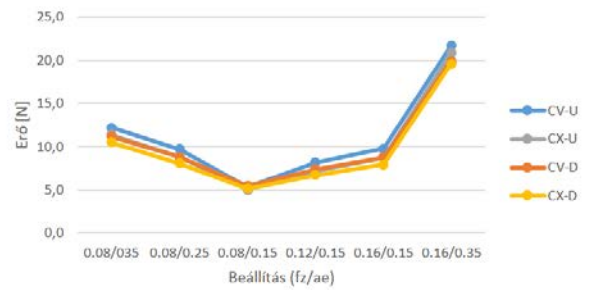
F szórás



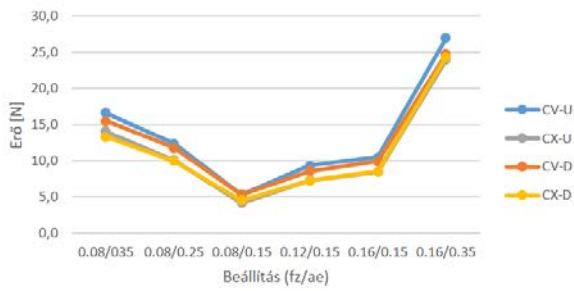
Fx szórás



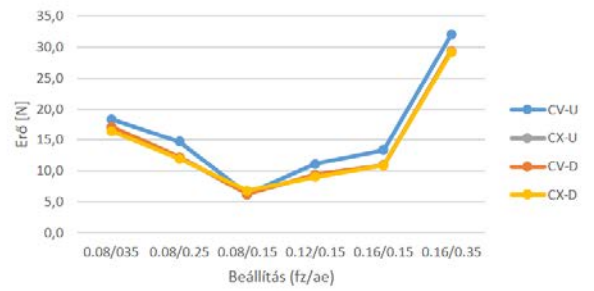
Fy szórás



Fz szórás

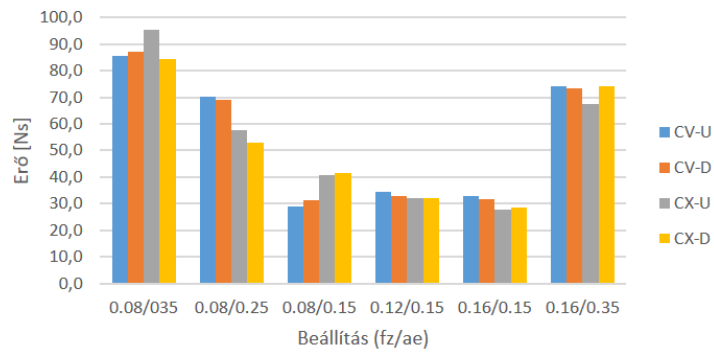


F szórás

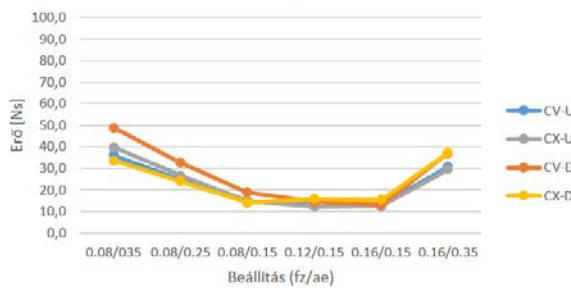


F idő integrál értékek

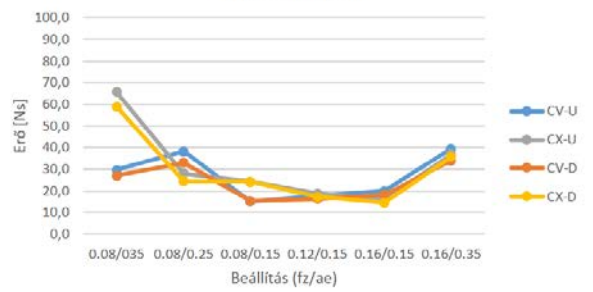
F idő integrál



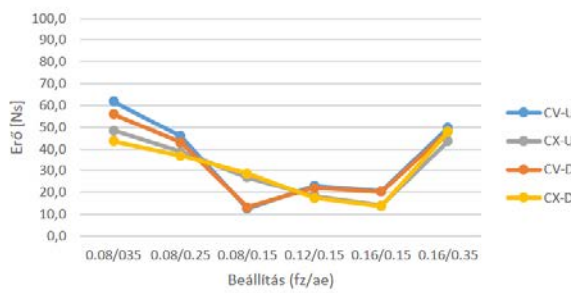
Fx idő integrál



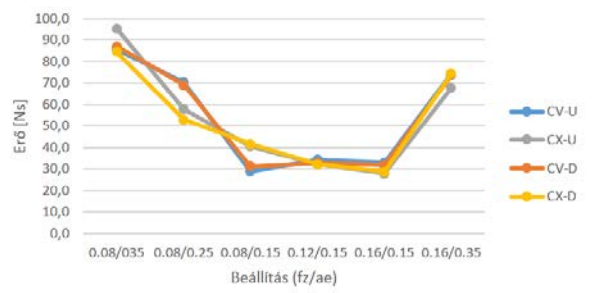
Fy idő integrál



Fz idő integrál

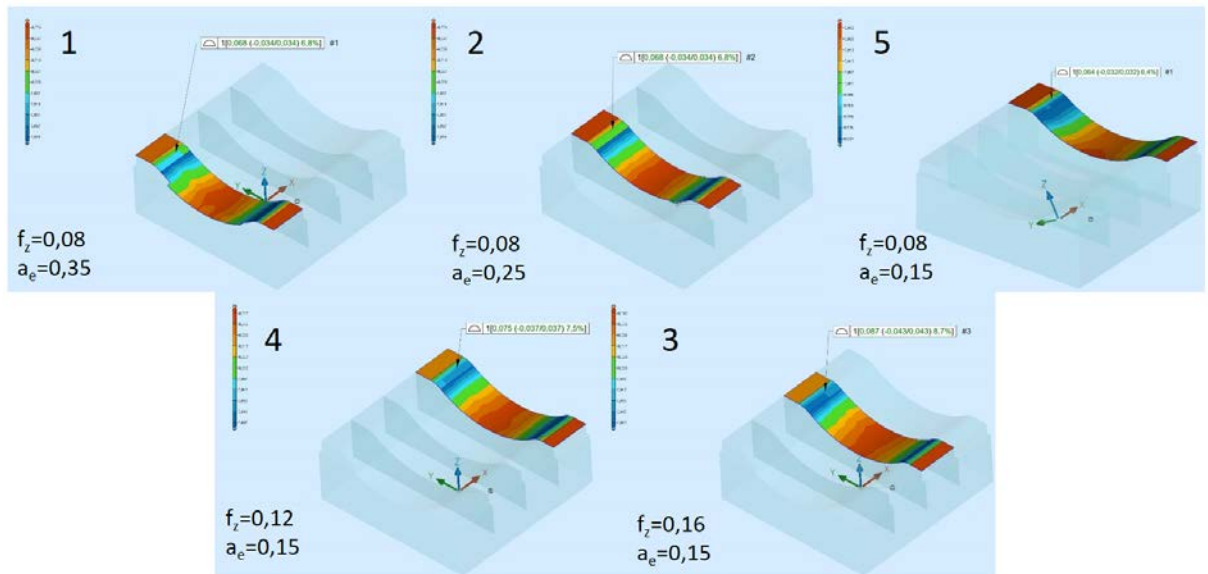


F idő integrál



Alakpontosság és szintértékes felületi eltérések a 7.2-es fejezetben ismertetett beállítások szerint

Homorú



Domború

