

**NYÍREGYHÁZI FŐISKOLA
MŰSZAKI ÉS MEZŐGAZDASÁGI KAR
NYÍREGYHÁZA**

**ADDITÍV GYÁRTÁSSAL KÉSZÍTETT MUNKADARABOK
MÉRETHELYESSÉGÉNEK ÉS FELÜLETI MINŐSÉGÉNEK
ELEMZÉSE**

Tudományos diákköri dolgozat

Készítette: Zand Gergő

Konzulens: Dr. Dezső Gergely

Kósa Péter

2012.

1. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	4
1.1. AZ ADDITÍV GYÁRTÁS FEJLŐDÉSE	4
1.2. FONTOS KIFEJEZÉSEK AZ ADDITÍV GYÁRTÁSSAL KAPCSOLATBAN	6
1.3. A TECHNOLÓGIÁK FŐBB CSOPORTJAI	7
1.4. A POLYJET ELJÁRÁS	9
1.4.1. Az STL fájl	10
1.4.2. A modell elhelyezése a gyártótérben	12
1.4.3. A Polyjet eljárás gépei	12
1.4.4. A Polyjet eljárás előnyei	14
1.5. A POLYJET ELJÁRÁS SORÁN ALKALMAZOTT ANYAGOK	15
1.6. PONTOSSÁG AZ ADDITÍV GYÁRTÁSBAN	16
1.7. A FELBONTÁS SZEREPE	17
1.8. A PONTOSSÁG FELÉRTÉKELŐDIK	18
1.9. ISMÉTELHETŐSÉG	18
1.10. HOSSZÚTÁVÚ STABILITÁS	19
1.11. KORÁBBI VIZSGÁLATOK SÍKLAPOKKAL HATÁROLT TESTEKRE	19
2. A DOLGOZAT CÉLKITÚZÉSEI	20
3. A PRÓBATESTEK	21
4. MÉRÉSEK	22
4.1. MÉRÉSI HELYZETEK	22
4.2. A KÜLSŐ ÁTMÉRŐN MÉRT MÉRTEK	23
4.3. A BELSŐ ÁTMÉRŐN MÉRT MÉRTEK	24
4.4. ÁTRENDZETT MÉRÉSI ADATOK	25
4.4.1. Külső átmérőn mért adatok	25
4.4.2. Belső átmérőn mért adatok	26
4.5. A MIKROMÉTERREL VÉGZETT MÉRÉSEKBŐL LEVONT KÖVETKEZTETÉSEK	27
4.6. 3D KOORDINÁTA MÉRÉS	28
4.7. A MÉRŐGÉPPLEL VÉGZETT MÉRÉS MENETE	28
4.8. A MÉRÉSEK KIÉRTÉKELÉSE	31
4.9. A KÖRALAKÚSÁG VIZSGÁLATA	31
5. FELÜLETI ÉRDESSÉG MÉRÉS	37
5.1. A FELÜLETI ÉRDESSÉG JELLEMZÉSÉRE HASZNÁLT FŐBB FOGALMAK ÉS MÉRÉSI MÓDSZEREK	37
5.2. MÉRT ÉRTÉKEK	40
5.2.1. Átlagos érdesség (R_a):	40
5.2.2. Simasági mérőszám (R_q):	40
5.2.3. Egyenetlenségmagasság (R_z):	41
5.3. MÉRT ÉRTÉKEK ÁTLAGA	41
5.3.1. Átlagos érdesség (R_a):	41
5.3.2. Simasági mérőszám (R_q):	42
5.3.3. Egyenetlenségmagasság (R_z):	42

5.4.	A MÉRT ÉRTÉKEK 0° -NÁL	43
5.5.	A MÉRT ÉRTÉKEK 90° -NÁL	44
6.	KÖVETKEZTETÉSEK.....	45
7.	ÖSSZEFOGLALÁS.....	46
8.	FELHASZNÁLT IRODALOM.....	48
9.	MELLÉKLETEK	50

1. Szakirodalmi áttekintés

1.1. Az additív gyártás fejlődése

Az additív gyártás napjainkban robbanásszerű fejlődésen megy keresztül, egyes vélemények szerint paradigmaváltást jelent a gyártástechnológiában. Legnagyobb előnyei közé tartozik a gyártási rugalmasság, hiszen a gép átállítása, szerszámváltás nélkül elkészíthető bármilyen, akár bennszülött térbeli alakzat gyártása gyorsan és jól reprodukálhatóan.

Az első gyors prototípust 1977-ben készítették LOM (laminated object manufacturing, papírlapokból rétegenkénti összeragasztással) technikával. Azóta az additív gyártásnak számos technológiája fejlődött ki, és ez a folyamat jelenleg is intenzíven zajlik. Az additív gyártás jelentőségét az alábbiakban néhány példával szeretném illusztrálni.

Az Atlanti Tanács egy amerikai kezdeményezéssel 1961-ben megalakult szervezet, amelynek célja az euroatlanti együttműködés segítése. 1992-ben létrejött a Magyar Atlanti Tanács is. Az [1] cikk 2011 októberében, a tanács megalakulásának 50. évfordulója alkalmából ad áttekintést az additív gyártásról, a címe: "A 3D nyomtatás megváltoztathatja a világot?" Ez a tanulmány az alábbiakban fogalmazza meg az additív gyártás gazdasági, technológiai, szociális és geopolitikai jelentőségét:

- a) A beszállítói láncok és a gyárakban a szerelőszalagok lerövidülnek, vagy teljesen eltűnhetnek.
- b) Ahogy az internet megszüntette a távolságot az információ világában, úgy az additív gyártás a technológiában. Nem a termékek, hanem a tervek utaznak majd a világon adatfájlok formájában, és helyben elkészíthetők, ahol rendelkezésre áll a szükséges berendezés.
- c) A termékek a keresletnek megfelelően készíthetők el, szükségtelenné téve a raktározást, és a tartalék készletek felhalmozását.
- d) Egy gyártórendszer a termékek igen széles tartományát képes előállítani újraszerszámozás és ehhez kapcsolódó költségek nélkül.
- e) A gyártásban és a termékek elosztásában a globalizációval ellentétes folyamat indulhat meg (deglobalizáció), mert a termékek a vásárlókhöz térben és időben közel készülnek el.
- f) A gyártással és szállítással kapcsolatos szén-dioxid kibocsátás jelentősen csökkenhet.
- g) A gyártás emberi munkaigénye csökken, ami bizonyos térségekben gazdaságpolitikai nehézséget okozhatnak, mások viszont ebből profitálhatnak.

Az additív gyártás hagyományos technológiákkal szembeni előnyei közé tartozik, hogy

- a) a termék tetszőlegesen összetett lehet a költség emelkedése nélkül (a komplexitás ingyenes!)
- b) a tervezés és a gyártás is digitális, így a pontosság nő
- c) azonnali gyártás lehetséges világméretben
- d) csökken a hulladék termelés.

Az additív gyártás nem csodaszer, korlátai is vannak. Az egyik ilyen korlát a termelékenység. Nem csak a technológia jelenlegi fejlettségi foka, de fizikai okok miatt sem érheti el egy 3D nyomtató egy fröccsöntő gép termelékenységét. Ez akkor igaz, ha sok ezer egyforma terméket kell előállítani. Amennyiben viszont minden termék más és más, változik a helyzet. A másik gond az anyagi minőség. Az additív gyártás anyagainak tulajdonságai jelenleg nem versenyezhetnek a hagyományos technológiával előállított megfelelőikkel, ezen felül az alkatrészen belül nem mindig homogén az anyagminőség.

Az additív gyártás lehetőségeit jól szemlélteti a „bioprinting” [2, 11. oldal]. Nem csak csontpótlást, protéziseket, de lágy szövetet, pl. emberi hólyagot is sikeresen gyártottak már ilyen technológiával. Ahhoz, hogy szervek is nyomtathatók legyenek, jelenleg a véredényrendszer nyomtatásának kérdésén dolgoznak a kutató orvosok.

Az additive3D.com [3] hírei között az egyik gyártó cég (Ford) a nem túl távoli jövőben azzal kecsegteti az olvasókat, hogy háztartási eszközeik elromlott alkatrészeit is pótolhatják igen gyorsan, a vonalkód ismeretében.

A Wholers cég honlapján található egyik szakcikk [5] bemutat egy additív technológiával végtermékként készült fém alkatrészt, amely egy hidraulikus rendszer része. Alakja is igen összetett, és igen nagy igénybevételeket kell elviselnie. Ez a példa mutatja, hogy nem csak műanyagból lehet additív gyártással alkatrészeket előállítani, hanem más anyagokból, például fémekből, kerámiából is, valamint kompozitok is készíthetők.

Az internetes keresők az „additive manufacturing” címszóra igen nagy számú weblap és képtalálatot adnak, amelyek ilyen technológiával készült termékeket mutatnak a gyermekjátéktól az orvosi, az autóiipari alkatrészeken keresztül a robotikai, művészeti, marketing és más alkalmazásokig. Láthatunk képet olyan gyárról is, amelyben egymás mellett számos 3D nyomtató működik (Stratasys).

Úgy tűnik, hogy a jövő mérnöke jó, ha már idejében ismerkedni kezd az additív gyártás lehetőségeivel.

1.2. Fontos kifejezések az additív gyártással kapcsolatban

Az additív gyártás anyaghozzáadással történő előállítás jelent. Ősidők óta így készülnek a házak sok kis téglá egymás mellé építésével, és nem egy nagy kőtömbből való kifaragással. A természet is így építkezik, midőn az élőlények sejtről sejtre fejlődnek ki. Ennek az eljárásnak az előnye, hogy nem, vagy alig keletkezik hulladék, és ez annál lényegesebb, minél értékesebb, vagy különlegesebb az anyag, amit felhasználunk. A gépészetben, ahol az anyagleválasztásos technikák uralkodóak (a fémmegmunkáló eljárások 80%-a ma is forgácsolás), az additív technológiák igazi forradalomnak számítanak.

Az additív gyártás célja kezdetben a termékfejlesztés során a kézbe vehető makett elkészítése volt, később tesztelésre alkalmas próba alkatrészek készítésére, míg napjainkban sok esetben a végtermék előállítására használják. Ennek megfelelően a megnevezésére használt kifejezések többször megújultak, jelenleg is egymás mellett élnek. Előfordul, hogy zűrzavar támad a sokféle elnevezés között. Néha vita alakul ki amiatt, hogy két kifejezés vajon egymás szinonímája, vagy jelentésük eltérő.

Általában az anyaghozzáadási technológiák összességét az alábbi kifejezésekkel illetik (forrás: [1] [3] [6]):

additive manufacturing (AM), additive fabrication (AF) – additív gyártás

freeform fabrication (FFF), solid freeform fabrication (SFF) – (magyarra nem fordítják)

3D printing (3DP) – három dimenziós nyomtatás, nem számít pontos szakkifejezésnek, de nagyon elterjedt. Vannak, akik ezt a kifejezést megkülönböztető értelemben csak az olcsóbb, kisebb pontosságú eljárásokra/berendezésekre használják.

rapid prototyping (RP) – gyors prototípus gyártás (a kezdeti időkben csak ezt használták) ma már elavultnak hangzik, ha a teljes témakört jelöljük vele, de más értelemben, csak a prototípus készítésre ma is pontos szakkifejezés.

Ha kifejezetten késztermék gyártásra gondolunk, akkor használjuk az alábbiakat:

direct digital manufacturing (DDM) – digitális gyártás

rapid manufacturing, toolness manufacturing, direct fabrication

A felhasználható anyagok gyarapodásával lehetőség nyílt olyan szilárdságú tárgyak elkészítésére, amelyek szerszámnak is alkalmasak. Az ilyen eljárások összefoglaló neve:

rapid tooling (RT) . gyors szerszámkészítés.

A további tájékozódást segíti az alábbi webcímen elérhető táblázat:

http://www.additive3d.com/nm_tab1.htm

Ebben a dolgozatban az „additív gyártás” elnevezést választjuk, és időnként a szóismétlés elkerülésére szinonimaként használjuk majd a „gyors prototípus gyártás” és a „3D nyomtatás” kifejezéseket.

1.3. A technológiák főbb csoportjai

Mielőtt a dolgozatunkban vizsgált eljárást részletesen bemutatnám, felsorolásszerűen megemlítem a leginkább elterjedt technológiákat. Ez a felsorolás érzékelteti majd, hogy az additív gyártás mennyire tág fogalom, és mennyire izgalmas, új területe a műszaki tudománynak.

LOM (Laminated Object Manufacturing) – rétegelt darabgyártás

A modern additív gyártási technológiák őstípusa, azért érdemes szólni róla, mert igen szemléletes, és alkalmas az eljárás lényegének megvilágítására. Célunk az, hogy egy számítógép segítségével (CAD szoftverrel) felépített/megtervezett tetszőleges alakú testet kézzelfogható formában elkészítsünk. A funkcionalitás itt nem fontos, csak a tapinthatóság, valódi térbeli megjelenítés. Az egyelőre még csak képzeletben és elektronikus formában létező testet gondolatban felbontjuk papír vékonyságú rétegekre. Ezek a rétegek papírból sorban kivághatók, ezt a kivágást általában CNC vezérlésű lézersugárral végzik. A kivágott rétegeket egymás tetejére ragasztják, így előáll a kézzelfogható test.

Selective Laser Sintering (SLS) - szelektív lézer szinterezés

A modellt ugyanúgy készítjük el elektronikus formában, és bontjuk rétegekre, mint a LOM esetében. A fizikai megvalósítás azonban teljesen más. A modell nyersanyaga por, amelyet rétegről rétegre lézer olvaszt össze egy testté. A felesleges por felveszörhető, később felhasználható. Használható műanyag és fémtárgyak készítésére, és polimer bevonítú öntőhomokból öntőformát is elő lehet állítani így.

Stereolithography (SL, SLA) . sztereolitográfia

A modell fotopolimerből (fényre szilárduló, eredetileg folyékony halmazállapotú anyag) lézerfény segítségével állítják elő szintén rétegről rétegre.

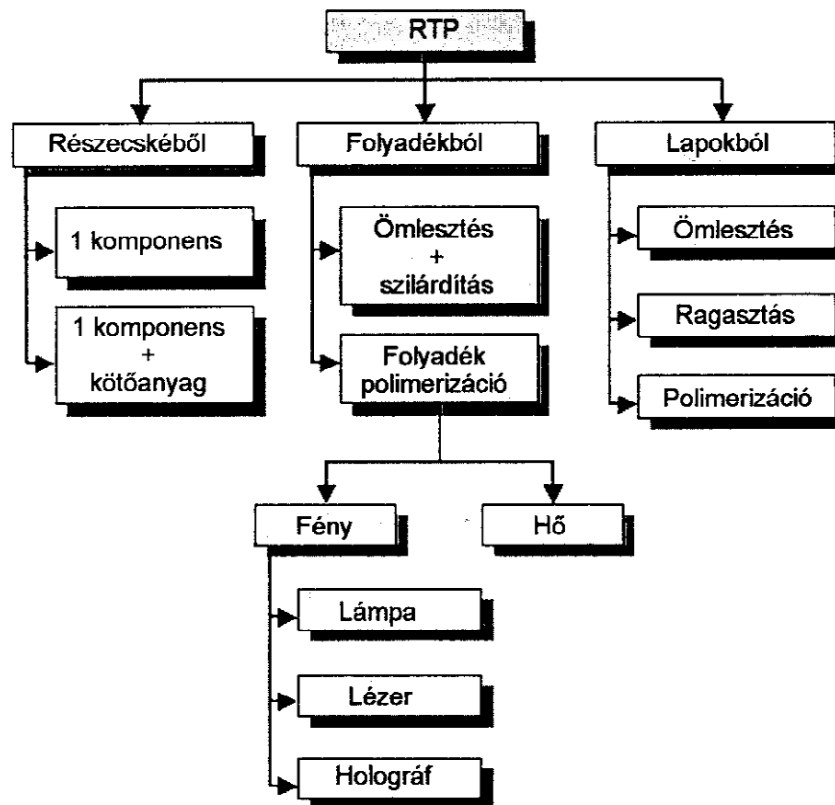
Fused Deposition Modelling (FDM) – cseppelvasztásos modellezés

A modellt hőre lágyuló anyagból készítik úgy, hogy a nyomtatófej egyik oldalán huzal formájában táplálják be az anyagot, a fej ebből cseppeket olvaszt le, és elhelyezi a modell megfelelő részén, ahol az lehűlve újra megszilárdul. Kompozit anyagok is készíthetők így, pl. kerámia vagy szálerősítésű műanyagok.

A rétegről-rétegre felépíthető fizikai modellek eljárásait fejlesztő mérnökök és tudósok a kezdetektől fogva szeretnék olyan olcsó és egyben termelékeny berendezést kialakítani,

amely megszüntetné a nagyvállalatok kiváltságos helyzetét, és a kis- és középvállalatoknak is elérhetővé tenné ezen eljárások előnyeit. Ilyen berendezés pl. a különböző gipsz alapú porokból építkező 3D Printer is, amely módszer alapjait a MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY (MIT - USA) kutatói dolgozták ki, elhagyva a költséges lézer egységek használatát.

A fenti, teljességre nem törekvő felsorolást egészíti ki az 1. ábra, amelyen az additív gyártási technológiák építkezési lehetőségei láthatók.



1. ábra Gyors prototípus gyártási módszerek építkezési elvei

Az összes additív gyártási technológiát megtestesítő berendezés közül 2011-ben a 3D nyomtatók részaránya elérte a 75-80%-ot. A korábban népszerű SLA és SLS technológiák észrevehető mértékben háttérbe szorultak, hiszen azok iparszerű környezetet igénylő, ma már fajlagosan költségesebb berendezéseik miatt. A 3D nyomtatók iránti érdeklődés rohamos mértékben nő, hiszen a különböző iparágak a legkülönbözőbb területeken tudják a 3D nyomtatók nyújtotta előnyöket kihasználni. Az Objet technológia 3D nyomtatási eljárás egyre nagyobb teret hódít a felhasználók körében. [7]

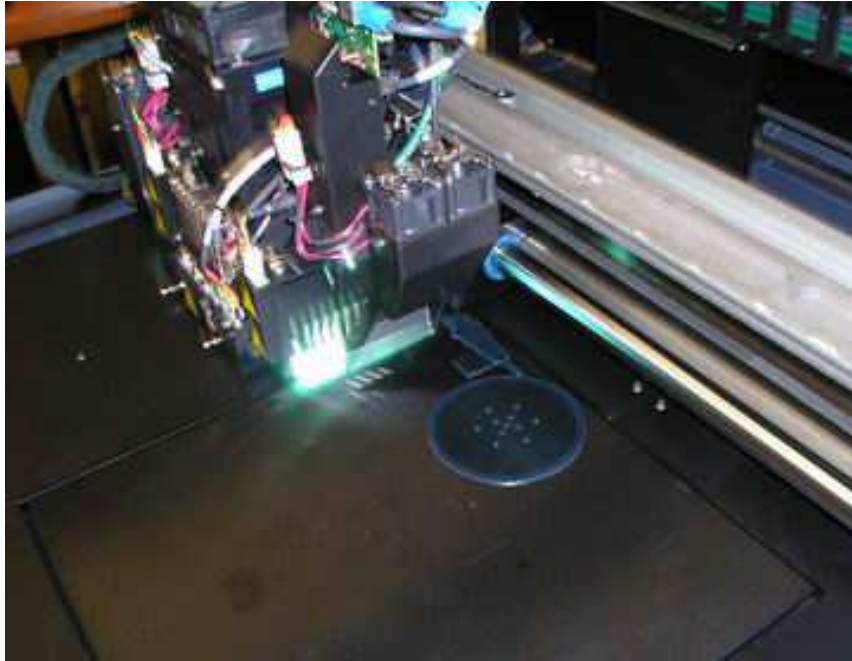
1.4. A Polyjet eljárás

Dolgozatomban olyan testeket fogok vizsgálni, amelyek a Nyíregyházi Főiskola Additív Gyártás Laboratóriumában készültek OBJET EDEN 350V berendezésen, PoliJet eljárással. Ezért erről részletesen írok a [4] és [7] források felhasználásával.

Az Izraelben tevékenykedő high-tech cég, az OBJET GEOMETRIES egy még újabb technológiai megoldással állt elő, kifejlesztett egy olyan eljárást, amely az összes eddig ismert RP technológia előnyét egyesíti és egyben az egyes technológiák kedvezőtlen tulajdonságait is kiküszöböli. Eljárásukat PolyJet néven szabadalmaztatták.

Az eljárás egyfelől ötvözi a már jól ismert sztereo litográfiai eljárás (SLA) kiváló anyagait, illetve a 3D Printing építkezési módszerét. A PolyJet tulajdonképpen egy speciális háromdimenziós nyomtatás, de az MIT módszeréhez képest itt a nyomtatófej a végleges modell anyagát rétegről-rétegre egymásra kinyomtatja. Az alapanyag fényérzékeny műgyanta (fotopolimer, mint az SLA eljárásnál), amelynek szilárdítását lézer helyett egy UV tartományban sugárzó fényforrással oldanak meg. Ez a megoldás jóval olcsóbb és gyorsabb, mint az SLA és a 3D Printing módszernél pontosabb és jobb szilárdsági paraméterekkel jellemezhető modellek gyártása válik lehetővé.

Az 2. ábrán, nyomon követhető, hogy az alapanyag térbeli alátámasztásához szükséges egy támaszanyag kinyomtatása is, ugyanis a levegőbe nem tudunk műgyanta cseppeket másképpen pozícióban megtartani, ennek színe fehér. Természetesen a felhasználónak a támaszték tervezésével, annak elhelyezésével nem szükséges foglalkoznia, hiszen a PolyJet eljárást megtestesítő, különböző munkatérrel rendelkező Eden gépcsalád vezérlései ezeket a feladatokat automatikusan megoldják akkor, amikor az STL fájl formátumú 3D modelleket a vezérlés előre felszeleteli. Megjegyzendő azonban, hogy a felhasznált támaszanyag mennyisége függ a modellnek a munkatérben való elhelyezésétől, ezért a nyomtatás előkészítésekor érdemes átgondoltan összeállítani a munkatér tartalmát,



2. ábra Polyjet eljárás nyomtatás közben a Nyíregyházi Főiskolán

1.4.1. Az STL fájl

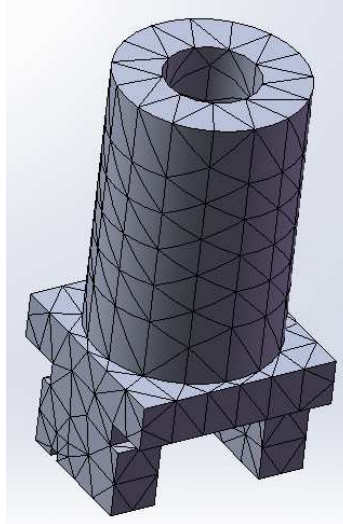
Lényegében az STL (standard triangulation language) ábrázolás a geometriai modell háromszögű síkfelületekkel (lapkákkal) való megközelítése, más szavakkal a geometriai modell határfelülete háromszögű síkfelületekkel (lapkákkal) van kirakva. Természetesen egy ilyen ábrázolás csak a sík határfelületeket követi hűen. Bármely görbe felület csak megközelíthetően követhető az STL ábrázolást alkotó háromszögű lapkák által (3. ábra). Minél sűrűbb ez a lapkarendszer annál pontosabb az ábrázolás. Egy geometriai modell STL ábrázolása egy fájlba van elmentve. Ez az STL fájl típus, amelynek két formátuma van. ASCII formátum (vagyis szöveges) illetve bináris. Az ASCII formátumú STL fájlok (állományok) sokkal nagyobbak, mint a bináris formátumúak, viszont előnyük, hogy az ember számára olvashatóak, megjeleníthetők egy közös szövegszerkesztővel.

Egy STL fájlban mindegyik háromszögű lapkának a következő adatai szerepelnek:

- a csúcsok (X, Y, Z) koordinátái
- a felülethez tartozó egy kifelé irányított normál vektor összetevői

Az STL fájlok egyik jelentős hátránya az, hogy sokkal nagyobbak, mint az eredeti más típusú fájlok. Ez azért van, így mert minden háromszög csúcsa legalább háromszor jelenik meg egy fájlban.

A testmodell STL formátumú leírása pontosabbá tehető a háromszögek méretének csökkentésével. A CAD szoftverek esetén általában megadhatunk egy hibahatárt, amelynél kisebb kell, hogy legyen az STL modell eltérése az eredeti alakzattól.



3. ábra STL modell

1.4.2. A modell elhelyezése a gyártótérben

Az Objet Studio programmal készítjük elő a forrás adatokat az EDEN 3D nyomtatóban való gyártáshoz. Ez a program lehetőséget biztosít többfajta művelet végrehajtására.

Az alap eljárás a következő:

1. Az alkatrész beillesztése a munkatérbe
2. Objektumok pozícionálása a munkaasztalon
3. Objektumok és a munkatér paramétereinek a beállítása
4. A berendezett munkatér minden paraméterének mentése .otf formátumban
5. Otf fájl küldése az EDEN 3D nyomtatóra

Az objektumok munkatérben való elhelyezése során nagyon fontos az X-Y-Z szabály betartása. Ez a szabály a modell külső (befoglaló) méreteire vonatkozik. Az X tengely irányában a fej oda-vissza nyomtat ezért a nyomtatási sebesség is ebbe az irányba a legnagyobb. Ezért az alkatrészek hosszabbik élét lehetőleg az X tengellyel párhuzamosan kell elrendezni. Mivel a Z irányban nyomtat a legpontosabban (16µm) a gép ezért ez az irány a legidőigényesebb. Ezért a magas alkatrészeket lehetőleg a legkisebb méretével kell ebbe az irányba igazítani. Mivel a printerfejek kb. 5cm szélesek az Y tengellyel párhuzamosan, így azokat az objektumokat, amelyek kisebbek, mint ez a méret a gép egy sávba fogja nyomtatni. Ebből az okból kifolyólag ajánlott az alkatrészt közép méretével az Y tengellyel párhuzamosan elrendezni.

A másik fontos a magasabbat balra szabály. Ezen szabály szerint a magas modelleket lehetőleg baloldalra kell elhelyezni, míg a többit csökkenő magasságba jobbra. Ez azért fontos mivel a nyomtató balról-jobbra nyomtat, és ha a magas alkatrészt jobbra helyeznénk el, akkor a nyomtatófejeknek üres járatot kellene végeznie az alkatrészek felett, hogy nyomtathassa a magasabb alkatrészeket. Ha a magasabb alkatrészt balra helyezzük el, akkor már csak azok felett mozog a nyomtatófej így rövidebb utat kell, bejárjon, és ez által csökken a nyomtatási idő.

1.4.3. A Polyjet eljárás gépei

Az OBJET cég összesen öt gépet fejlesztett ki különböző méretű munkatérrel, illetve különböző felhasználási módokra. Az Eden gépcsalád összefoglaló adatait mutatja a 1. táblázat.

	Műszaki paraméterek	Professzionális gépek		
		Eden500V	Eden350V	Eden350
Gépek	Tálca mérete, cm	50x40	35x35	35x35
	Munkaterület mérete, cm	49x39x20	34x34x20	34x34x20
	Építési sebesség, mm/óra/sáv	12/12	12/20	12
	Felbontás, dpi	600x600x1600	600x600x1600	600x600x1600
	Rétegvastagság, µm	30/16	30/16	16
	Nyomtató fejek száma, darab	8	8	8
	Kazetták száma, darab	4	4	2
	Kazetta súlya, kg	3,6	3,6	3,6
	Építhető elasztomer mérete, cm	49x39x20 (HS)	34x34x20 (HS)	31x25x10
Anyagok	FullCure720	+	+	+
	VeroWhite, VeroBlue, VeroBlack	+	+	+
	TangoBlack, TangoGray	+	+	+

1. táblázat. Eden gépcsald műszaki adatai

A PolyJet eljárást megvalósító berendezések sorában a nemrég bemutatott Eden 350V típusú berendezés ár/teljesítmény mutatója a hazai vállalkozások számára is költségghatékony megoldást biztosíthat a precíz prototípusok gyors előállítására (4. ábra). Ez a berendezés 340x340x200 mm méretű munkaterével akár több, különböző prototípust is képes egyszerre elkészíteni irodai környezetben, könnyen kezelhető módon.



4. ábra Objet EDEN 350V berendezés a Nyíregyházi Főiskolán

1.4.4. A Polyjet eljárás előnyei

A támaszanyag mechanikus úton is eltávolítható, illetve NaOH oldattal feloldható.

A PolyJet eljárás kész termékének (4. ábra) talán legfontosabb jellemzője az ultra vékony rétegvastagság, amely pontosan 16 μm (0,016 mm). Jelenleg a világon ez a legkisebb rétegvastagsággal, műanyag alapanyagból építkező RP eljárás!



5. ábra Polyjet eljárás kész terméke

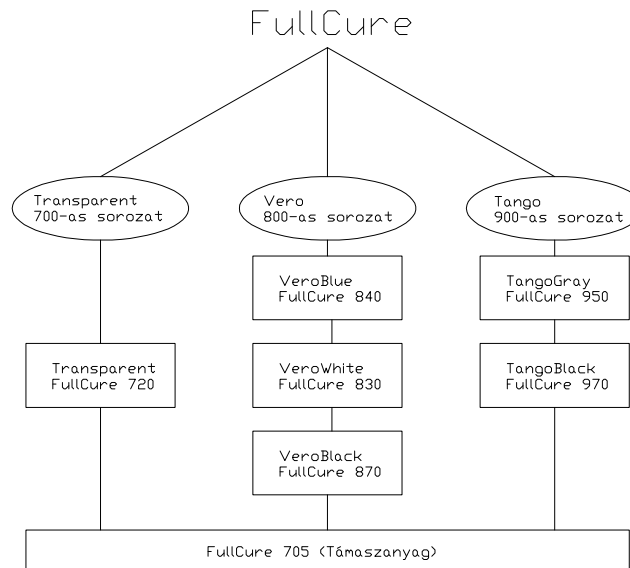
Ennek érzékeltetésére álljon itt az ismert eljárások szokásos rétegvastagságainak értéke:

- SLA 150-200 μm
- LOM 120-200 μm ,
- SLS 150 μm
- FDM 254-400 μm .

Ez nagyon fontos szempont akkor, amikor finom részleteket tartalmazó vagy vékony falvastagságú modelleket akarunk készíteni. Jellemző az eljárásra, hogy a Nyíregyházi Főiskolán 0,6 mm falvastagságú tégelyt sikeresen nyomtattak, a megrendelő megelégedésére! A gyártó által megadott pontosság 0,1-0,3 mm. Később látni fogjuk, hogy ennél nagyobb pontosságra is képes a berendezés.

1.5. A Polyjet eljárás során alkalmazott anyagok

Többféle alapanyag áll rendelkezésre, amelyek között, a kemény anyagok mellett, rugalmas alapanyagok is a felhasználó rendelkezésére állnak, bővítve az Objet/PolyJet eljárás felhasználásának körét (6. ábra).



6. ábra Az alapanyag változatok

A Transparent és a Vero modellanyagok képviselik a kemény, míg a Tango nevűek a rugalmas, elasztomer modellek anyagait. A TangoBlack 61, a TangoGray pedig 75 Shore A keménységű. Az 5. ábrából az is látszik, hogy az összes alapanyaghoz egyféle támaszanyagot fejlesztettek ki, nagyban megkönnyítve a felhasználók helyzetét, amikor alapanyagot kívánnak váltani. Nagyon kényelmes az alapanyagok betöltése és cseréje is, mert ezek zárt kazettában állnak rendelkezésre, melyeknek pótlása akár a gép működése közben is lehetséges (7. ábra).



7. ábra Az alapanyag betöltése

Az Objet Ltd. vékonyrétegű 3D nyomtatási eljárása gyakorlatilag egy új szabványt teremtett könnyű kezelhetőségével, szilárd anyagaival, a szokásosnál nagyobb pontosságával, a rendkívül vékony 16/30 mikronos rétegvastagságával és a támaszanyag egyszerű eltávolíthatóságával. A cégnél a fejlesztés folyamatosan folytatódik, annak érdekében, hogy minél szélesebb körben lehessen kihasználni az előnyöket.

Jelenleg a cég legfontosabb céljaul tűzte ki a kiváló nyomtatási technológia mellett a nyomtatható anyagok körének szélesítése is. Az idén mutatták be az új, teljesen átlátszó alapanyagukat, a VeroClear modellanyagot. Továbbfejlesztették a többi Vero alapanyagot is, ma már elérhető a 90-95C° hőállóságú, fehér színű alapanyag, amely például kiválóan alkalmas meleg vizes környezetben működő prototípusok nyomtatására is.

A kétkomponensű Objet Connex technológiai eljárás adta lehetőségek kihasználásával olyan alapanyagot is kifejlesztettek, amely a nyomtatás során két komponensből képes a műszaki gyakorlatban elfogadott ABS anyagminőségű alkatrészek egyszerű kinyomtatására. Az új alapanyag egyszerű hőkezelés után 90-95C°-ig hőálló és nagyon szívós, ütőmunka értéke 65-75 J/m. Ez az alapanyag teljesen új területeket nyit meg a 3D nyomtatás számára, hiszen a fröccsöntéssel készíthető alkatrészeinket szerszámozás költsége nélkül ki tudjuk nyomtatni, és a forma ellenőrzése mellett az alkatrésszel szemben támasztott funkcionális teszteket is le lehet folytatni. Ha nem felelne meg az alkatrész, akkor még szerszámmódosítás nélkül korrigálhatjuk alkatrészünket, szerszámgyártási átfutási időt és nem kevés költséget megtspórolva. Ezért is fontos kutatásokat végezni a nyomtatás pontosságával, valamint reprodukálásának minőségével kapcsolatosan.

1.6. Pontosság az additív gyártásban

A következő néhány fejezet a [3] forrás alapján készült.

Mivel az additív gyártással készült daraboknak egyre inkább funkcionálisnak kell lenniük, ezért egyre növekvő hangsúly helyeződik a geometriai pontosságra és az ismételhetőségre.

A pontosság kifejezés írja le azt, hogy a gyártórendszer által készített termék mennyire közelít egy bizonyos toleranciaértéket, egy megadott mérettartományon belül. Az ismételhetőség a rendszer kimenetének konzisztenciáját írja le. A felbontás pedig a rendszer legkisebb reprodukciós értékét jelenti.

Ez a három fogalom másodlagos bárki számára, aki termékeket tervez, vagy gyártási folyamatokat irányít. Az évek során sok mérnök mosta össze a felbontással kapcsolatos

fogalmakat, mint a rétegvastagság, vagy a dpi érték és pongyola megfogalmazással pontosságnak nevezte őket.

Az additív gyártótechnológiák megjelenésük után elsősorban koncepcionális modellezés célját szolgálták, így a különbség a pontosság és a felbontás között nem igazán számított. Egy korai gyors prototípusgyártó berendezés számára elég volt, ha az elkészült modellek dimenziói közelítőnek voltak nevezhetőek, és elérték a kívánt vizuális hatást.

Manapság azonban egy additív gyártórendszerrel sokkal többet várunk el. Rutinszerűen kell előállítaniuk funkcionális prototípusokat, sablonokat vagy akár végtermékeket is, melyeknek, állandó pontossági és ismételhetőségi kritériumoknak kell megfelelniük, mint a hagyományos megmunkálások esetén(pl.: a forgácsolás, fröccsöntés vagy éppen fémöntés).

1.7. A felbontás szerepe

A pontosság és a felbontás közötti kavargás érthető, ha azt az inkrementális elvet tekintjük, ahogyan az additív gyártórendszerek modelleket készítenek a CAD állományokból. Néhány rendszer termoplasztikus alapanyagokból olvaszt össze rétegeket. Mások fotopolimerekből építik fel a rétegeket, melyeket külső fényforrás szilárdít meg. Megint mások a keményítőtől a fémekig terjedő porszerű alapanyagot ragasztanak össze, vagy szintereznek.

Az építési módszertől függetlenül, legegyszerűbb lenne az inkrementális rétegvastagságot és a legkisebb előállítható geometria szélességét tenni a rendszer pontossági értékévé. Minél finomabb a felbontás (így szól a 'népi' vélekedés) annál pontosabb az adott darab.

Bizonyos körülmények között ez azonban nem feltétlenül állja meg a helyét. Néhány alkalmazási területen számít a felbontás, más területeken nem számít. A pontosságot tekintve a felbontás akkor válik kritikussá, ha az alkatrész egyes geometriái igen kisméretűek. Példaként, ha a geometria 0.0508mm méretű, a rendszer legfinomabb felbontása pedig 0.127mm. Ilyenkor a felbontás gátat szab az alkatrész geometriai pontosságának.

Ez a körülmény olyan alkalmazások esetén állhat fent, mint például az ékszerészeti minták területe, a mikro-áramlástan részegységek, melyek finom geometriai hűséget kívánnak meg, melyeket a nagyon nagy felbontással dolgozó rendszerek ki tudnak szolgálni. Mindazonáltal manapság ezek a területek mindössze kis töredékét adják az össze additív gyártási felhasználásnak. A legtöbb additív gyártórendszeren készülő alkatrészek a néhány centiméteres mérettől kezdődnek, a tűrési értékeik pedig akár a néhány tized milliméteres értéket is elérhetik.

Ha az additív gyártórendszerrel szemben támasztott legfontosabb követelmény az, hogy a lehető legfinomabb felületeket tudjon elkészíteni, akkor célszerű olyan rendszert választani, amely a rétegfelbontásban erős. A finom rétegfelbontás azonban nem jelent pontos modellt.

1.8. A pontosság felértékelődik

Amíg az additív gyártás a koncepcionális modellezés területéről indult, a terület egyre inkább a tolódik abba az irányba, hogy teljes értékű gyártási alternatívává váljon. Manapság az additív rendszerek feladatai közé nem csak a bemutatható és kipróbálható modellek elkészítése tartozik, hanem a végtermékek gyártása is.

Az FDM rendszereket például egyre inkább használják a gyártás területein sablonok, szerelékek és egyéb gyártósori eszközök költséghatékony elkészítésére. Az FDM rendszerek kis darabszámban képesek olyan modellek elkészítésére, amelyeket korábban fröccsöntéssel, vagy forgácsolással készítettek el. Ha arra törekszünk, hogy ezek a gyártási segédeszközök és végtermékek megfelelően működőképesek legyenek, a méretbeli pontosság az, amire törekednünk kell.

Mivel az additív módon készített alkatrészek olyan alkalmazásokban nyernek egyre inkább teret, ahol a funkcionális kívánalmak kihívást jelentenek, tűrési pontosság értékeiket hasonlóképpen definiálják, mint a hagyományos gyártási eljárások esetén. Ezeket a tűrési értékeket századmilliméterekben szokás megadni az adott geometriai méretre vonatkoztatva, nem pedig dpi vagy rétegvastagsági számokban.

Ugyanakkor a gyártási alkalmazásoknál egyetlen alkatrész pontossága csak egy a három kritikus érték közül. A másik kettő az adott pontosság ismételhetősége a további darabokon, valamint a darab dimenzióinak időbeli stabilitása.

1.9. Ismételhetőség

Az ismételhetőség döntő tényező egy adott additív gyártási alkalmazás esetén, ha ugyanazon alkatrész többféle változatainak kell beleesniük egyazon dimenzionális tűrési határok közé. Mint ahogyan a felbontás sincsen egyenes arányban a pontossággal, úgy a pontosság és az ismételhetőség között is különbséget kell tennünk. Néhány rendszer nagy pontossággal, de rossz ismételhetőségi tulajdonságokkal dolgozik.

Három ismételhetőségi megfontolást említ:

- Alkatrész és alkatrész között, egyazon építési cikluson belül, egyazon berendezésen

- Alkatrész és alkatrész között, különböző építési ciklusokon belül, egyazon berendezésen
- Alkatrész és alkatrész között, különböző építési ciklusokon belül, különböző berendezéseken

1.10. Hosszútávú stabilitás

Ha arról van szó, hogy az adott darab életciklusa hetekben, vagy években mérhető-e, az ismételhetőségi pontosság mindössze egyik karja a mérlegnek. Legalább olyan fontos az alapanyag stabilitása, amely a pontossági értékek időbeli megtartásáért felelős. A környezeti hatások, mint például a hőhatás, nedvesség és UV fény, valamint az additív folyamatok során keletkező esetleges belső feszültségek akár az alkatrészek zsugorodásához, nyúlásához, vagy csavarodásához is vezethetnek.

Néhány technológia olyan alapanyagokat használ (például fotopolimereket) amelyek dimenzionálisan kevésbé stabilak, mint a termoplasztikus műanyagok. Akkor is tapasztalható geometriai és mechanikai tulajdonságbeli változás, amikor a darab már kikerült a gyors prototípusgyártó berendezésből. Ugyanakkor az ipari termoplasztikus műanyagokból készült (mint az ABS vagy a polikarbonát) darabok esetén ilyen építés utáni változás nem jelentkezik.

A legjobb módja az additív gyártással készült darabok pontossági vizsgálatának a modellek különböző időtartományokban történő mérése. Ha olyan darabokra van szükség, amelyek a tűrési értékeiket hónapokon, vagy éveken keresztül is megőrzik, nem szabad elfogadni a frissen készített darabokon mért értékeket. Ilyenkor olyan méréssorozatra van szükség, amely egymást időben később követő mérések során bizonyítja, hogy a vizsgált alapanyag stabil.

1.11. Korábbi vizsgálatok síklapokkal határolt testekre

A Nyíregyházi Főiskola Műszaki Alapozó és Gépgyártástechnológiai Tanszékén korábban kocka alakú próbatestekre végeztek vizsgálatokat [8-12].

A vizsgálatok motivációja kettős volt. Az egyik a technológia mélyebb megismerése a későbbi hatékony alkalmazás érdekében. A másik, hogy az eljárás méretpontosságát számos tényező befolyásolja, mint például a hőmérséklet, a polimerizáció során bekövetkező zsugorodás, a modellt érő mechanikai hatások (pl. a simítás) stb. A gyártó által megadott pontosság értékek tájékoztató jellegűek.

A próbatestek élhosszúsága 20 mm volt, az alsó lapjukon olyan adaptert alakítottak ki, hogy mérőgépre könnyen rögzíthető legyen.

A felületi érdesség vizsgálatok [8] kimutatták, hogy a három különböző irányban mért felületi érdesség jellemzők markáns eltérést mutatnak egymástól. Legnagyobb a munkatérben értelmezett függőleges irányban a felületi érdesség.

A méretpontosság vizsgálata során kiderült, hogy ez a jellemző függ a munkatérben való elhelyezéstől. A nyomtatófej járásának irányában mindig nagyobb, függőleges irányban mindig kisebb let a méret a névlegeshez viszonyítva. A harmadik irányban lett a legnagyobb a szórás. Bár az első két esetben statisztikailag szignifikáns a névleges mérettől való eltérés, de annak mértéke kevesebb, mint 0.1 mm.

2. A dolgozat célkitűzései

Sok esetben az additív gyártással készített munkadarabok mérethelyessége és felületi minősége függ a munkatérben való elhelyezéstől, ezért fontos egy ilyen eszköz esetén munkatapasztalatokat gyűjteni és kutatásokat végezni e témában. Sík felületű próbatestekkel korábban zajlottak ilyen jellegű vizsgálatok, de görbült felületűekkel nem. Hengerszimmetrikus próbatestek lehetőséget adnak a pontosság és a felületi érdesség irányfüggésének részletesebb vizsgálatára.

A tudományos diákköri munkámban célul tűzöm ki a Nyíregyházi Főiskola Műszaki Alapozó és Gépgyártástechnológiai Tanszékének Additív Gyártás Laboratóriumában működő OBJET EDEN 350V típusú gyártóeszközzel készített, hengerszimmetrikus munkadarabok mérethelyességének és felületi minőségének elemzését.

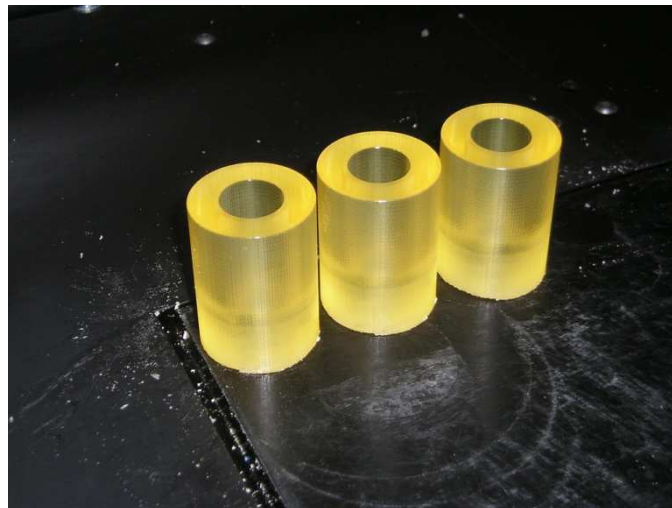
A vizsgálatok céljára speciális alakú próbatesteket tervezek, amelyek alkalmasak számos különböző méret és felület típus vizsgálatára. A próbatesteket legyártom a 3D nyomtatóval, majd megtisztítom azokat. Ezt követően szemrevételezéssel, kézi eszközökkel, 3D koordináta mérőgéppel, majd felületi érdesség mérővel végzem el a méréseket, vizsgálatokat.

A kiértékelést statisztikai módszerekkel végzem el. Vizsgálom a méretbeli hibáknak, valamint a felületi érdességnek a térbeli eloszlását, illetve a munkatérben való elhelyezéstől való függését.

3. A próbatestek

Mindegyik próbatest $\varnothing 30 \times 30$ mm külső és $\varnothing 20 \times 30$ belső átmérővel rendelkezik. A henger alján elhelyezett fülek egy, kettő, illetve három bevágást tartalmaznak. Ezek hármas szerepet töltenek be. Egyrészt a próbatestek azonosítására szolgálnak, másrészt a mérőgépben való pontos elhelyezést biztosítják, illetve harmadrészt a testek orientációját is meghatározzák aszimmetrikus elhelyezkedésük miatt.

A gyártáskor a „mate” opciót használtuk, ami azt jelenti, hogy a támaszanyag teljesen körülveszi a készterméket. Ilyenkor a legyártott alkatrészek felülete matt lesz, nem pedig fényes, viszont a legnagyobb méretpontosság így várható.



8. ábra A próbatestek tisztítás előtt



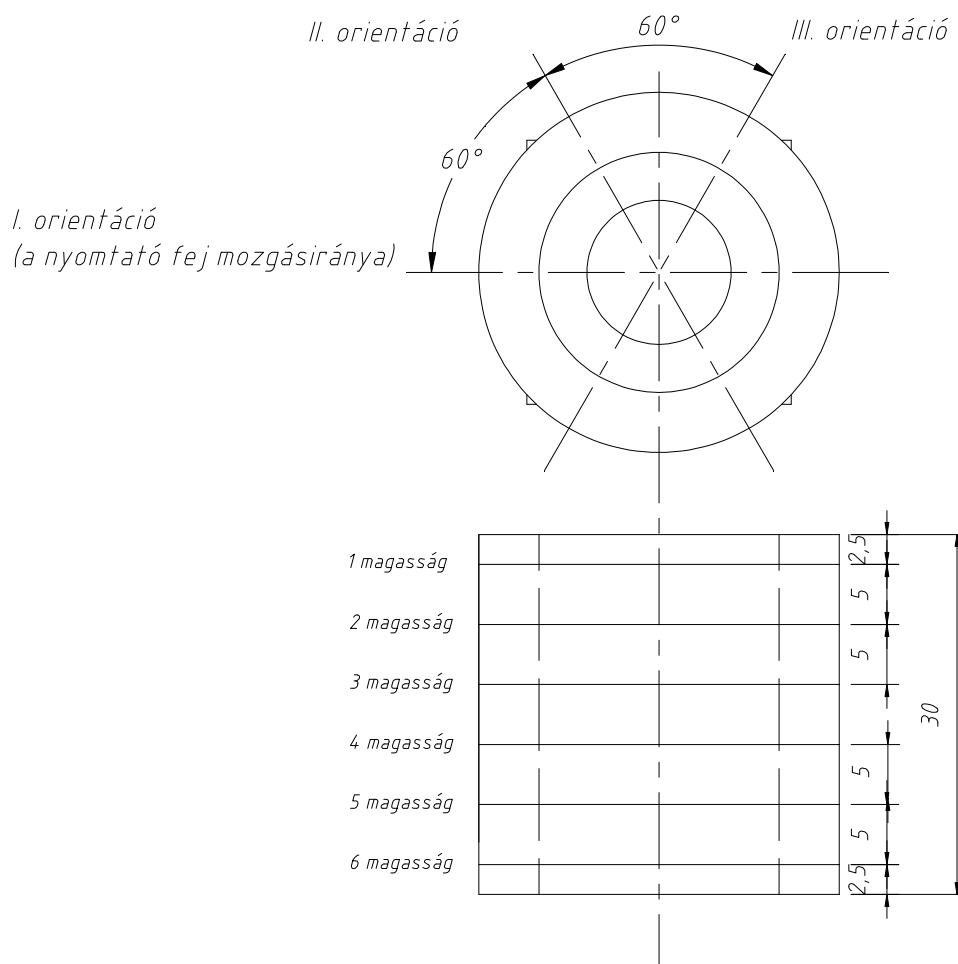
9. ábra A próbatestek tisztítás után

4. Mérések

A henger alakú próbatesteken Mitutoyo MDC-M25 digitális mikrométerrel mértem a külső átmérőket. A belső átmérőket Mitutoyo 2 pontos mérőórás furatmikrométer segítségével mértem meg. Mindhárom próbatesten 3 irányban mértem meg a külső és belső átmérőket a palástfelület 6 különböző magasságában.

Az I. orientáció merőleges a henger alján elhelyezett fülre. Ehhez képest a II. orientáció 60° -kal elforgatva, majd újabb 60° -kal a III. orientáció.

4.1. Mérési helyzetek



10. ábra Mérési helyzetek ábrázolása

A továbbiakban a 10. ábrán bevezetett jelöléseket alkalmazom a mérési adatok csoportosítására.

Minden mérési adathoz négy paraméter tartozik:

- a próbatest sorszáma (1; 2; 3)
- orientáció (I; II; III)
- mérési magasság (1-6)
- megmért adat (külső vagy belső átmérő)

4.2. A külső átmérőn mért méretek

1. próbatest

orientáció	Mérési magasságok							
	1	2	3	4	5	6	átlag	szórás
I	30,03	30,02	30,02	30,02	30,01	30,01	30,0167	0,00516
II	29,99	29,98	29,97	29,96	29,95	29,95	29,9667	0,01633
III	29,95	29,94	29,94	29,92	29,91	29,92	29,93	0,01549

2. próbatest

orientáció	Mérési magasságok							
	1	2	3	4	5	6	átlag	szórás
I	30,03	30,03	30,03	30,03	30,02	30,02	30,0267	0,00516
II	29,99	29,98	29,97	29,96	29,96	29,94	29,9667	0,01751
III	29,97	29,95	29,95	29,92	29,9	29,91	29,9333	0,02733

3. próbatest

orientáció	Mérési magasságok							
	1	2	3	4	5	6	átlag	szórás
I	30,03	30,03	30,02	30,02	30,02	30,01	30,0216	0,00632
II	29,99	29,98	29,96	29,96	29,94	29,93	29,96	0,0228
III	29,94	29,94	29,93	29,92	29,91	29,91	29,925	0,01378

2. táblázat. A külső átmérőn mért adatok mm egységben, azok átlagai és szórásai

4.3. A belső átmérőn mért méretek

1. próbatest

orientáció	Mérési magasságok							
	1	2	3	4	5	6	átlag	szórás
I	19,97	19,96	19,95	19,95	19,95	19,96	19,9567	0,00816
II	19,98	19,97	19,96	19,96	19,96	19,96	19,965	0,00837
III	20	19,99	19,98	19,99	19,99	19,98	19,9883	0,00753

2. próbatest

orientáció	Mérési magasságok							
	1	2	3	4	5	6	átlag	szórás
I	19,98	19,97	19,97	19,96	19,95	19,96	19,965	0,01049
II	19,98	19,97	19,96	19,96	19,96	19,96	19,965	0,00837
III	20	19,98	19,99	19,99	19,99	19,99	19,99	0,00632

3. próbatest

orientáció	Mérési magasságok							
	1	2	3	4	5	6	átlag	szórás
I	19,98	19,97	19,96	19,96	19,96	19,96	19,965	0,00837
II	19,96	19,96	19,95	19,95	19,95	19,96	19,955	0,00548
III	19,99	19,99	19,98	19,99	19,99	19,98	19,9867	0,00516

3. táblázat. A belső átmérőn mért adatok mm egységben, azok átlagai és szórásai

A mért adatokból átlagot és szórást számoltam. Megállapítható, hogy minden egyes mért adat, és azok átlagai is kevesebb, mint 0,05 mm-rel térnek el a névleges 20 illetve 30 mm átmérő értékektől. Ez összhangban van a gyártó által megadott gyártási pontossággal (0,1-0,3 mm).

A külső átmérőn I. irányban a névleges értéktől csak nagyobb mért adatokat kaptam, és a szórás lényegesen kisebb a többi irányhoz viszonyítva. Az átlag ebben az esetben áll legközelebb a névleges értékhez, nyilván az adatoknak erre közel szimmetrikus eloszlása miatt.

A II. mérési irányban minden mért adat kisebb, mint 30 mm, a szórás értéke magasabb. A III. irányban minden mérési eredmény kisebb a névleges értéknél, a szórás itt is magas.

A fentiekből az következik, hogy az átmérőkben jelentkező eltérés elsősorban attól függ, hogy mely irányban, másodsorban pedig attól, hogy mely magasságban mértem azt, és nem attól, hogy mely munkadarabon.

4.4. Átrendezett mérési adatok

A kapott eredményeket orientációk szerint átrendeztem.

4.4.1. Külső átmérőn mért adatok

1. orientáció

Próbatest	Mérési magasságok						átlag	szórás
	1	2	3	4	5	6		
1.	30,03	30,02	30,02	30,02	30,01	30,01	30,0211	0,00676
2.	30,03	30,03	30,03	30,03	30,02	30,01		
3.	30,03	30,03	30,02	30,02	30,02	30,01		

2. orientáció

Próbatest	Mérési magasságok						átlag	szórás
	1	2	3	4	5	6		
1.	29,99	29,98	29,97	29,96	29,95	29,95	29,9644	0,01822
2.	29,99	29,98	29,97	29,96	29,96	29,94		
3.	29,99	29,98	29,96	29,96	29,94	29,93		

3. orientáció

Próbatest	Mérési magasságok						átlag	szórás
	1	2	3	4	5	6		
1.	29,95	29,94	29,94	29,92	29,91	29,92	29,9294	0,01893
2.	29,97	29,95	29,95	29,92	29,9	29,91		
3.	29,94	29,94	29,93	29,92	29,91	29,91		

4. táblázat. A külső átmérőn mért adatok orientáció szerint rendezve mm egységben, azok átlagai és szórásai

4.4.2. Belső átmérőn mért adatok

1. orientáció

Próbatest	Mérési magasságok							
	1	2	3	4	5	6	átlag	szórás
1.	20	19,99	19,98	19,99	19,99	19,98	19,9883	0,00753
2.	20	19,98	19,99	19,99	19,99	19,99	19,99	0,00632
3.	19,99	19,99	19,98	19,99	19,99	19,98	19,9867	0,00516

2. orientáció

Próbatest	Mérési magasságok							
	1	2	3	4	5	6	átlag	szórás
1.	19,98	19,97	19,96	19,96	19,96	19,96	19,965	0,00837
2.	19,98	19,97	19,96	19,96	19,96	19,96	19,965	0,00837
3.	19,96	19,96	19,95	19,95	19,95	19,96	19,955	0,00548

3. orientáció

Próbatest	Mérési magasságok							
	1	2	3	4	5	6	átlag	szórás
1.	19,97	19,96	19,95	19,95	19,95	19,96	19,9567	0,00816
2.	19,98	19,97	19,97	19,96	19,95	19,96	19,965	0,00837
3.	19,98	19,97	19,96	19,96	19,96	19,96	19,965	0,00837

5. táblázat. A belső átmérőn mért adatok orientáció szerint rendezve mm egységben, azok átlagai és szórásai

Megvizsgáltam, hogy a 20 mm, illetve 30 mm névleges értéktől való eltérés az egyes esetekben statisztikailag szignifikáns-e. Ehhez egymintás t-próbát használtam, mert a sokaság varianciája nem ismert, azt a minták szórásával közelítettem. [14]

Az általam választott szignifikanciaszint 0,05, a névleges érték $m_0=20$ illetve $m_0=30$ mm, a minta darabszáma $n=18$, így a szabadsági fok $v=n-1=17$.

A próbastatisztika:

$$t = \frac{\bar{x} - m_0}{s} \sqrt{n} . \quad (1)$$

Az (1) képletben az „s” a 2. illetve 3. táblázatból kiolvasható empirikus szórásokat jelenti. Az általunk választott szignifikanciaszinten a t statisztika határértéke $t_{\text{limit}}=2,11$ [7]. Ha $|t| < t_{\text{limit}}$, akkor az eltérés nem szignifikáns, egyébként igen.

A kiszámított értékek a belső átmérőre a következők:

$$\begin{aligned} t_I &= -7,8112 \\ t_{II} &= -21,958 \\ t_{III} &= -2,1449 \end{aligned} \quad (2)$$

A kiszámított értékek a külső átmérőre a következők:

$$\begin{aligned} t_I &= 13,2425 \\ t_{II} &= -8,289 \\ t_{III} &= -15,8231 \end{aligned} \quad (3)$$

Ez alapján azt állíthatjuk, hogy mindhárom irányban a gyártott méret statisztikailag szignifikánsan eltér a névleges értékétől 0,05 szignifikanciaszinten.

4.5. A mikrométerrel végzett mérésekből levont következtetések

A mérések eredményei és a statisztikai próbával kimutatott szignifikáns eltérések kapcsolatba hozhatók a nyomtató gyártási technológiájával.

Az I. irány a nyomtató fej járásának iránya, az ezzel párhuzamos irányban végzett mérések eredménye minden esetben nagyobbak adódtak az előírtnál. Ennek oka a simítás hatása lehet.

A munkaasztaltól nagyobb távolságban ez az eltérés egyre nagyobb. Ez megfigyelhető a 4. illetve a 5. táblázat oszlopainak összevetésével.

A II. illetve III. irányban minden mért adat kisebb a névleges értéknél.

4.6. 3D koordináta mérés

A mikrométerrel végzett kézi mérések, és azok kiértékelése rámutatott arra, hogy a vizsgált méretek elsősorban az orientációtól, és kisebb mértékben a mérési magasságoktól függenek.

Annak érdekében, hogy az eltéréseket alaposabban megvizsgálhassam nagyobb mérési adathalmaz felvételét határoztam el.

Ezt azonban már nem kézi mérőeszközzel, hanem Aberlink Axiom too CNC 3D koordináta mérőgéppel végeztem el.

A gép mérési tartománya: x=640; Y=900; Z=500 mm.

Pontosság: $3,5\mu\text{m} + \frac{L}{250\text{mm}}$

Esetünkben a legnagyobb méret L=30mm, így a mérés pontossága 3,62 μm . Mivel ez egy nagyságrenddel kisebb, mint az átmérőkben kimutatott, néhány század milliméteres eltérések, arra számítok, hogy a mérőgéppel felvett adatok értékelhetők lesznek.



11. ábra Aberlink Axiom too CNC 3D koordináta mérőgép

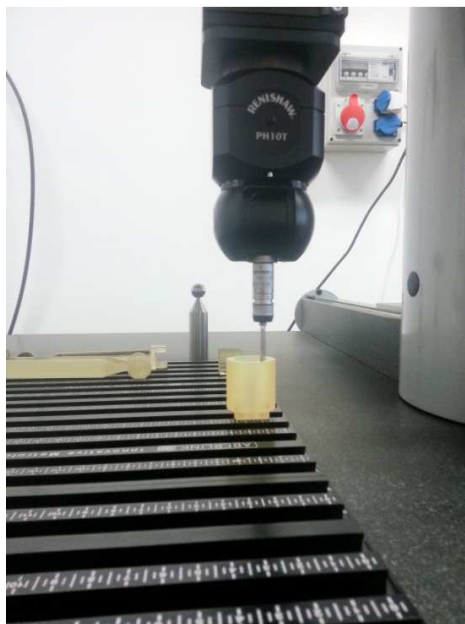
4.7. A mérőgéppel végzett mérés menete

A mérés megkezdése előtt behelyeztem a munkatérbe a három próbatestet, az alján kialakított fülek segítségével, mely a 12. ábrán látható.



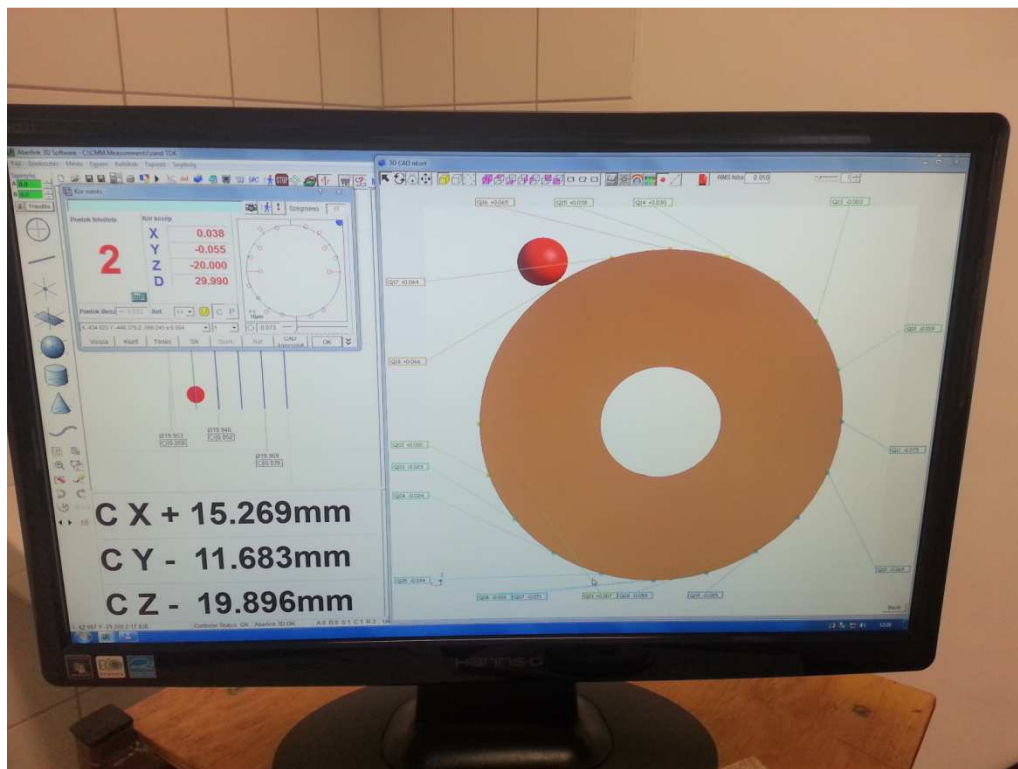
12. ábra A koordináta mérőgépben elhelyezett próbatestek

A programozás megkezdése előtt kalibrálom a gépet, a mérőgép munkaterében elhelyezett kalibráló gömb segítségével. Ezek után felveszek egy síkot a henger tetejére. Ettől a síktól 2,5mm-re felveszek egy újabb síkot majd 5mm osztásközzel öt további síkot. Ezeken a síkokon mérem meg a külső illetve belső átmérőket 20-20 pontban mind a három testen. A méréseket a 15. ábrán látható 0°-nál kezdtem mindhárom test esetében. Az ábrán látható, hogyan helyezkedett el a test a nyomtatóban.



13. ábra A koordináta mérőgép tapintás közben

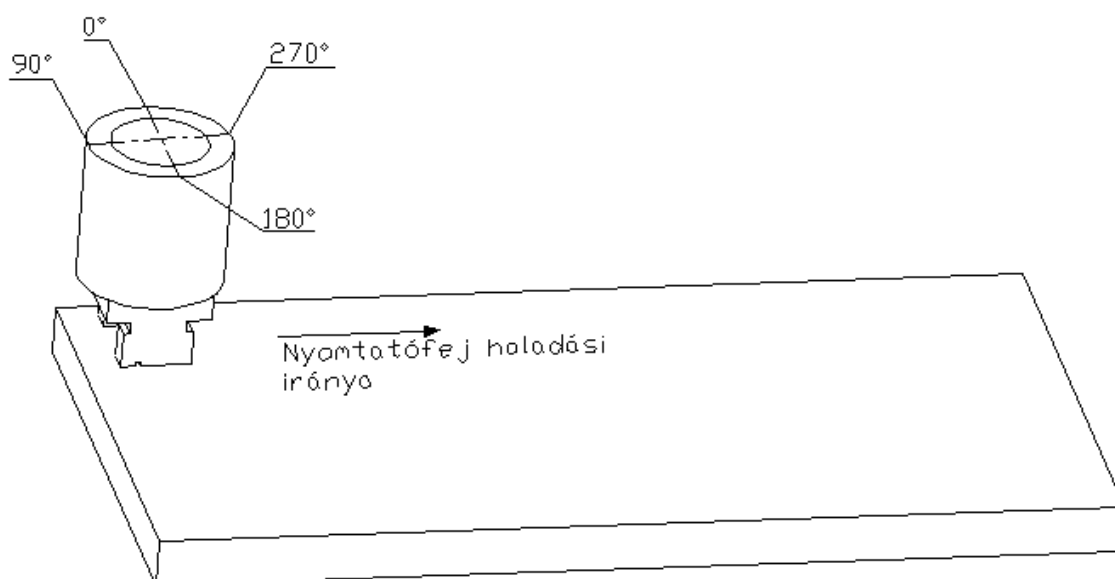
Az így kapott eredményeket a számítógép segítségével feldolgoztam.



14. ábra A koordináta mérő gép szoftvere

A kimentett adatok a következők voltak:

- mindhárom próbatest különböző mélységeiben mért külső- illetve belső átmérők
- köralakúság mértéke
- az átlagtól való eltérések értékei minden egyes pontban



15. ábra Mérési pontok szemléltetése

Mivel nagy számú mérési adat felvételére került sor, illetve azok táblázatos és grafikus megjelenítése terjedelmes, a mérőgéppel végzett mérések eredményeit az 1. számú melléklet tartalmazza. A következő fejezet a melléklet megtekintése után jobban érthető.

4.8. A mérések kiértékelése

Az 1. számú mellékletben található diagramok illetve táblázatok alapján végeztem el az adatok kiértékelését.

Jól látható a D1.1, D2.1 illetve a D3.1 diagramokon, hogy az átlagtól való legnagyobb eltérések 90° illetve 270° környezetében láthatók. Ennek oka a nyomtatófejben elhelyezett simító henger, melynek hatására a nyomtatófej belépő szögénél (90° -nál) az átlagtól kisebb értékeket, míg a kilépő szögénél (270° -nál) az átlagtól nagyobb értékeket kapunk. Ezek az eltérések megfigyelhetők a D1.3, D2.3 illetve a D3.3 diagramokon is.

A D1.4, D2.4 és a D3.4 diagramokon a belső felületek eltérései figyelhetők meg az átlagtól. Jól látható, hogy itt pont fordított a helyzet, hiszen a simító henger be- illetve kilépési szöge megcserélődik, így az átlagtól való eltérések is felcserélődnek. A 90° -os mérési helyzetnél figyelhető meg, hogy az átlagtól csak nagyobb eltéréseket kapunk, míg 270° -nál az átlagtól kisebbeket. Ezek az eltérések megfigyelhetők a D1.6, D2.6 illetve a D3.6 diagramokon is.

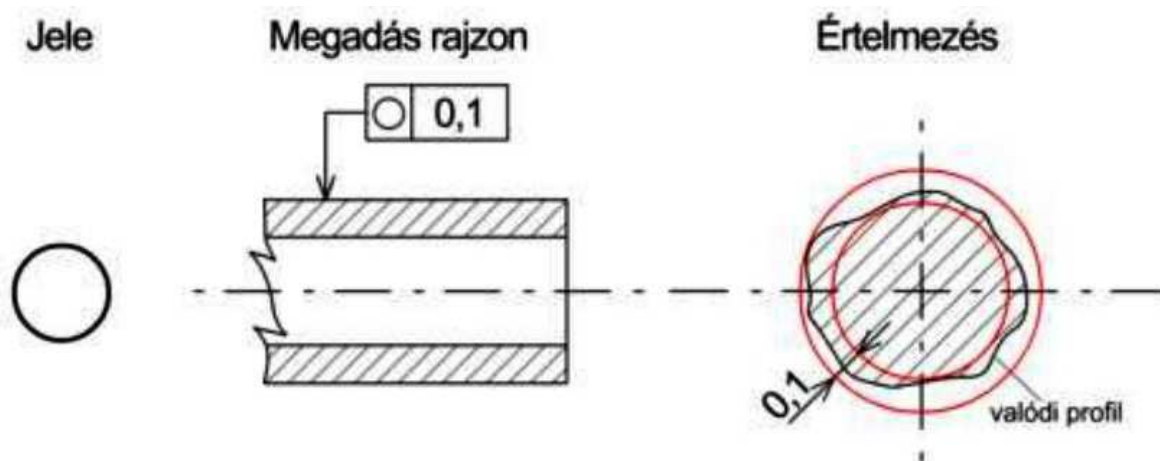
A D1.2, D2.2, D3.2 diagramokon látható, hogy a külső felületek eltérései csak negatív értékeket mutatnak, illetve a munkaasztaltól távolabb egyre közelebb vannak az átlaghoz.

A D1.5, D2.5, D3.5 diagramokon a belső felületek eltérései láthatók, melyek csak pozitív eltérést mutatnak, illetve itt is megfigyelhető, hogy a munkaasztaltól távolodva csökken az eltérések mértéke az átlagtól.

4.9. A köralakúság vizsgálata

Az 1. számú mellékletben közölt adatok gépi feldolgozása során a munkadarabok különböző magasságaiban vett metszetein megjelenő külső és belső körök alakhelyessége is vizsgálható, melyet a 2. számú melléklet tartalmaz.

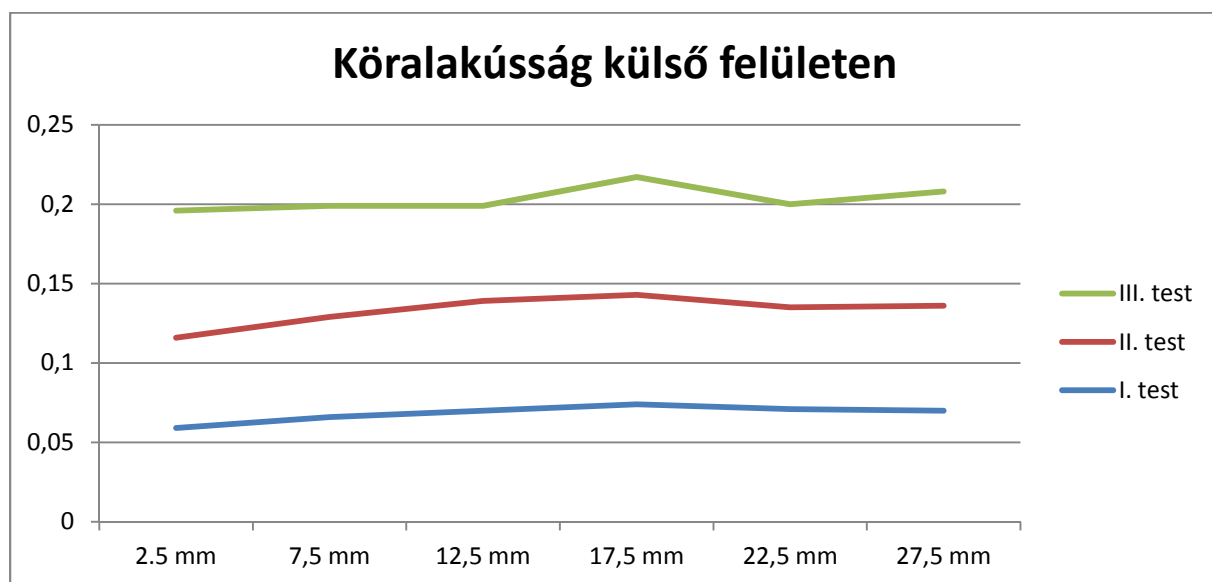
A köralakúság vagy más néven köralak-eltérés a ráfekvő kör és a valóságos profil legnagyobb távolsága sugárirányba. Minél nagyobb ez a szám, a valós profil annál jobban eltér a köralaktól (16. ábra).



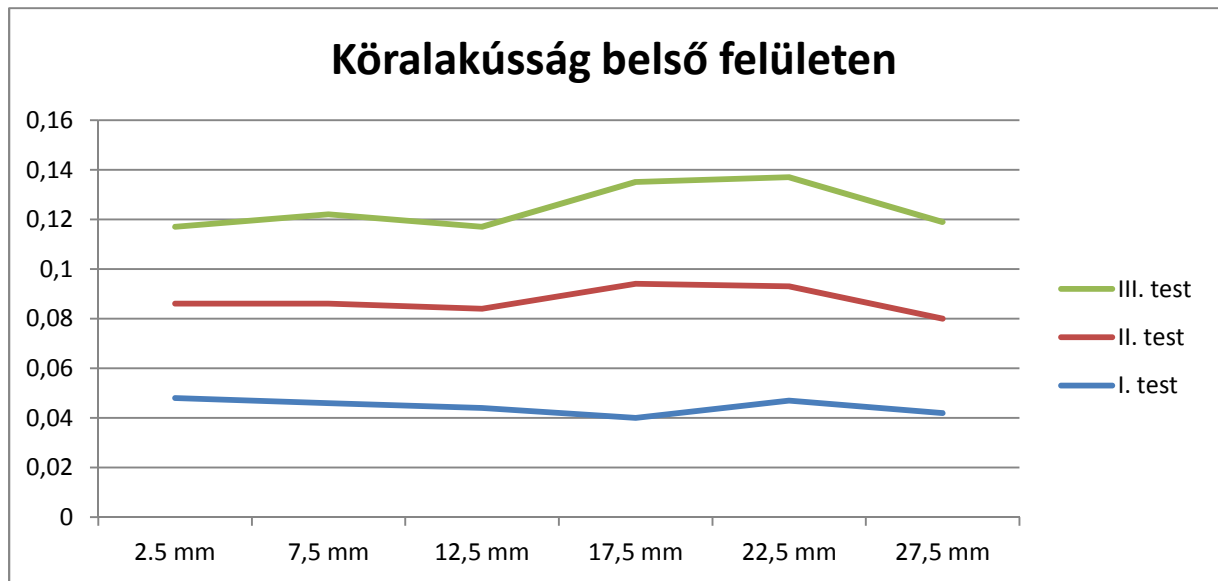
16. ábra Köralakúság értelmezése

Mélység	I. test				II. test				III. test			
	D	○	D	○	D	○	D	○	D	○	D	○
2,5 mm	Ø29.980	0,059	Ø19.967	0,048	Ø29.980	0,057	Ø19.960	0,038	Ø29.978	0,08	Ø19.959	0,031
7,5 mm	Ø29.965	0,066	Ø19.960	0,046	Ø29.963	0,063	Ø19.961	0,04	Ø29.966	0,07	Ø19.959	0,036
12,5 mm	Ø29.961	0,07	Ø19.954	0,044	Ø29.966	0,069	Ø19.951	0,04	Ø29.962	0,06	Ø19.952	0,033
17,5 mm	Ø29.965	0,074	Ø19.944	0,04	Ø29.967	0,069	Ø19.935	0,054	Ø29.965	0,074	Ø19.938	0,041
22,5 mm	Ø29.950	0,071	Ø19.942	0,047	Ø29.955	0,064	Ø19.946	0,046	Ø29.951	0,065	Ø19.944	0,044
27,5 mm	Ø29.951	0,07	Ø19.931	0,042	Ø29.944	0,066	Ø19.946	0,038	Ø29.949	0,072	Ø19.933	0,039

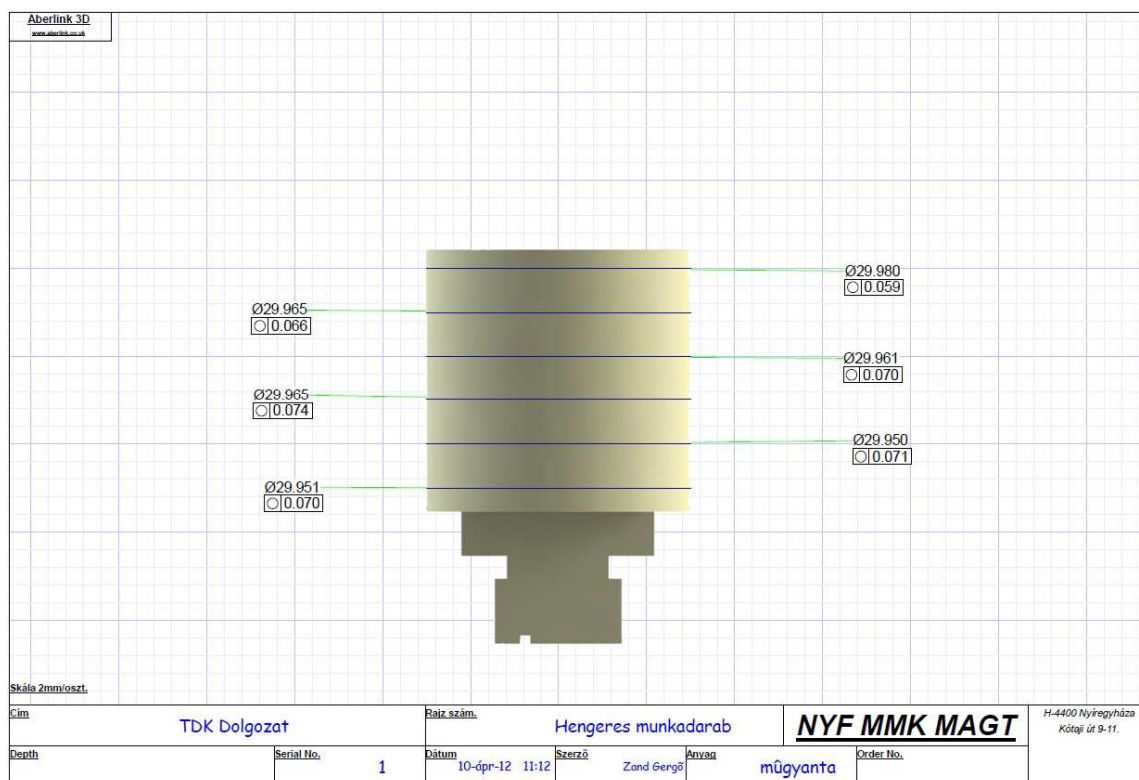
6. táblázat. A külső- belső átmérőn mért átmérők illetve köralakúság értékei



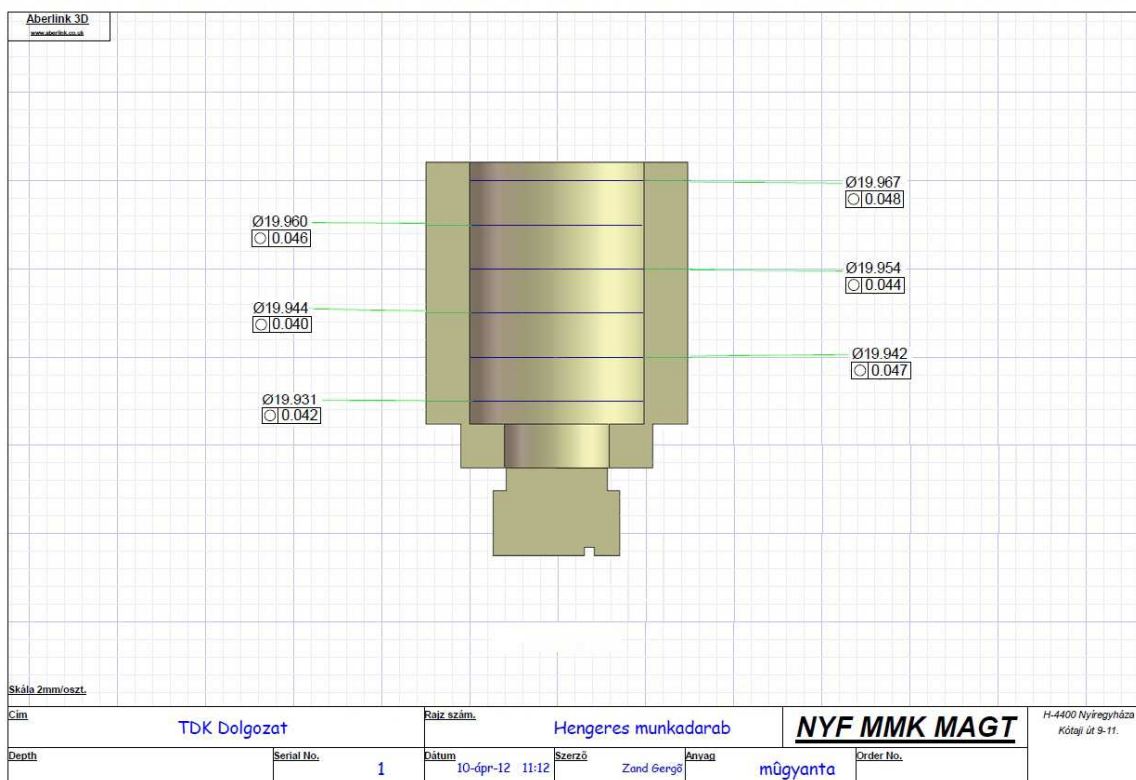
17. ábra Köralakúság külső felületen



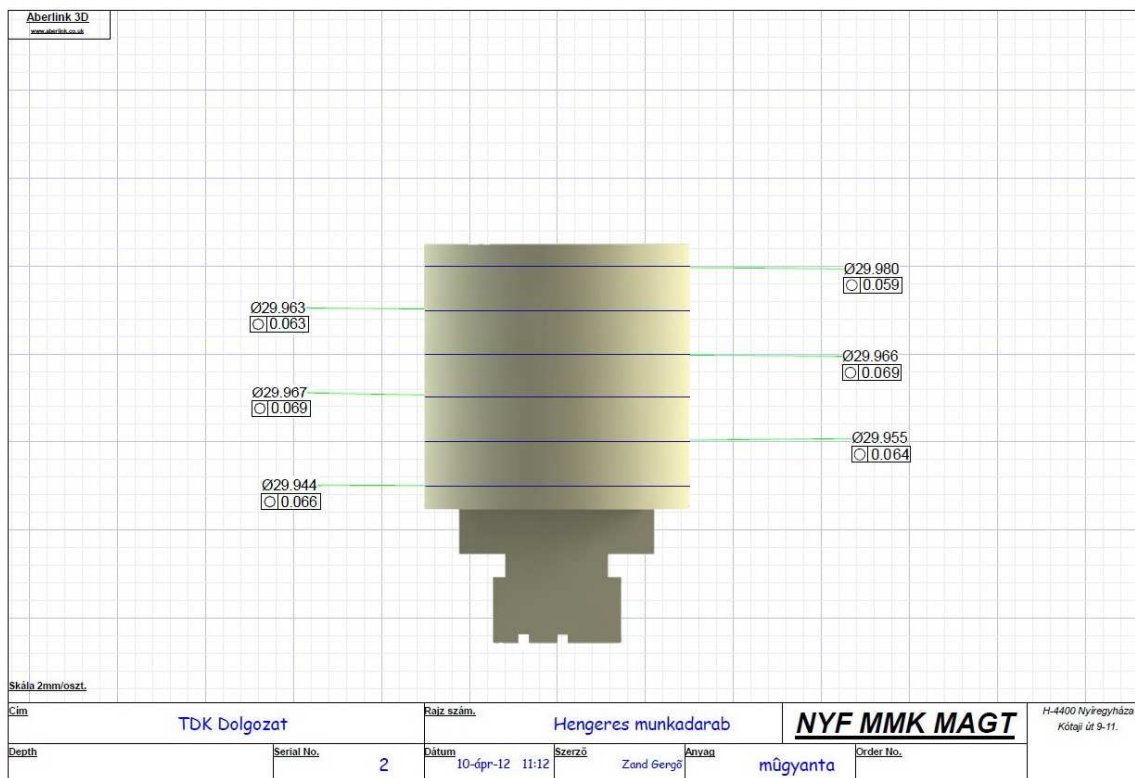
18. ábra Köralakútság belső felületen



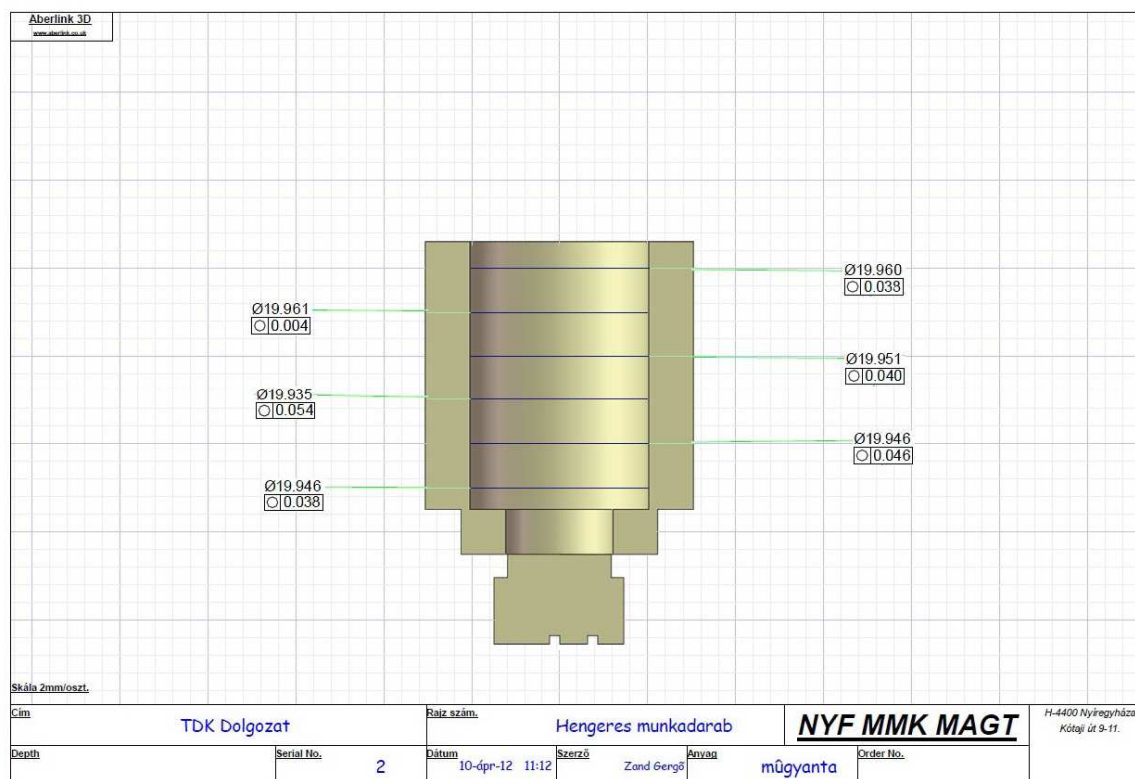
19. ábra 3D koordináta mérőgép által mért 1. test külső átmérők



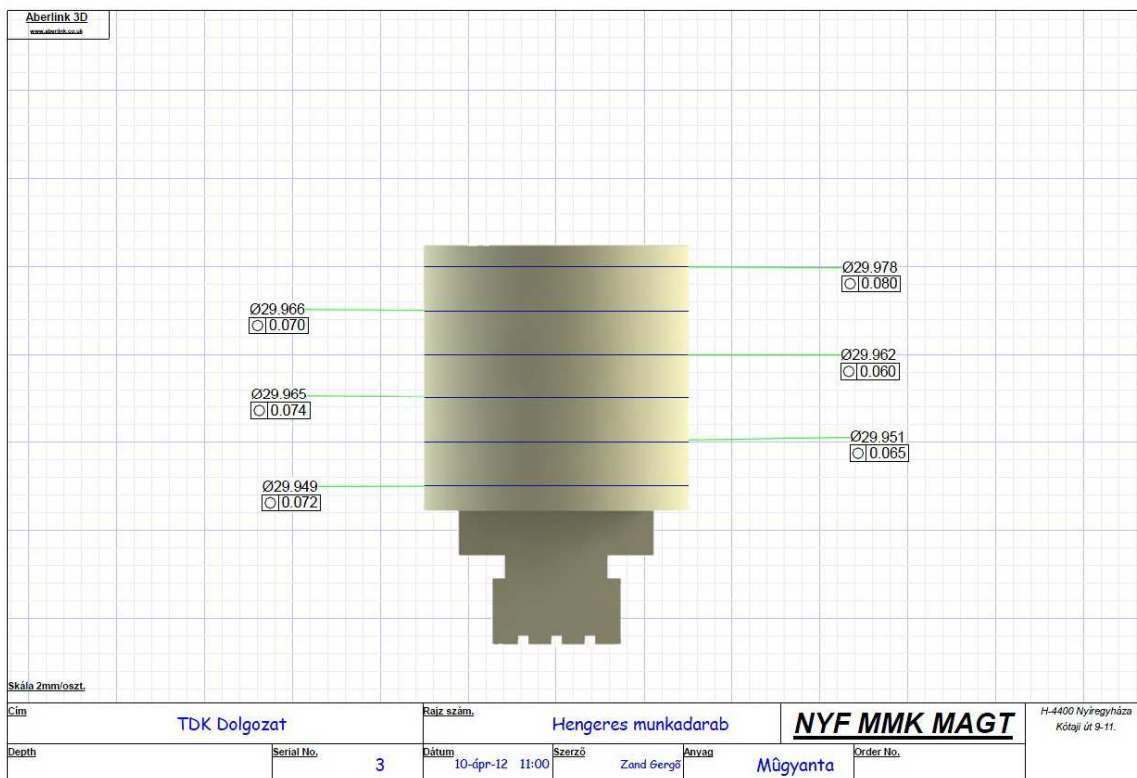
20. ábra 3D koordináta mérőgép által mért 1. test belső átmérők



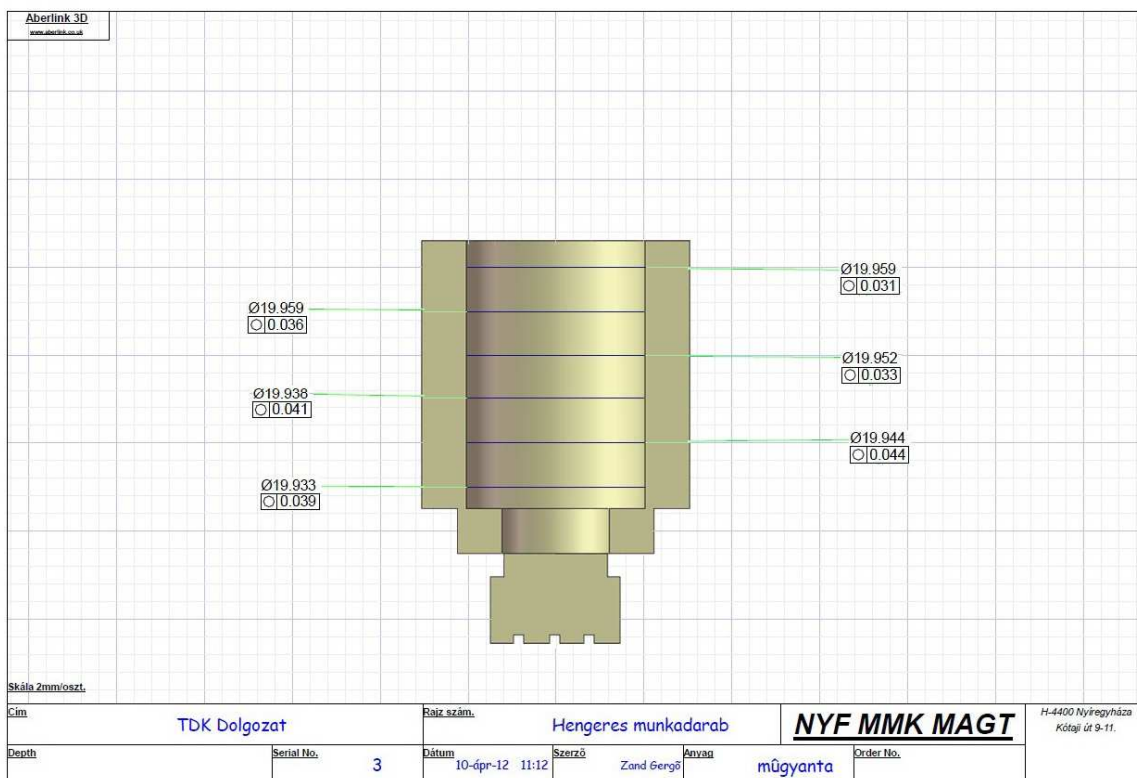
21. ábra 3D koordináta mérőgép által mért 2. test külső átmérők



22. ábra 3D koordináta mérőgép által mért 2. test belső átmérők



23. ábra 3D koordináta mérőgép által mért 3. test külső átmérők



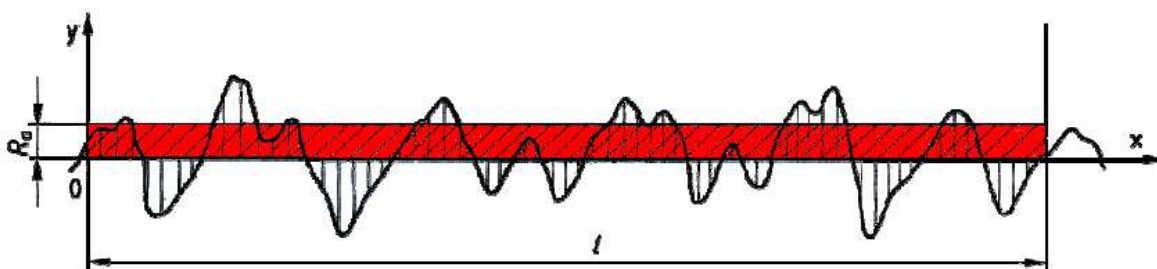
24. ábra 3D koordináta mérőgép által mért 3. test belső átmérők

5. Felületi érdesség mérése

5.1. A felületi érdesség jellemzésére használt főbb fogalmak és mérési módszerek

Az egyik legáltalánosabban használatos felületi érdesség mérőszám az R_a , vagyis az átlagos érdesség. Az átlagos érdesség a tényleges profil és a középvonal közötti y_i távolságok abszolút értékeinek számtani átlaga (25. ábra).

Ez azt jelenti, hogy a függőlegesen sraffozott területek összege pontosan ugyanakkora, mint a piros téglalap területe.



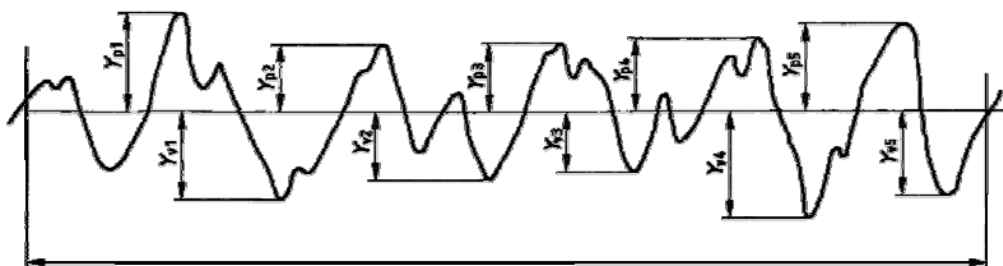
25. ábra Átlagos érdesség származtatása

Az R_q a simasági mérőszám, melyek a profileltérések négyzetes középértéke. Számítása a következő:

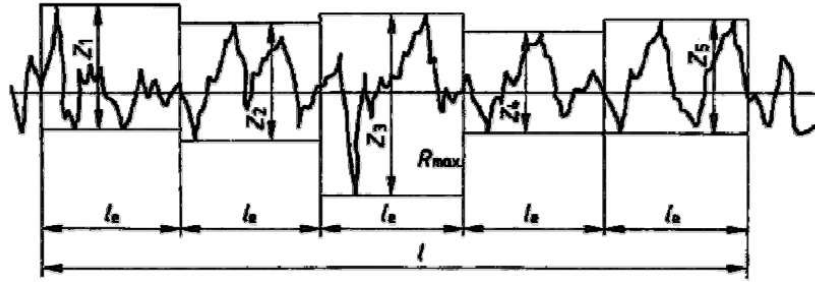
$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dx} \quad (4)$$

Ez a mérőszám az eltéréseket fokozottan, nagyságukat súlyozva veszi figyelembe.

Az R_z egyenetlenségmagasság származtatása többféle lehet. Közös bennük, hogy egyaránt a legmagasabb profilhegyeket és legalacsonyabb profilvölgyeket veszik figyelembe. ISO szabvány szerint a mérés teljes hosszán lévő öt legmagasabb és öt legalacsonyabb érték különbségének átlaga (26. ábra). DIN szerinti mérési hossz öt egyenlő részben lévő legmagasabb és legalacsonyabb pont különbségének átlaga (27. ábra).

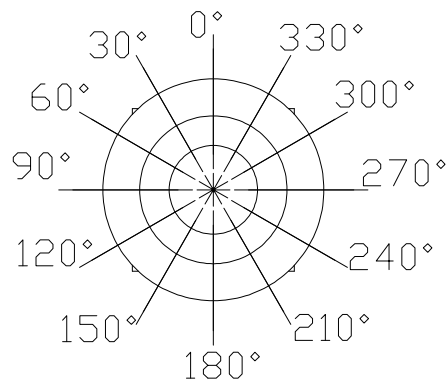


26. ábra R_z ISO szerinti származtatása



27. ábra R_z DIN szerinti származtatása

A kinyomtatott próbatestek felületének érdességét egy Mitutoyo SurfTest SJ-201 (29. ábra) gép segítségével mérem meg. A mérés során 12 mm hosszan mértem a palástfelületen a felületi érdességet. Minden egyes testen 30° fokenként megismétltem a mérést. A kezdő szög párhuzamos volt a munkadarab alján található füllel.



28. ábra Mérési helyzetek

A gép tulajdonságai:

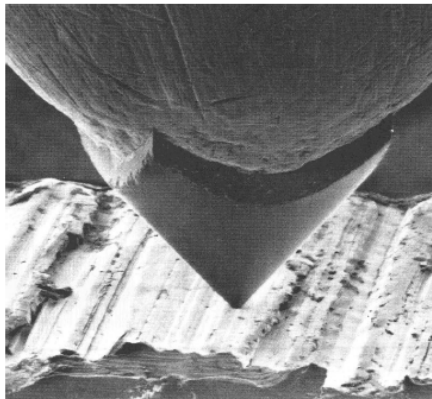
- Tapintási magasságkülönbség: $350 \mu\text{m}$
- Felbontás: $0,01 \mu\text{m}$
- Mérési hossz maximálisan: $12,5 \text{ mm}$



29. ábra Mitutoyo SurfTest SJ-201 felületi érdesség mérő gép

Tapintó fej (30. ábra):

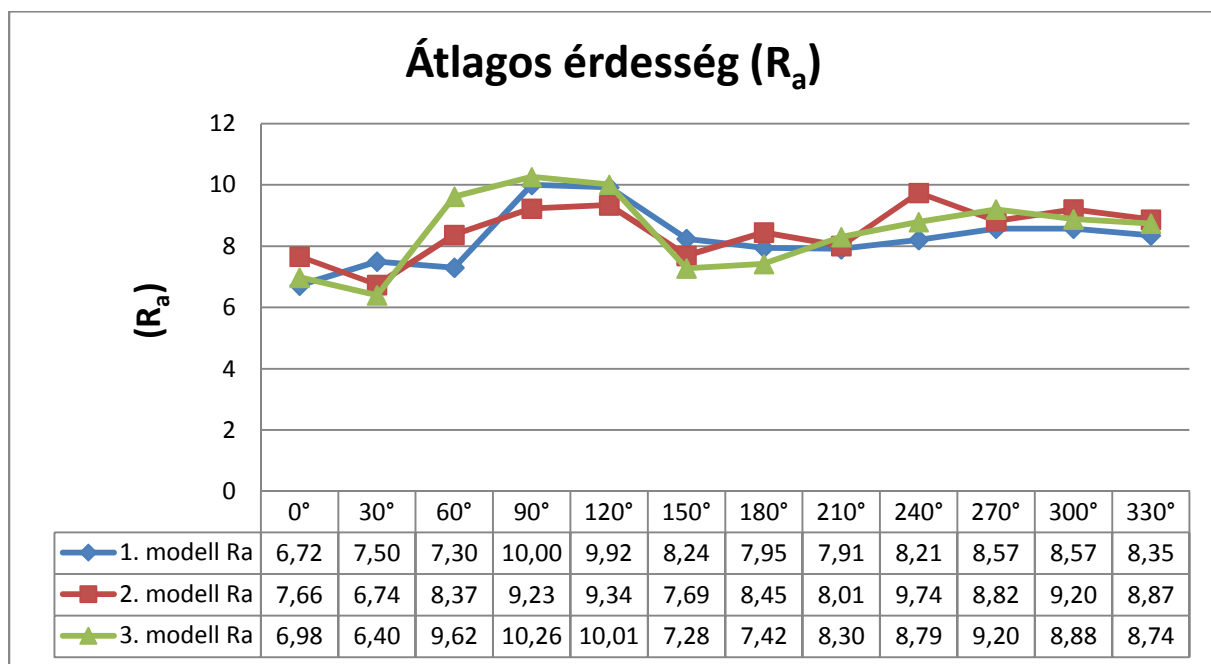
- Tapintócsúcs: gyémánt
- Tapintócsúcs sugara: $2\ \mu\text{m}$
- Tapintócsúcs szöge: 60°



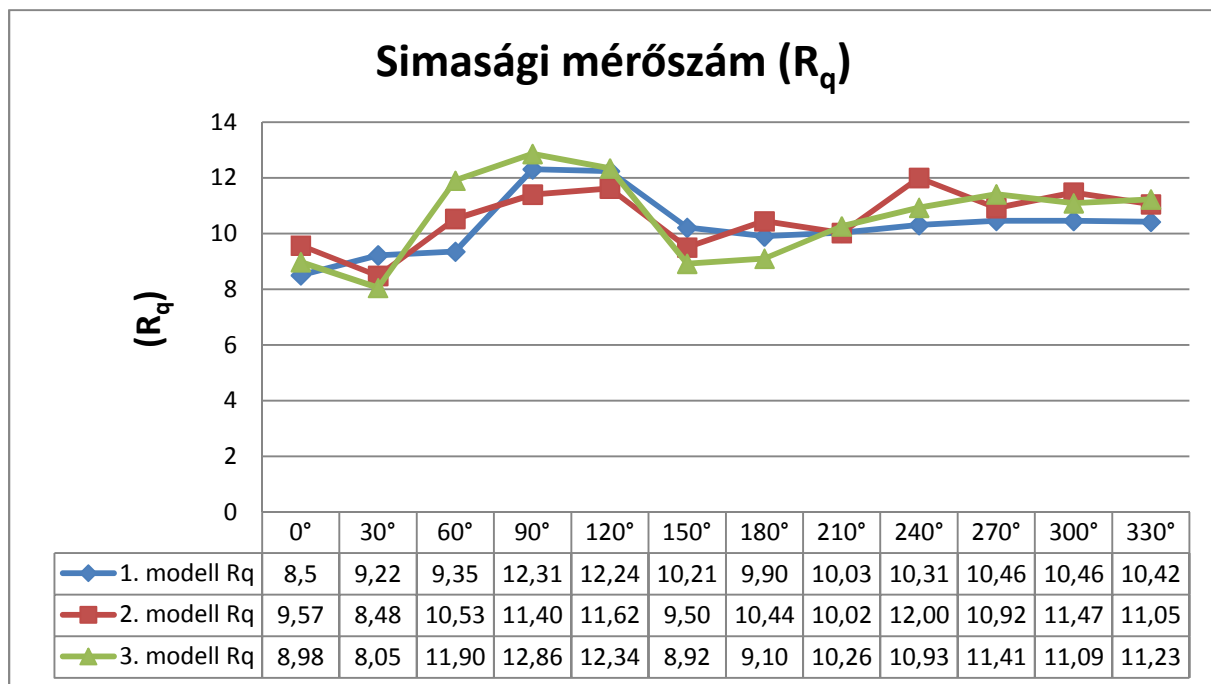
30. ábra Felületi érdesség mérése során alkalmazott tapintótű mikroszkópos felvétele

5.2. Mért értékek

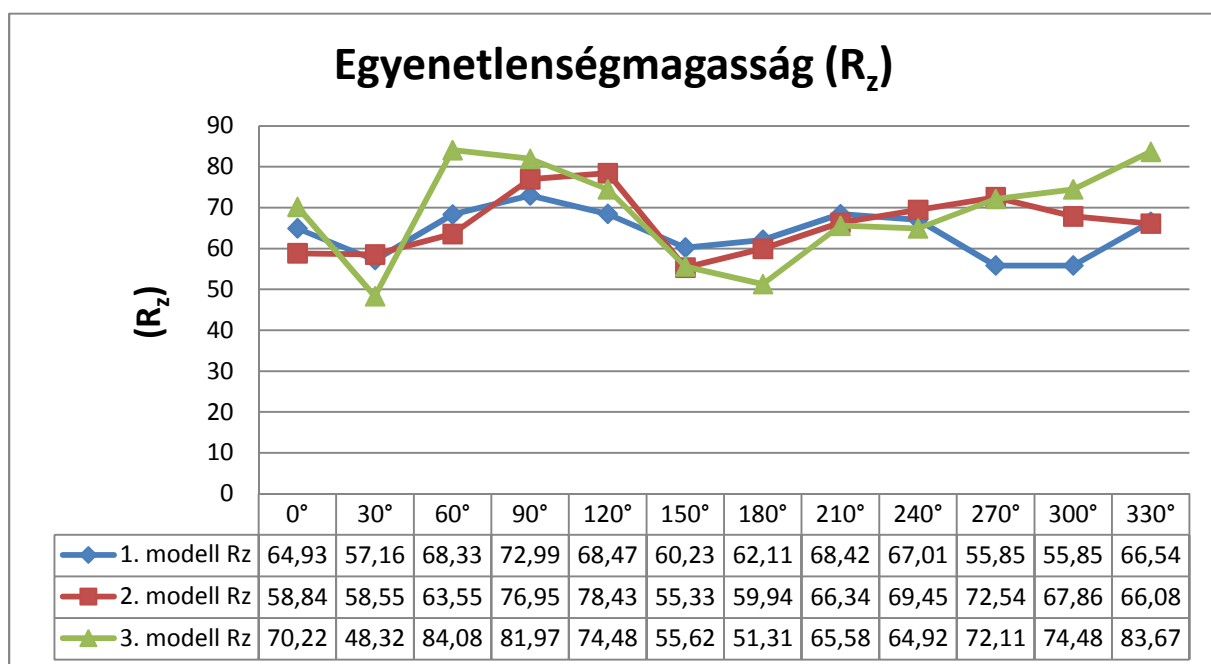
5.2.1. Átlagos érdesség (R_a):



5.2.2. Simasági mérőszám (R_q):

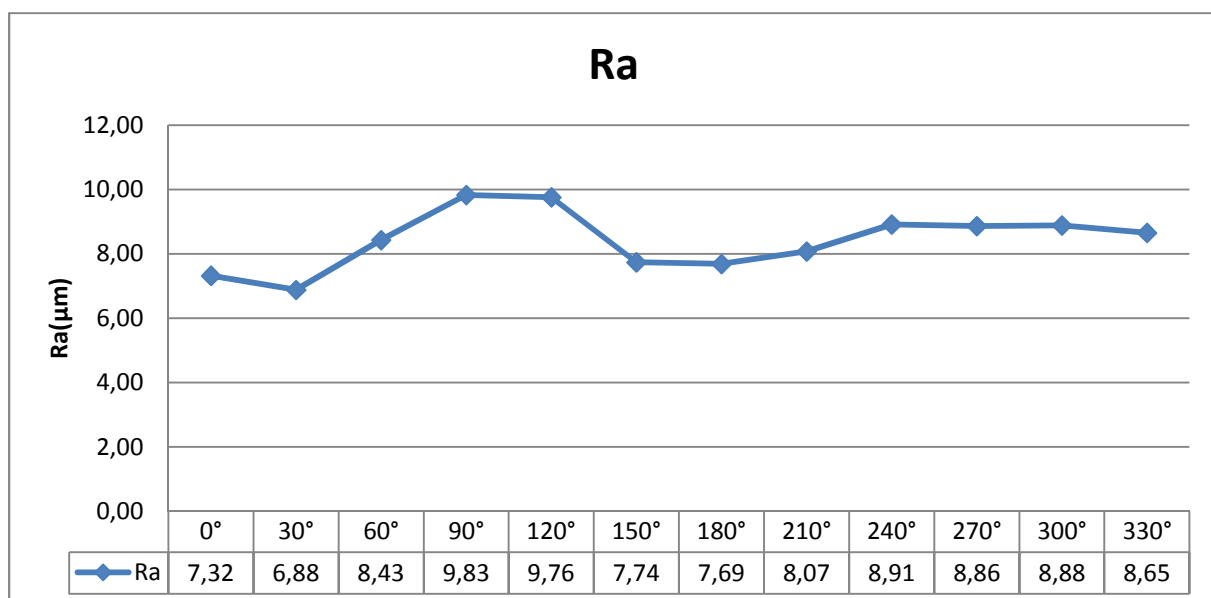


5.2.3. Egyenetlenségmagasság (R_z):

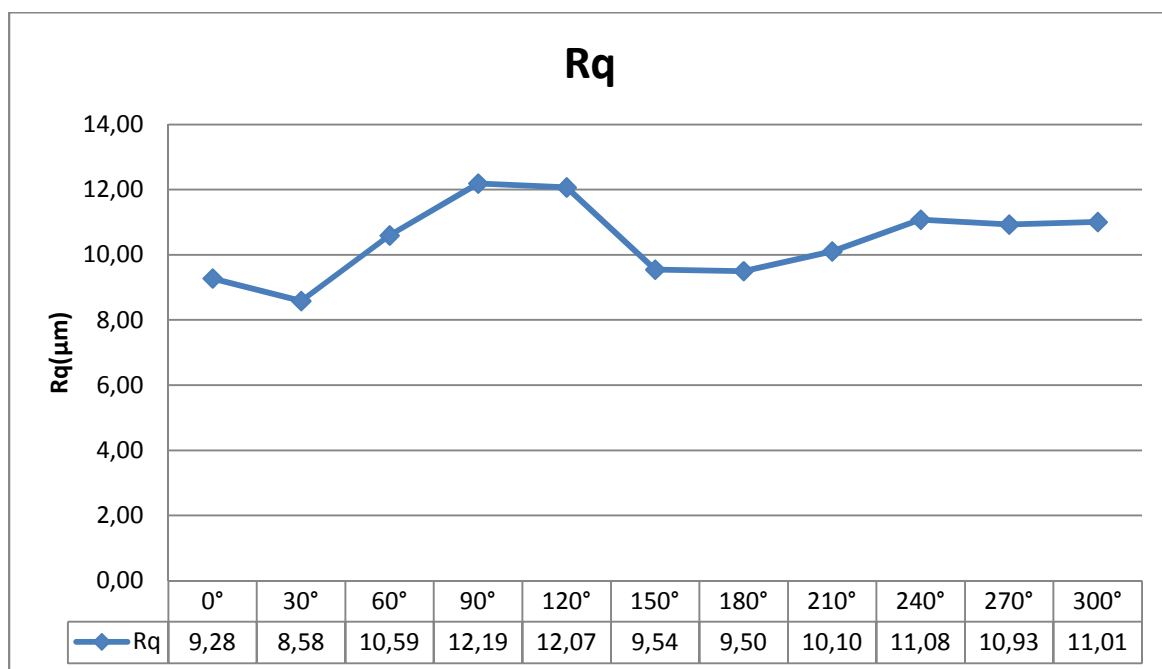


5.3. Mért értékek átlaga

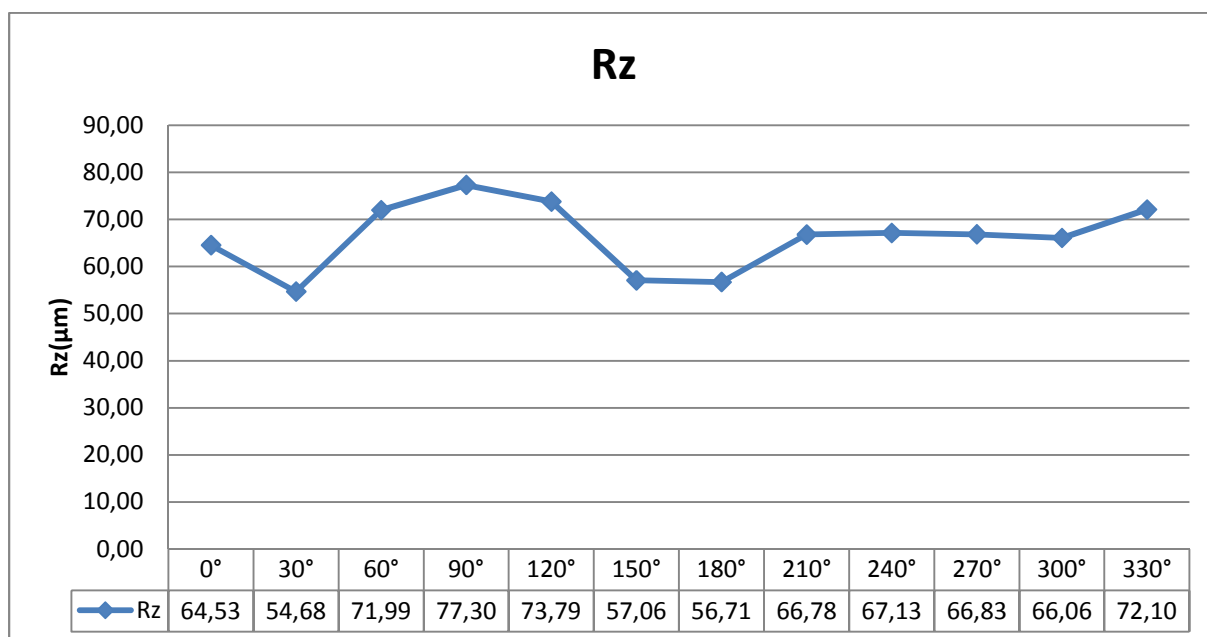
5.3.1. Átlagos érdesség (R_a):



5.3.2. Simasági mérőszám (R_q):

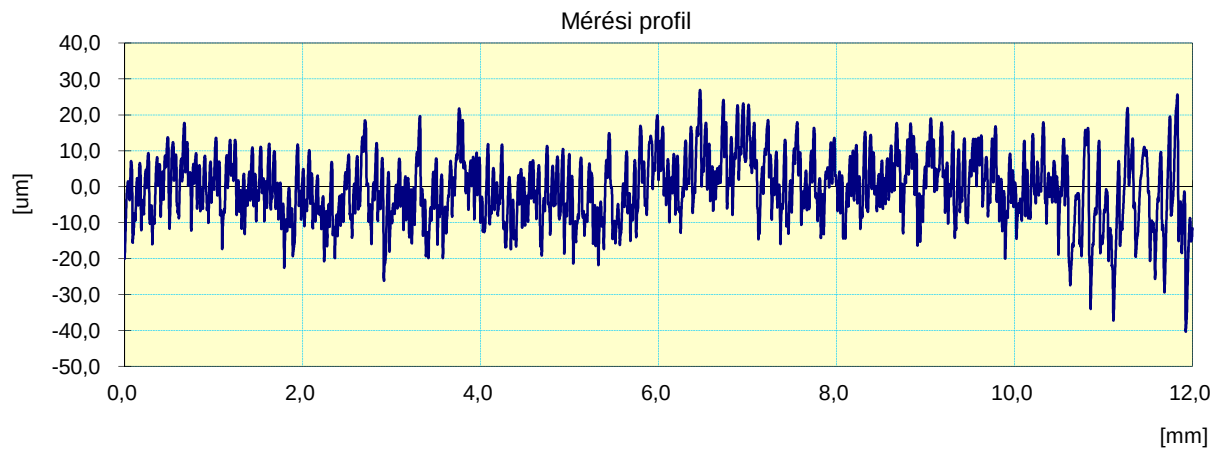


5.3.3. Egyenetlenségmagasság (R_z):

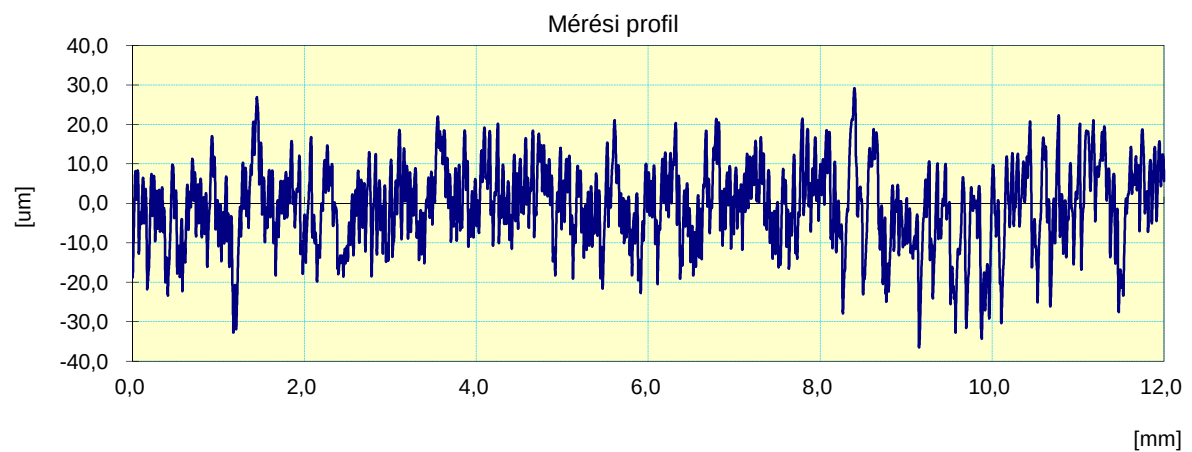


5.4. A mért értékek 0°-nál

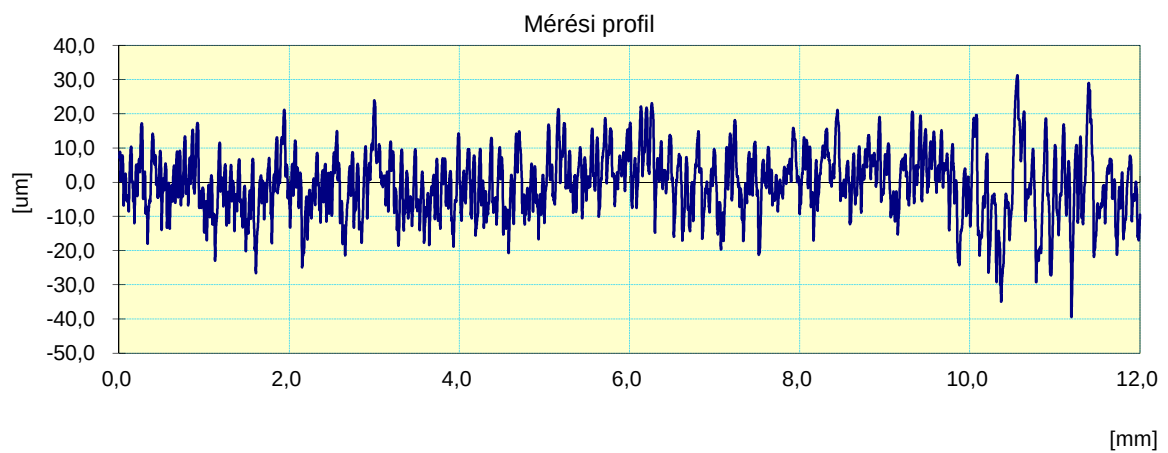
I. próbatest:



II. próbatest:

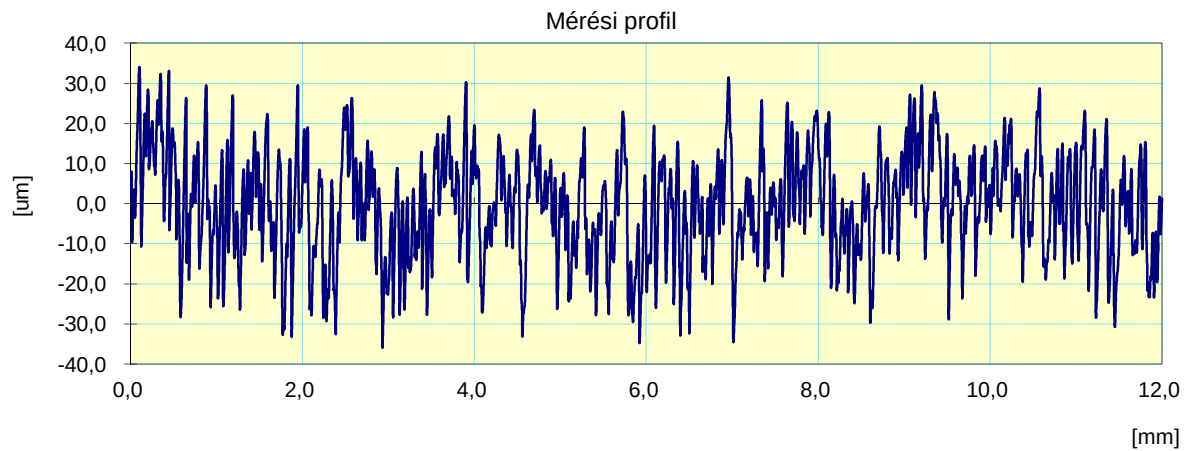


III. próbatest:

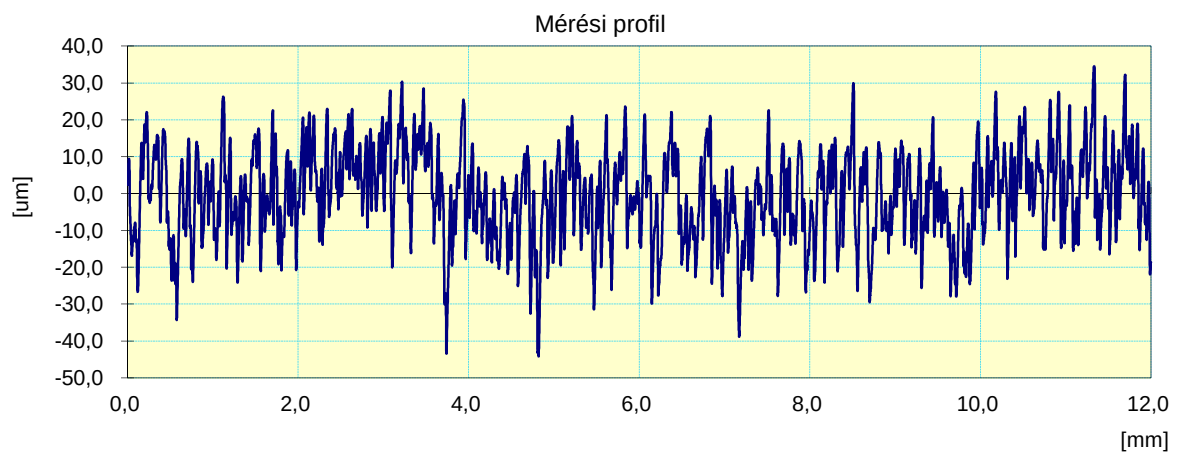


5.5. A mért értékek 90°-nál

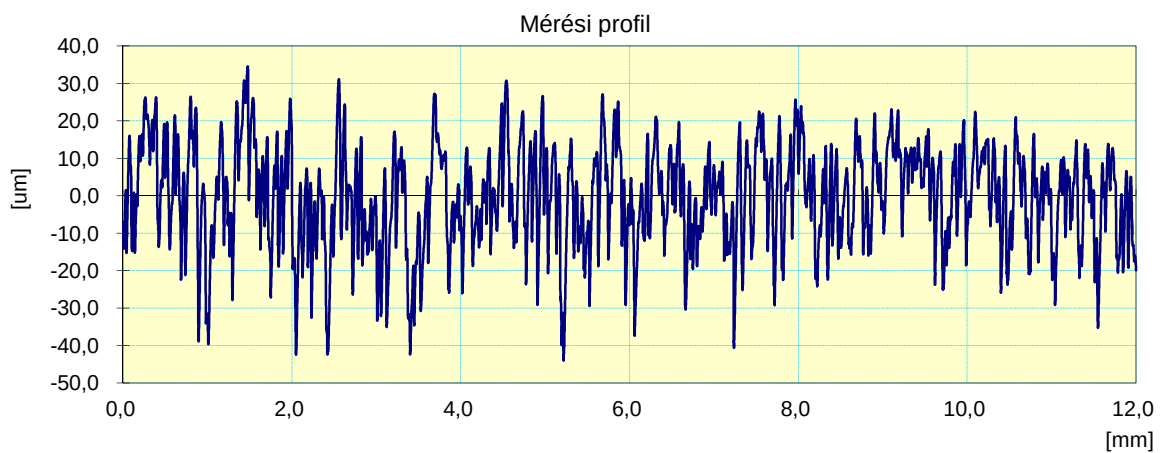
I. próbatest:



II. próbatest:



III. próbatest:



6. Következtetések

A mérési adatokból megállapíthatók az alábbiak:

- Mindegyik méréssorozat átlagának eltérése a névleges értéktől kevesebb, mint 0,5 mm.
- A minták szórása kicsi.
- Az I. irányban gyártott alkatrész külső méretei mind nagyobbak a névleges 30 mm-nél.
- A II. irányban a gyártott méretek szisztematikusan kisebbek, mint 30 mm.
- A III. irányban a gyártott méretek szisztematikusan kisebbek, és itt a legnagyobb az eltérés a névleges mérettől.
- A munkaasztaltól távolodva egyre közelebb van a mért átmérő értéke a névleges mérethez, ezáltal a kész munkadarab kúposná válik.
- A köralakúságban a méréseim nem mutattak ki tendenciát. A köralak-hiba minden esetben kisebb, mint 0,1mm.
- A felületi érdesség általam vizsgált mindhárom mérőszáma a nyomtató fej haladásának irányába magasabb értéket mutat.
- A felületi érdesség mértékszámainak szög szerinti legkisebb és legnagyobb értékei között 20% eltérés mutatkozott.

7. Összefoglalás

Az additív gyártási technológiák a 35 évvel ezelőtti születésük óta töretlenül fejlődnek, ezért várhatóan a jövőben egyre nagyobb teret nyernek. A gyártási méretpontosság, alakhelyesség és a felületi minőség a legtöbb esetben igen fontos jellemzője a terméknek, és megjelenhet annak a vásárlók által is fontosnak tartott minőségjellemzői között.

A tudományos diákköri munkámban a Nyíregyházi Főiskola Műszaki Alapozó és Gépgyártástechnológiai Tanszékének Additív Gyártás Laboratóriumában működő OBJET EDEN 350V típusú gyártóeszközzel készített henger alakú munkadarabok méret- és alakhelyességét, valamint felületi érdességét elemeztem. Vizsgálataim célja, hogy a jövőben hatékonyabban lehessen optimalizálni a munkadaraboknak a munkatérben való elhelyezését, nem csak gazdaságossági szempontok szerint, hanem a leglényegesebb méretek pontosságának növelése és a fontos felületek minőségének javítása céljából is.

A vizsgálatokhoz szükséges speciális alakú próbatesteket megterveztem, majd legyártottam a 3D nyomtatóval.

A mérethelyességet először kézi eszközökkel (digitális tolómérő, kengyeles mikrométer, furatmikrométer), kisebb adathalmaz felvételével vizsgáltam. A külső és belső átmérőket három különböző irányban, és öt különböző magasságban mértem. Már ezek a mérések is kimutatták, hogy a vizsgált méretek névlegestől való eltérései függenek az orientációtól és a magasságtól is.

A kézi mérések alapján terveztem meg a gépi méréssorozatot. Az Aberlink Axiom too CNC 3D koordináta mérőgép lehetőséget ad nagy mennyiségű adat felvételére, tárolására és feldolgozására. A mérethibák kimutatásán túl az adatfeldolgozás során lehetőség nyílik az alakhelyesség, esetünkben köralakúság vizsgálatára is.

Kimutattam, hogy

- Mindegyik méréssorozat átlagának eltérése a névleges értéktől kevesebb, mint 0,5 mm.
- A minták szórása kicsi.
- Az I. irányban gyártott alkatrész külső méretei mind nagyobbak a névleges 30 mm-nél.
- A II. irányban a gyártott méretek szisztematikusan kisebbek, mint 30 mm.
- A III. irányban a gyártott méretek szisztematikusan kisebbek, és itt a legnagyobb az eltérés a névleges mérettől.
- A munkaasztaltól távolodva egyre közelebb van a mért átmérő értéke a névleges mérethez, ezáltal a kész munkadarab kúposná válik.

- A köralakúságban a méréseim nem mutattak ki tendenciát. A köralak-hiba minden esetben kisebb, mint 0,1mm.

A felületi érdességet Mitutoyo SurfTest SJ-201 felületi érdesség mérő gép segítségével vizsgáltam. 30 fokonként végeztem mérést a próbatest hengeres külső palástjának alkotójával párhuzamos irányban. Elemeztem az átlagos érdességet, a simasági mérőszámot és az egyenetlenségmagasságot. Kimutattam, hogy

- A felületi érdesség általam vizsgált mindhárom mérőszáma a nyomtató fej haladásának irányába magasabb értéket mutat.
- A felületi érdesség mértékszámainak szög szerinti legkisebb és legnagyobb értékei között 20% eltérés mutatkozott.

Eredményeim a jövőben felhasználhatók a gyártási pontosság és a felületminőség optimalizálására. Főbb megállapításaim így foglalhatók össze szemléletesen: a nyomtatófej haladásának irányában torzítja el a munkadarab alakját leginkább a nyomtató, és ebben az irányban a legnagyobb a felületi érdesség, az általam készített cső alakú munkadarab felfelé kissé kúposodik. Ugyanakkor fontos azt is hangsúlyozni, hogy a gyártó által megadott pontossági határokon minden esetben belül estek a gép által előállított modell méretei.

8. Felhasznált irodalom

- [1] http://www.acus.org/files/publication_pdfs/403/101711_ACUS_3DPrinting.PDF
Az Atlanti Tanács egy amerikai kezdeményezéssel 1961-ben megalakult szervezet, amelynek célja az euroatlanti együttműködés segítése. 1992-ben létrejött a Magyar Atlanti Tanács is. Az idézett cikk 2011 októberében, a tanács megalakulásának 50. évfordulója alkalmából ad áttekintést az additív gyártásról, mint a jövő egyik meghatározó technológiájáról.
- [2] https://www.ida.org/stpi/occasionalpapers/papers/AM3D_33012_Final.pdf
Összefoglaló az additív gyártás helyzetéről, amelyet az Institute for Defense Analyses nonprofit szervezet munkatásai készítettek 2012-ben. A szervezetet 1947-ben hozták létre, kizárólag az USA kormányának dolgozik, célja nemzetbiztonsági projektek végrehajtása.
- [3] www.additive3d.com
Ez a weboldal számos lexikális alapismeretet és leírást ad az additív gyártásról. Célul tűzte ki, hogy a legtöbb információt nyújtsa az additív technológiákról az olvasóknak.
- [4] www.objet.com
Az OBJET cég weboldala. Ilyen gyártnányú additív gyártó berendezés működik a Nyíregyházi Főiskolán.
- [5] <http://gfxspeak.com/2012/10/26/advances-in-metal-for-3d-printing-dwarf-plastics/>
Egy cikk, amely a fém alapanyaggal történő additív gyártást is bemutatja.
- [6] <http://www.catalyst.hu/subpage.php?menu=2%20&item=%205&subitem=1&pageid=>
Egy magyar cég honlapja sok hasznos szakmai ismerettel
- [7] <http://prototipus.varinex.hu/>
Egy másik magyar cég honlapja, számos hírrel és érdekességgel a gyorsprototípus gyártással kapcsolatban.
- [8] Gergely Dezső, Péter Kósa: Roughness of plane faces produced by additive manufacturing, International Journal of Engineering, X. (2012) 2. pp 181-184.
ISSN:1584-2665
- [9] G. Dezső, A. Százvai, P. Kósa: Size and shape accuracy of layer by layer 3d printing, 1st regional Conference on mechatronics and Education (MECH-EDU 2011), December 8-10, 2011, Subotica, Serbia, Proceedings pp. 122-127. ISBN 978-86-85409-67-7

- [10] Dezső Gergely, Százvai Attila, Kósa Péter: Additív gyártással készített testek alakhelyességének vizsgálata, FMTÜ, 2012. március 22-23. Kolozsvár, pp 99-102. (ISSN 2067-60808, <http://eda.eme.ro/handle/10598/15470>)
- [11] Gergely Dezső, Illés Dudás, Péter Kósa, Attila Százvai: Study on size accuracy of 3D printing, XXVI. microCAD International Scientific Conference, University of Miskolc, 29-30 March, 2012. (elektronikus kiadvány, ISBN: 978-963-661-773-8, L8_Dezso_Gergely.pdf, 6 oldal)
- [12] Dezső Gergely, Kósa Péter, Százvai Attila: Additív gyártás pontosságának vizsgálata, Műszaki Tudomány az Észak-Kelet Magyarországi Régióban, Szolnok, 2012. május 10. ISBN 978-963-7064-28-9 pp. 147-152.
- [13] http://www.gepesztuning.hu/images/kepekfile/Feluleti_erdesség.pdf
- [14] Kemény Sándor, Papp László, Deák András - Statisztikai minőség- (megfelelőség-) szabályozás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest 2005, ISBN 963 16 30064

9. Mellékletek

1. számú melléklet: A mérőgéppel végzett mérések eredményei
2. számú melléklet: A 3D mérőgéppel tapintott pontok

Mellékletek

1. számú melléklet

A mérőgéppel végzett mérések eredményei

A mérőgéppel kapott értékek táblázatba rendezése után különböző diagramokat készítettem, melyek alapján könnyen elvégezhetővé vált az adatok kiértékelése.

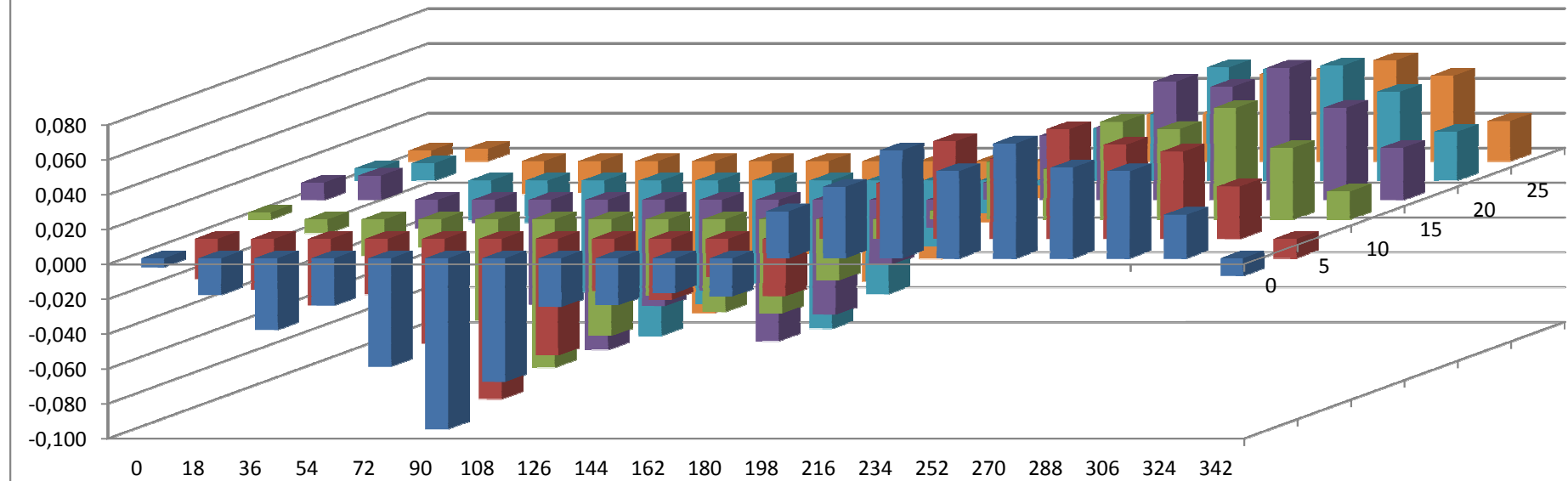
Fok	Orientáció	0	5	10	15	20	25	Átlag	Szórás
0	1	-0,005	-0,023	0,004	0,010	0,007	0,006	0,000	0,0123
18	2	-0,021	-0,029	-0,008	0,014	0,010	0,007	-0,005	0,0177
36	3	-0,041	-0,038	-0,021	-0,016	-0,023	-0,019	-0,026	0,0105
54	4	-0,027	-0,032	-0,016	-0,013	-0,024	-0,018	-0,022	0,0072
72	5	-0,062	-0,060	-0,058	-0,060	-0,064	-0,062	-0,061	0,0021
90	6	-0,098	-0,092	-0,085	-0,086	-0,089	-0,087	-0,090	0,0048
108	7	-0,071	-0,067	-0,067	-0,061	-0,071	-0,057	-0,066	0,0056
126	8	-0,028	-0,030	-0,044	-0,052	-0,059	-0,053	-0,044	0,0128
144	9	-0,027	-0,035	-0,053	-0,081	-0,085	-0,069	-0,058	0,0241
162	10	-0,020	-0,022	-0,054	-0,066	-0,065	-0,056	-0,047	0,0208
180	11	-0,022	-0,033	-0,035	-0,037	-0,038	-0,035	-0,033	0,0058
198	12	0,027	0,012	-0,011	-0,016	-0,019	-0,021	-0,005	0,0196
216	13	0,041	0,032	0,005	0,010	-0,003	-0,002	0,014	0,0184
234	14	0,062	0,056	0,033	0,037	0,030	0,027	0,041	0,0146
252	15	0,050	0,046	0,029	0,042	0,038	0,028	0,039	0,009
270	16	0,066	0,063	0,056	0,068	0,065	0,050	0,061	0,0069
288	17	0,052	0,054	0,052	0,065	0,064	0,053	0,057	0,0061
306	18	0,050	0,050	0,064	0,076	0,066	0,058	0,061	0,0101
324	19	0,025	0,030	0,041	0,053	0,051	0,049	0,042	0,0117
342	20	-0,010	-0,011	0,016	0,030	0,028	0,023	0,013	0,0186
Átlag		29,98	29,965	29,961	29,965	29,95	29,951	29,962	0,011
Szórás		0,0474	0,0459	0,0444	0,0523	0,0522	0,0455		

T1.1 táblázat: Az 1. test adatai a külső felületen

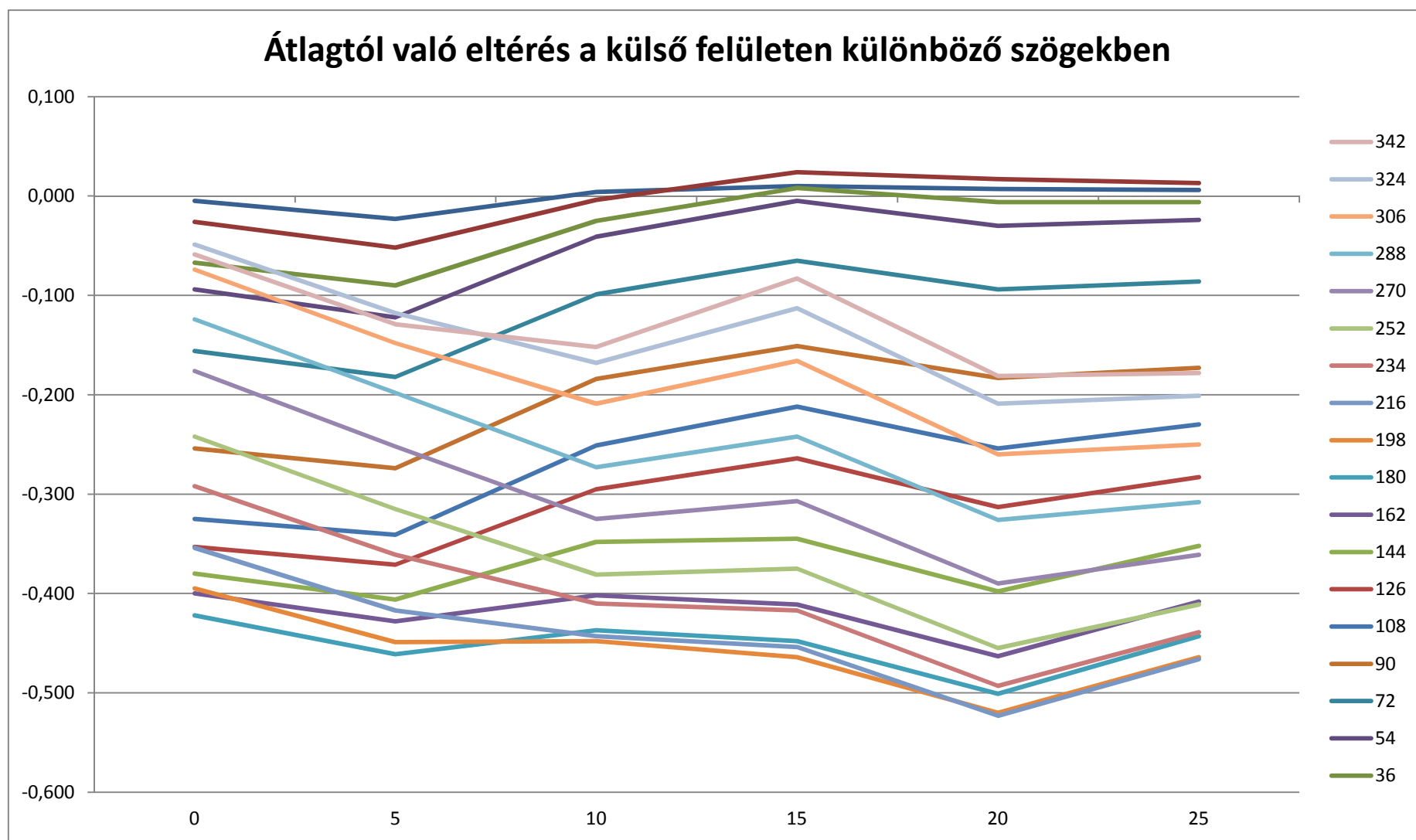
Fok	Orientáció	0	5	10	15	20	25	Átlag	Szórás
0	1	0,008	0,013	-0,012	-0,014	-0,007	-0,006	-0,003	0,011
18	2	0,013	0,004	-0,019	0,017	0,007	0,014	0,006	0,0131
36	3	0,012	0,018	-0,004	0,035	0,032	0,028	0,020	0,0147
54	4	0,020	0,008	-0,013	0,059	0,049	0,049	0,029	0,0282
72	5	0,026	0,019	0,000	0,073	0,071	0,062	0,042	0,0308
90	6	0,015	0,024	0,025	0,092	0,087	0,084	0,055	0,0366
108	7	0,021	0,028	0,036	0,103	0,096	0,089	0,062	0,0376
126	8	0,027	0,031	0,043	0,100	0,093	0,101	0,066	0,0357
144	9	0,015	0,012	0,046	0,081	0,078	0,076	0,051	0,0319
162	10	0,014	0,022	0,051	0,056	0,063	0,058	0,044	0,0207
180	11	0,000	0,010	0,033	0,024	0,024	0,022	0,019	0,0118
198	12	0,021	0,018	0,051	0,029	0,030	0,041	0,032	0,0124
216	13	0,009	0,026	0,047	0,018	0,009	0,021	0,022	0,0141
234	14	0,025	0,035	0,047	-0,002	-0,014	-0,011	0,013	0,0257
252	15	0,013	0,038	0,046	-0,016	-0,032	-0,019	0,005	0,0323
270	16	0,026	0,048	0,052	-0,005	-0,014	-0,001	0,018	0,0284
288	17	0,023	0,023	0,018	-0,037	-0,043	-0,042	-0,010	0,0341
306	18	0,020	0,016	0,006	-0,028	-0,040	-0,040	-0,011	0,0281
324	19	0,018	0,004	-0,012	-0,030	-0,043	-0,033	-0,016	0,0236
342	20	0,013	0,014	-0,016	-0,023	-0,026	-0,022	-0,010	0,0185
Átlag		19,967	19,96	19,954	19,944	19,942	19,931	19,950	0,0132
Szórás		0,007	0,0115	0,027	0,0463	0,0482	0,045		

T1.2 táblázat: Az 1. test adatai a belső felületen

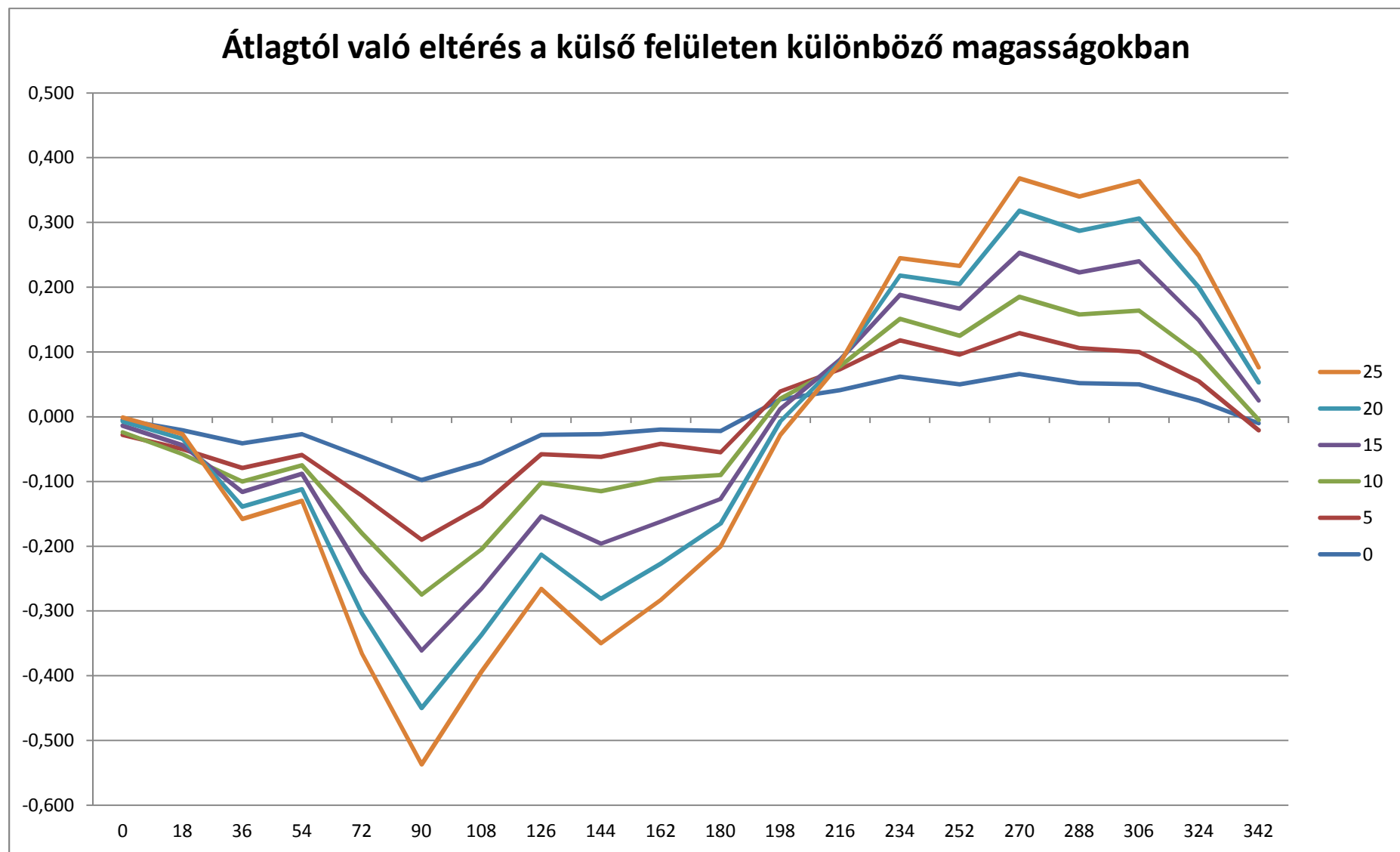
Az átlagtól való eltérések a külső felületen



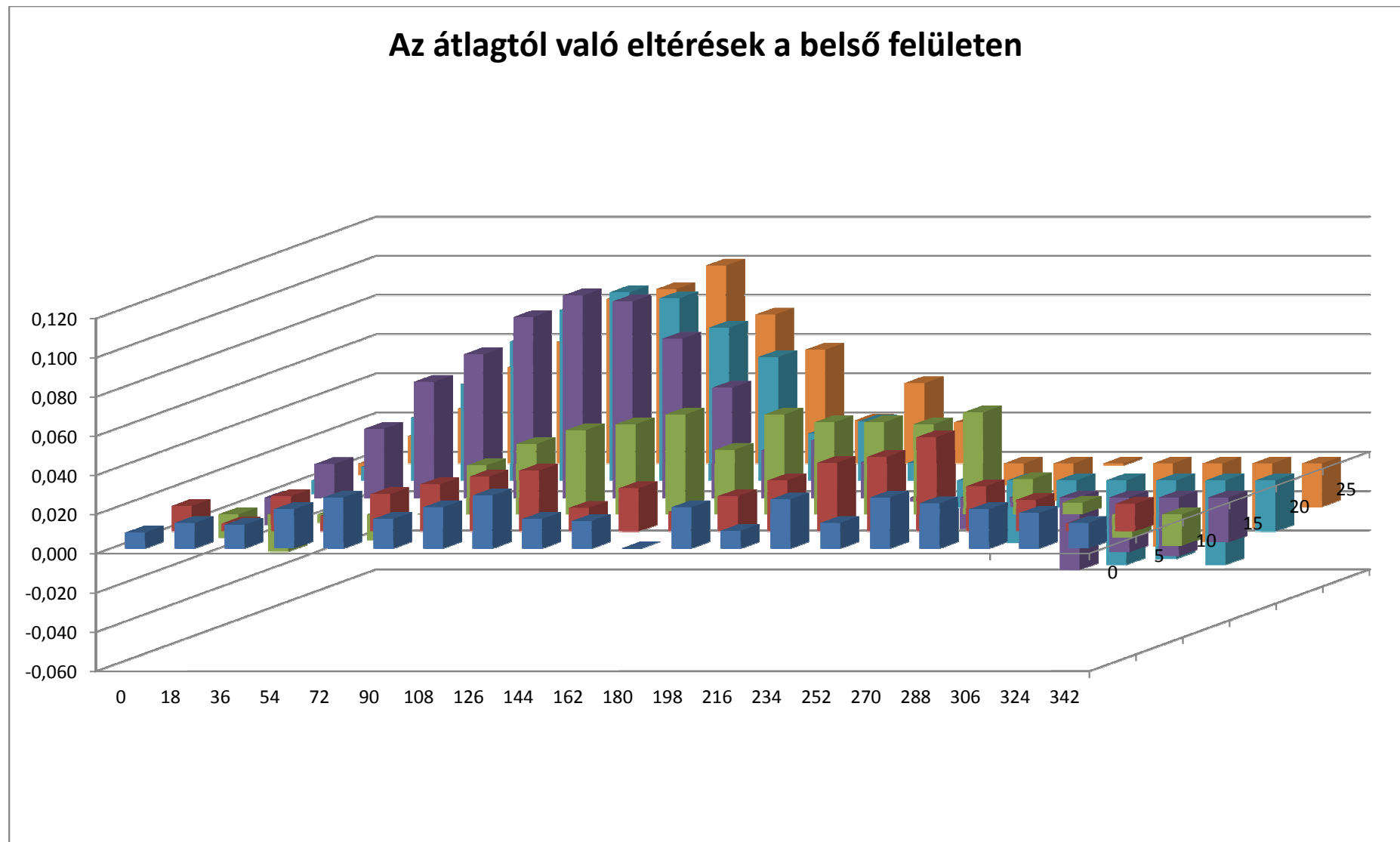
D1.1 diagram: Az 1. test átlagtól való eltérések a külső felületen



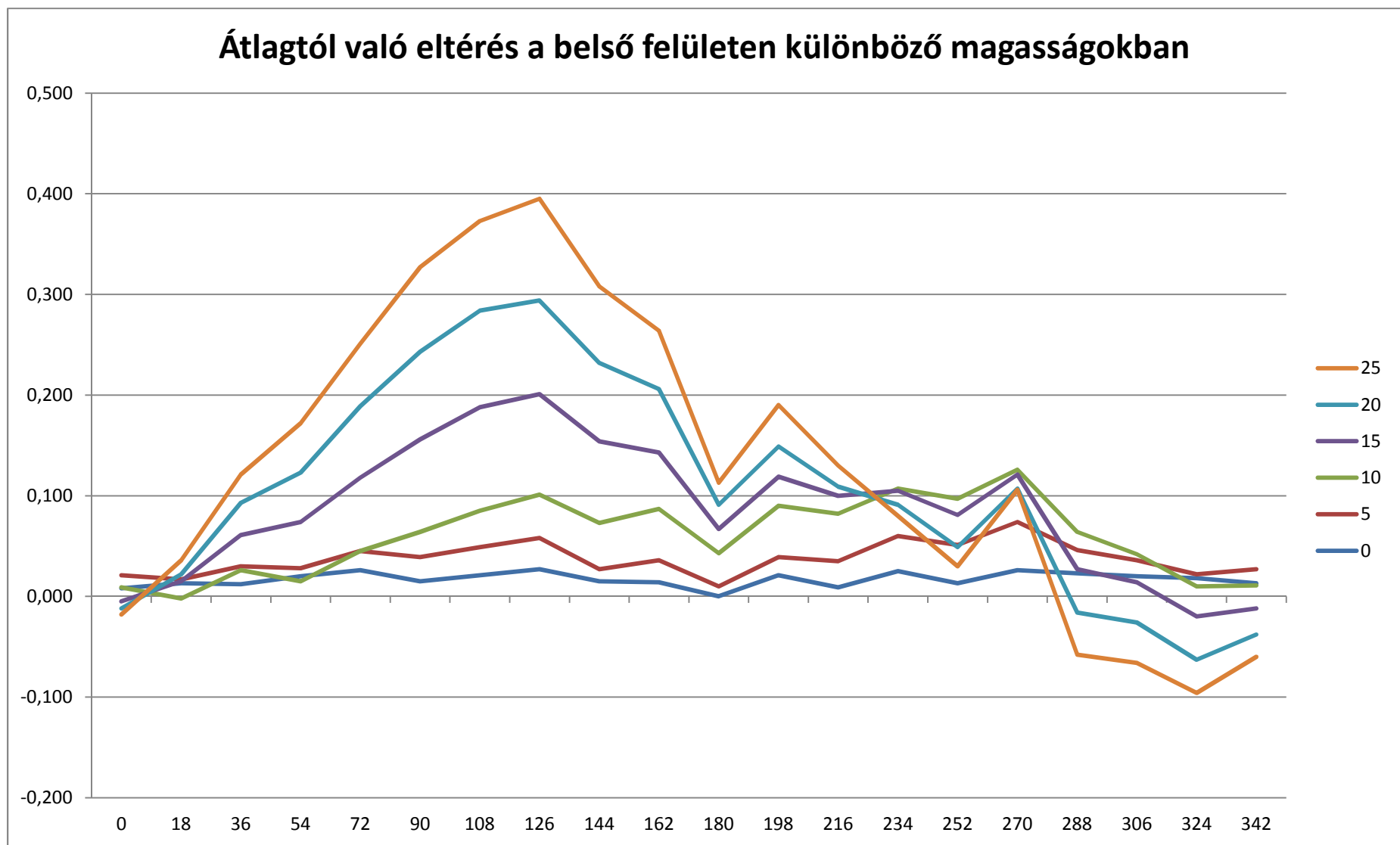
D1.2 diagram: Az 1. test átlagtól való eltérése a külső felületen különböző szögekben



D1.3 diagram: Az 1. test átlagtól való eltérése a külső felületen különböző magasságokban

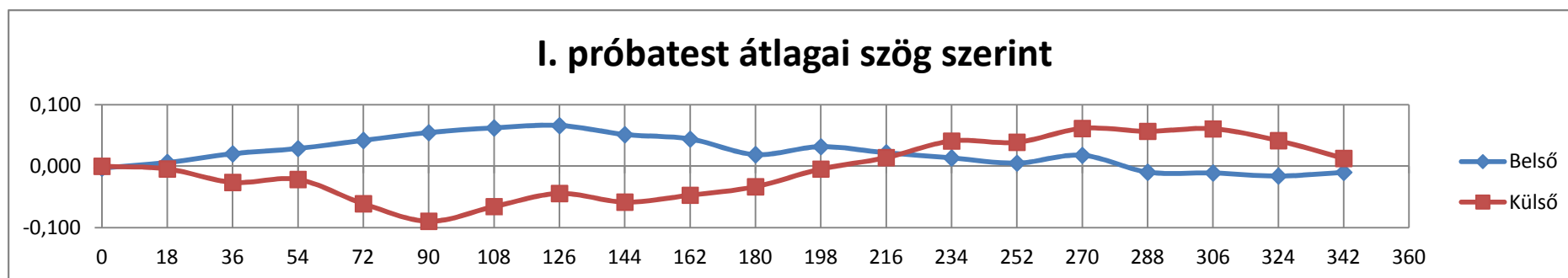


D1.4 diagram: Az 1. test átlagtól való eltérések a belső felületen

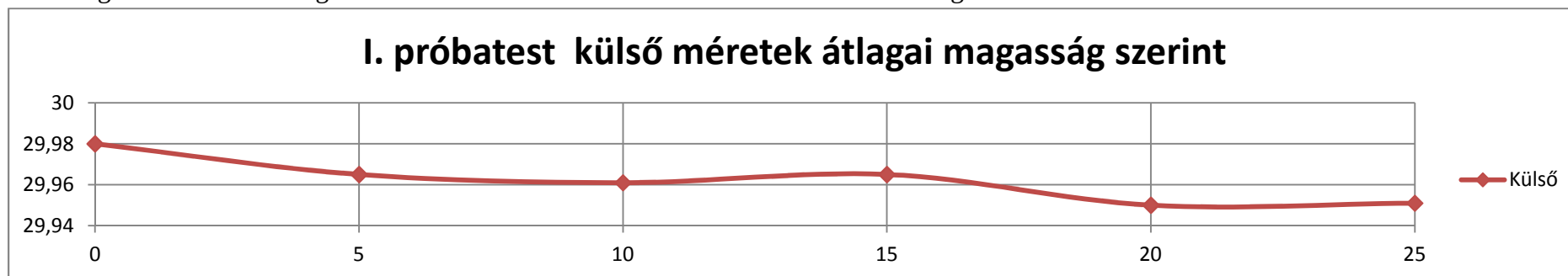


D1.6 diagram: Az 1. test átlagtól való eltérése a belső felületen különböző magasságokban

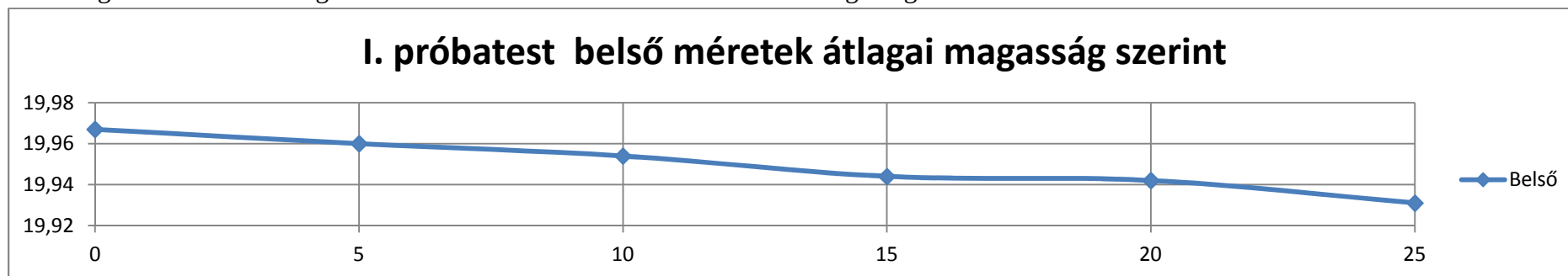
Átlagok grafikonjai



D1.7 diagram: Az 1. test átlagtól való eltérése a külső- és belső felületen különböző szögekben

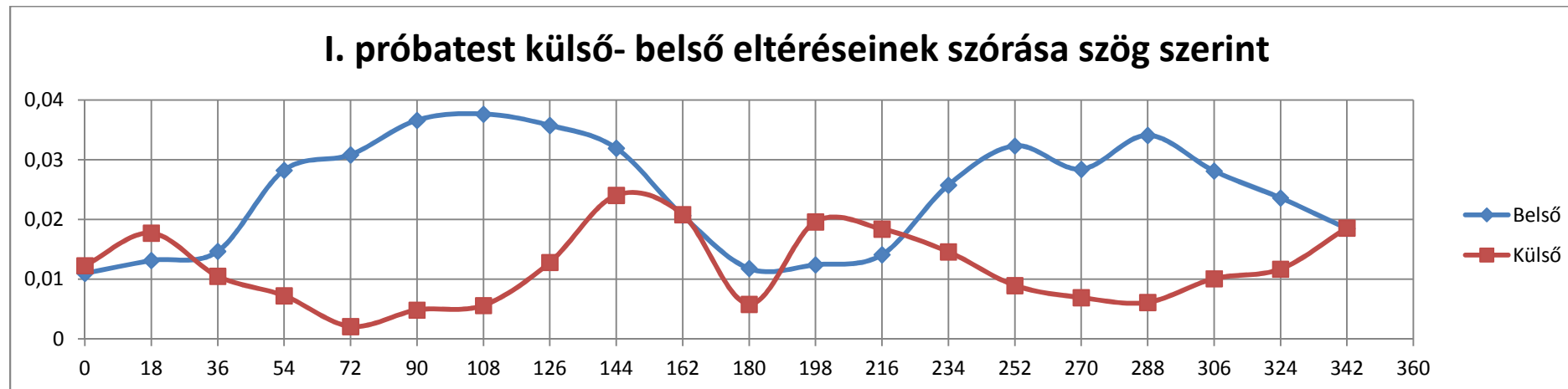


D1.8 diagram: Az 1. test átlagtól való eltérése a külső felületen különböző magasságokban

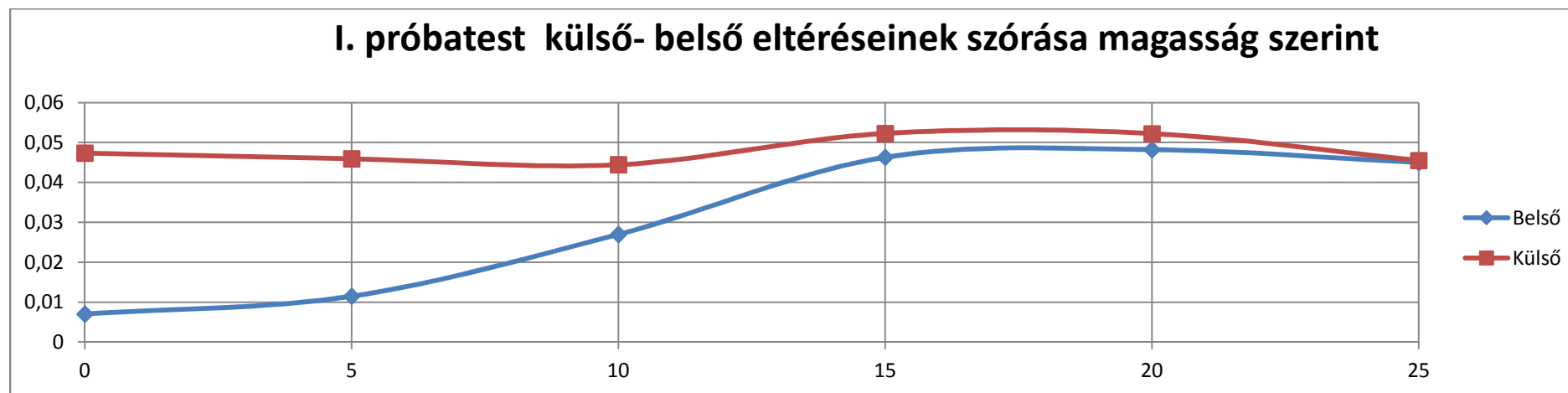


D1.9 diagram: Az 1. test átlagtól való eltérése a belső felületen különböző magasságokban

Szórások grafikonjai



D1.10 diagram: Az 1. test külső- belső eltéréseinek szórása szög szerint



D1.11 diagram: Az 1. test külső- belső eltéréseinek szórása magasság szerint

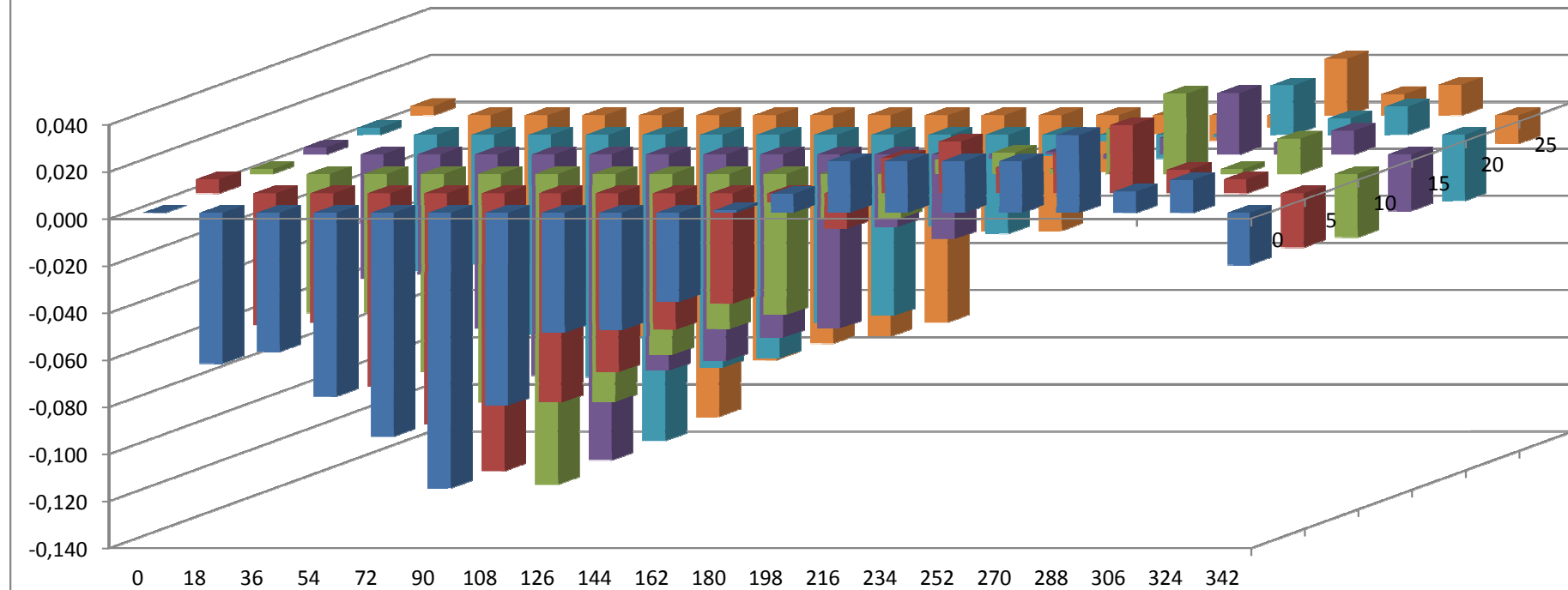
Fok	Orientáció	0	5	10	15	20	25	Átlag	Szórás
0	1	0,000	0,006	0,002	0,003	0,003	0,004	0,003	0,002
18	2	-0,064	-0,056	-0,059	-0,053	-0,058	-0,052	-0,057	0,0044
36	3	-0,059	-0,055	-0,059	-0,051	-0,055	-0,047	-0,054	0,0047
54	4	-0,078	-0,082	-0,084	-0,074	-0,085	-0,077	-0,080	0,0043
72	5	-0,095	-0,098	-0,097	-0,094	-0,103	-0,094	-0,097	0,0034
90	6	-0,117	-0,118	-0,132	-0,130	-0,130	-0,128	-0,126	0,0066
108	7	-0,082	-0,089	-0,097	-0,092	-0,099	-0,104	-0,094	0,0078
126	8	-0,051	-0,076	-0,077	-0,088	-0,095	-0,097	-0,081	0,017
144	9	-0,050	-0,058	-0,066	-0,078	-0,080	-0,094	-0,071	0,0161
162	10	-0,038	-0,047	-0,060	-0,074	-0,077	-0,088	-0,064	0,0191
180	11	0,001	-0,004	-0,019	-0,031	-0,039	-0,049	-0,024	0,0197
198	12	0,008	-0,015	-0,019	-0,036	-0,042	-0,049	-0,026	0,021
216	13	0,022	0,015	0,006	-0,002	-0,009	-0,024	0,001	0,0167
234	14	0,022	0,022	0,009	0,001	-0,003	-0,008	0,007	0,0128
252	15	0,022	0,011	0,002	-0,002	-0,010	-0,011	0,002	0,0127
270	16	0,022	0,017	0,019	0,007	-0,001	-0,005	0,010	0,0112
288	17	0,033	0,029	0,034	0,026	0,021	0,024	0,028	0,0051
306	18	0,009	0,010	0,002	0,005	0,007	0,009	0,007	0,003
324	19	0,014	0,006	0,015	0,010	0,012	0,013	0,012	0,0033
342	20	-0,022	-0,023	-0,027	-0,024	-0,028	-0,012	-0,023	0,0057
Átlag		29,978	29,966	29,962	29,965	29,951	29,949	29,962	0,0107
Szórás		0,0464	0,046	0,0473	0,0447	0,0455	0,0458		

T2.1 táblázat: A 2. test adatai a külső felületen

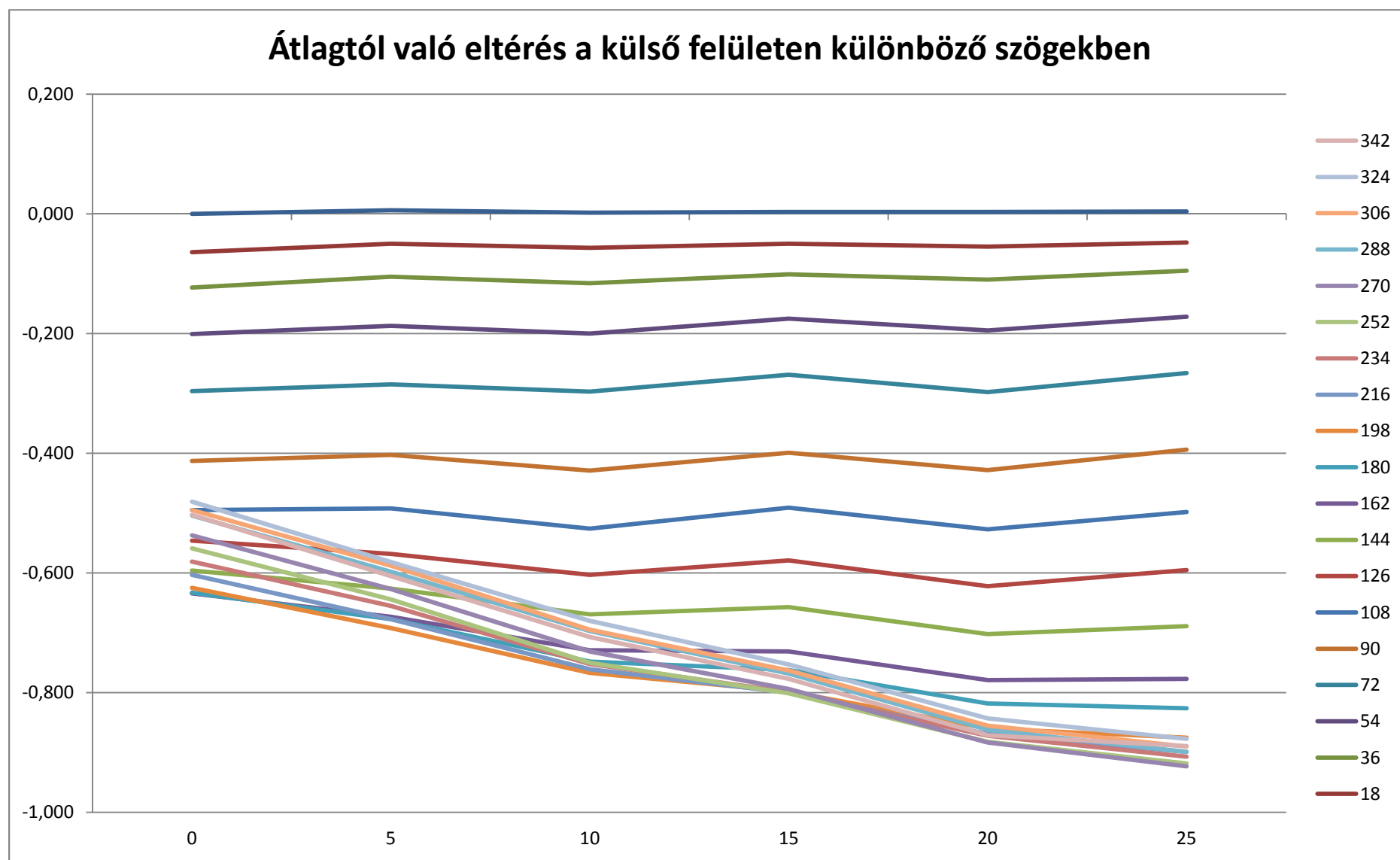
Fok	Orientáció	0	5	10	15	20	25	Átlag	Szórás
0	1	0,020	0,018	0,015	0,022	0,010	0,014	0,017	0,0044
18	2	0,019	0,014	0,014	0,042	0,033	0,023	0,024	0,0112
36	3	0,017	0,014	0,023	0,063	0,053	0,048	0,036	0,0209
54	4	0,011	0,019	0,016	0,070	0,060	0,053	0,038	0,0257
72	5	0,001	-0,005	-0,006	0,054	0,057	0,045	0,024	0,0307
90	6	0,010	-0,011	-0,011	0,047	0,042	0,040	0,020	0,027
108	7	0,004	-0,004	-0,003	0,061	0,073	0,067	0,033	0,0375
126	8	0,005	-0,001	0,017	0,062	0,080	0,067	0,038	0,0353
144	9	0,012	0,027	0,024	0,063	0,070	0,069	0,044	0,026
162	10	0,007	0,024	0,018	0,045	0,054	0,055	0,034	0,0202
180	11	0,013	0,016	0,014	0,010	0,027	0,028	0,018	0,0076
198	12	0,018	0,029	0,031	0,010	0,012	0,021	0,020	0,0086
216	13	0,011	0,020	0,026	-0,012	-0,014	-0,004	0,005	0,0169
234	14	0,027	0,022	0,021	-0,018	-0,032	-0,008	0,002	0,0247
252	15	-0,004	0,026	0,023	-0,036	-0,045	-0,038	-0,012	0,0319
270	16	0,002	0,016	0,019	-0,038	-0,048	-0,046	-0,016	0,0316
288	17	0,007	0,008	0,009	-0,044	-0,061	-0,053	-0,022	0,0337
306	18	0,024	0,015	0,008	-0,032	-0,041	-0,037	-0,011	0,0292
324	19	-0,008	0,000	-0,004	-0,035	-0,043	-0,041	-0,022	0,0199
342	20	0,004	0,007	-0,003	-0,012	-0,009	-0,038	-0,009	0,0162
Átlag		19,959	19,959	19,952	19,938	19,944	19,933	19,948	0,0109
Szórás		0,0091	0,0116	0,012	0,0413	0,047	0,0428		

T2.2 táblázat: A 2. test adatai a belső felületen

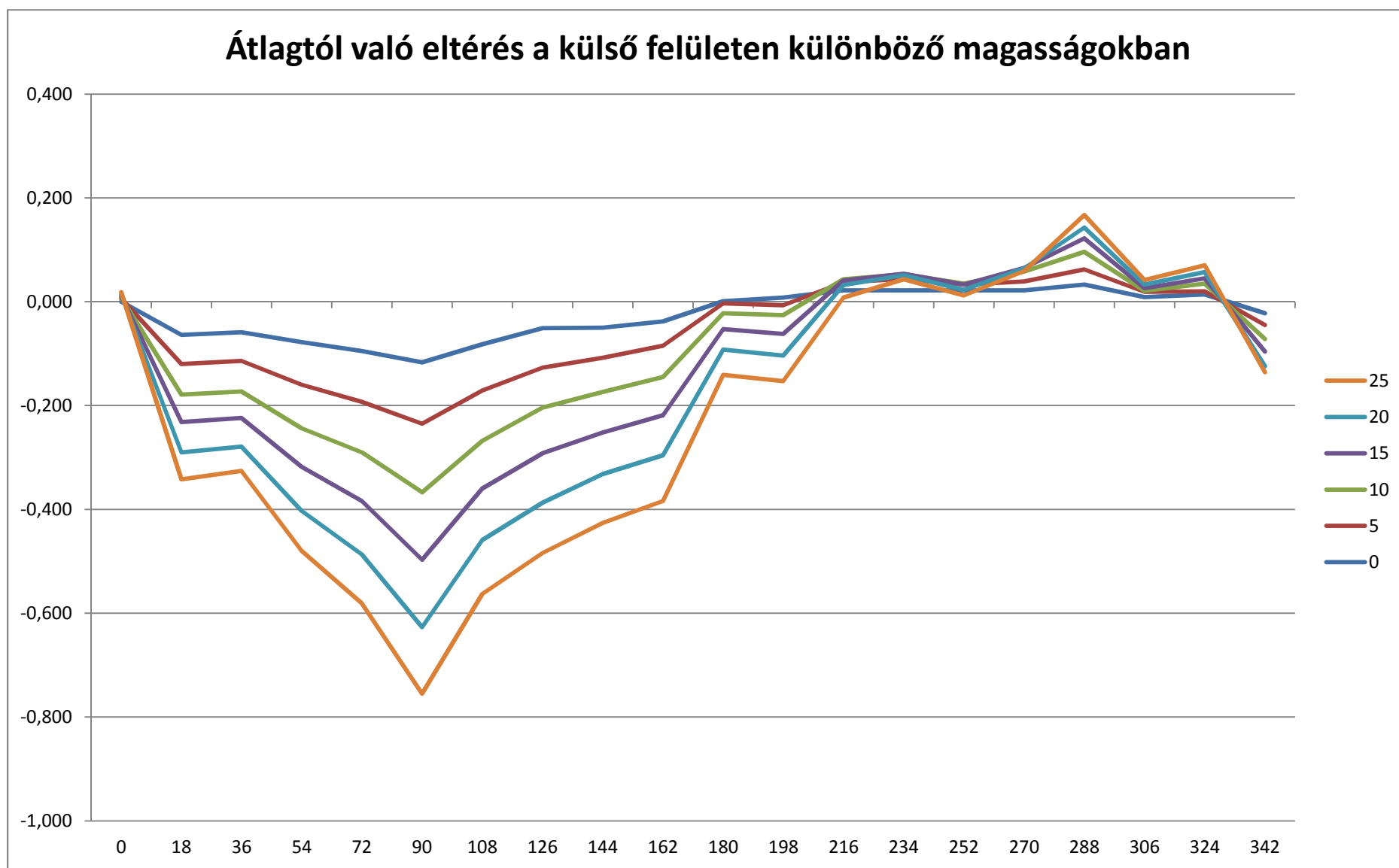
Az átlagtól való eltérések a külső felületen



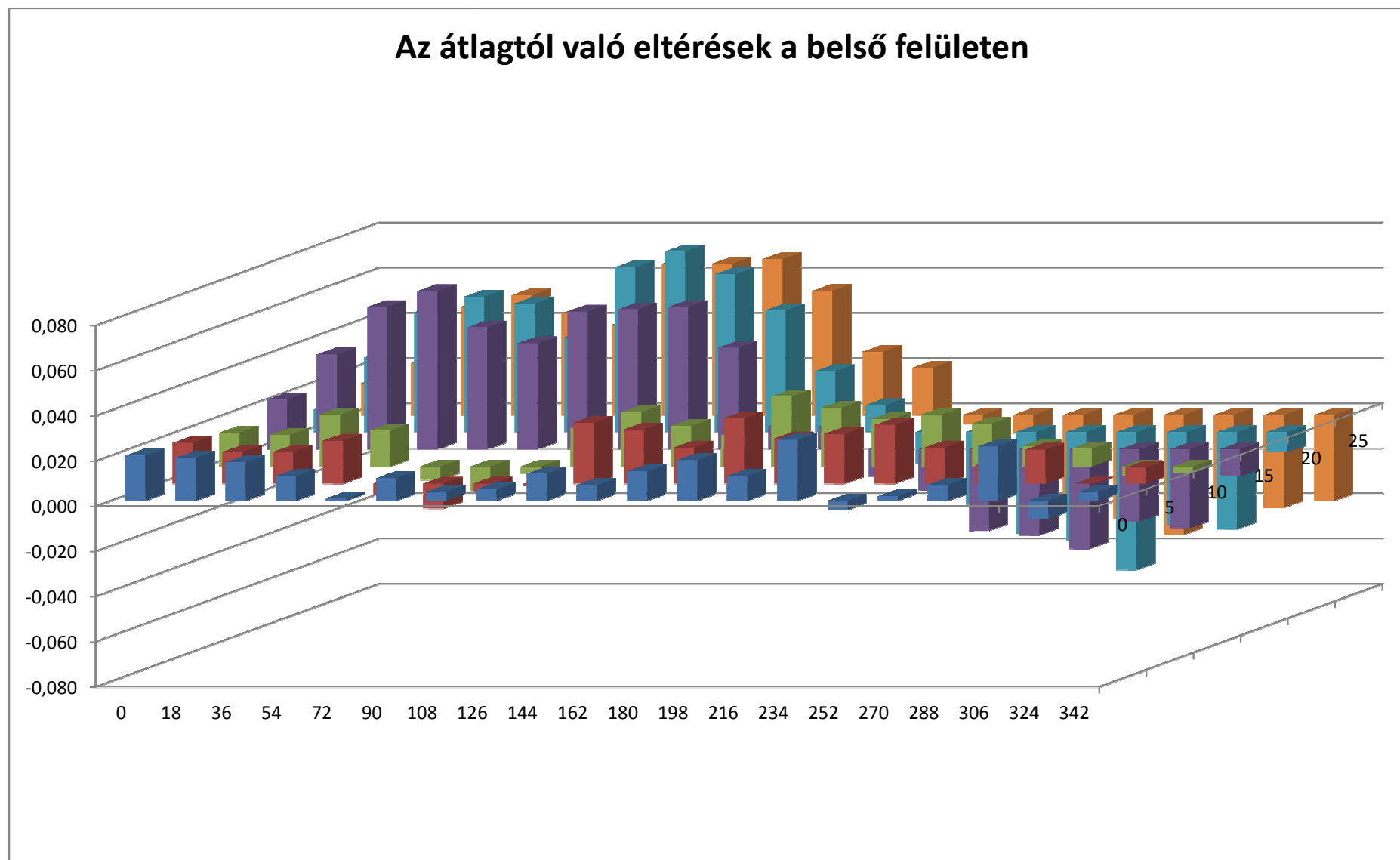
D2.1 diagram: A 2. test átlagtól való eltérések a külső felületen



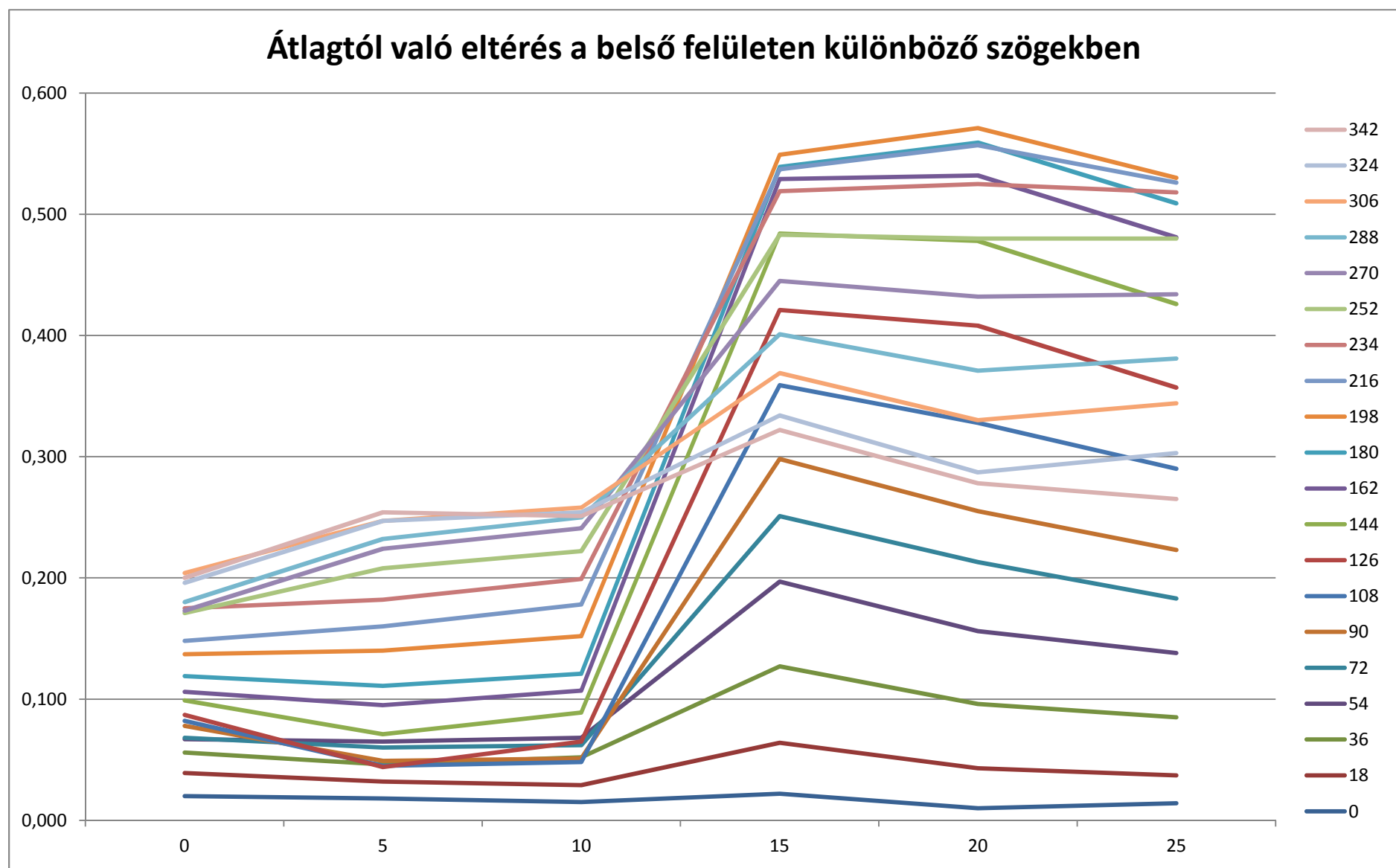
D2.2 diagram: A 2. test átlagtól való eltérése a külső felületen különböző szögekben



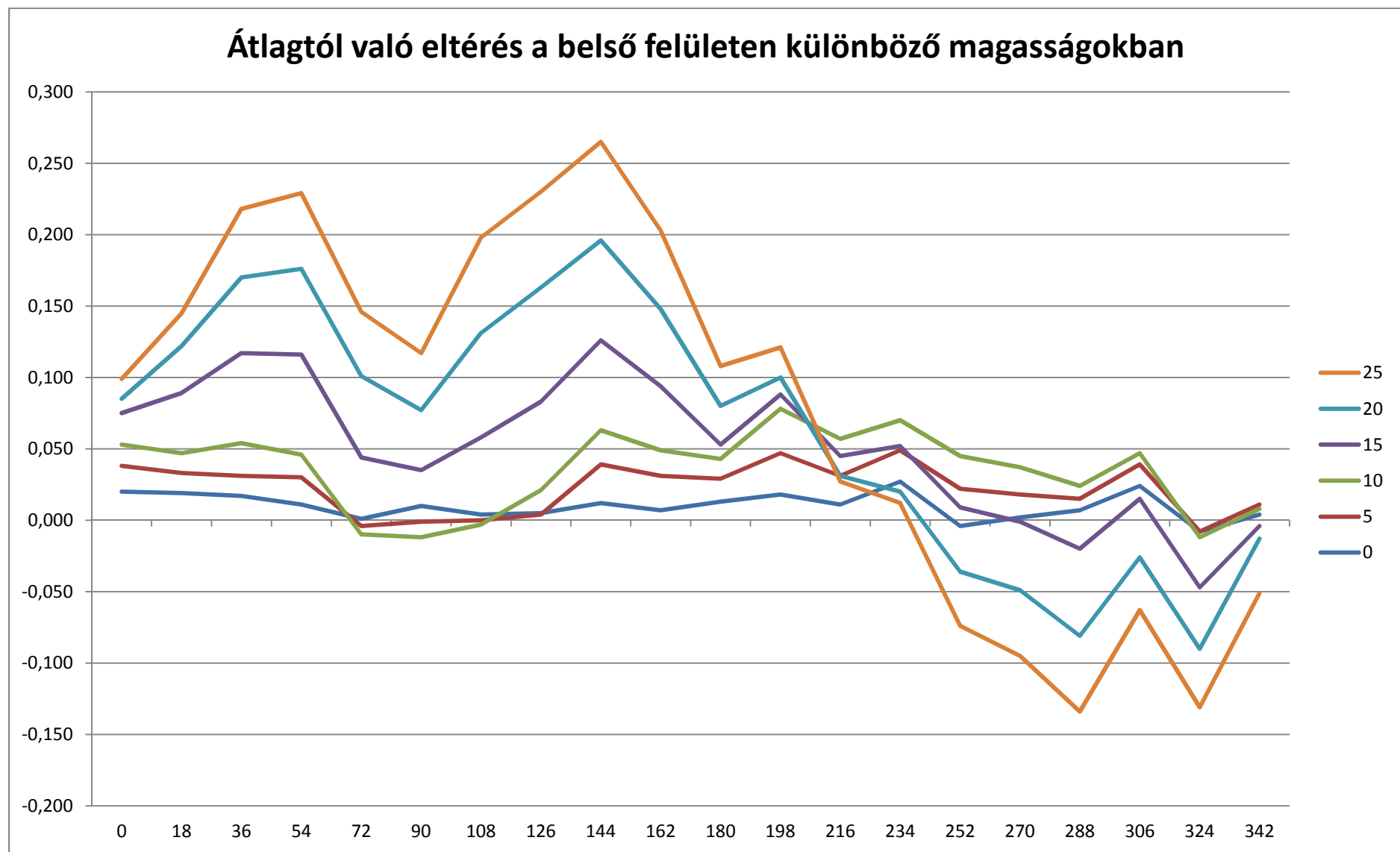
D2.3 diagram: A 2. test átlagtól való eltérése a külső felületen különböző magasságokban



D2.4 diagram: A 2. test átlagtól való eltérések a belső felületen

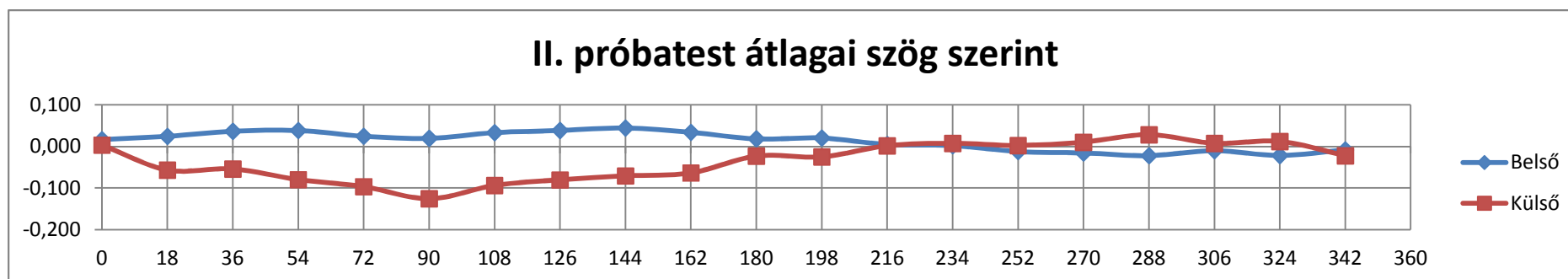


D2.5 diagram: A 2. test átlagtól való eltérése a belső felületen különböző szögekben

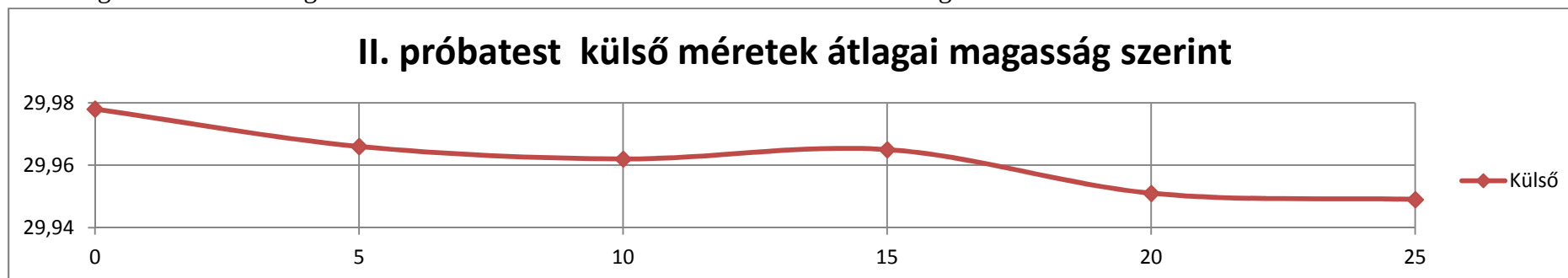


D2.6 diagram: A 2. test átlagtól való eltérése a belső felületen különböző magasságokban

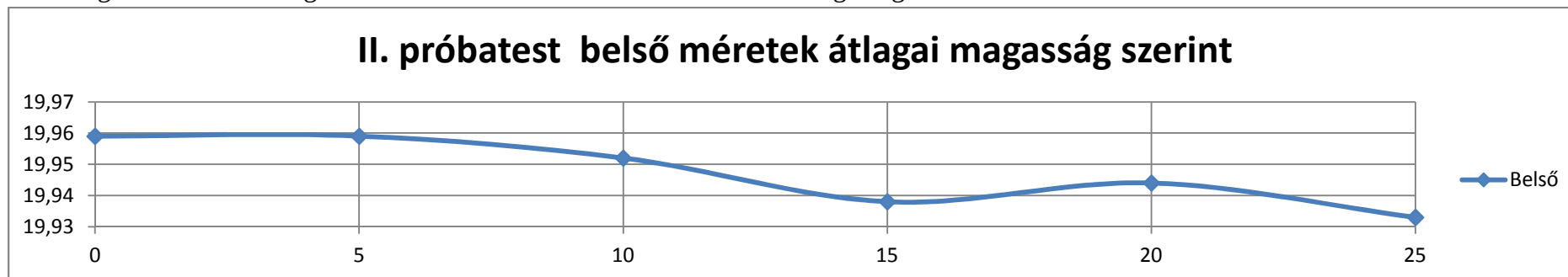
Átlagok grafikonjai



D2.7 diagram: A 2. test átlagtól való eltérése a külső- és belső felületen különböző szögekben

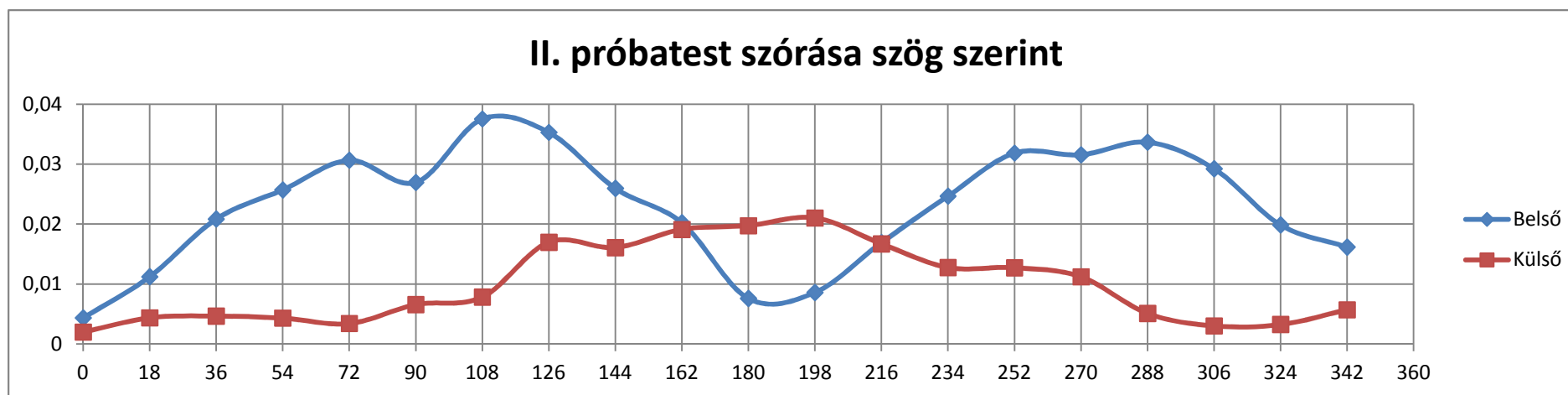


D2.8 diagram: A 2. test átlagtól való eltérése a külső felületen különböző magasságokban

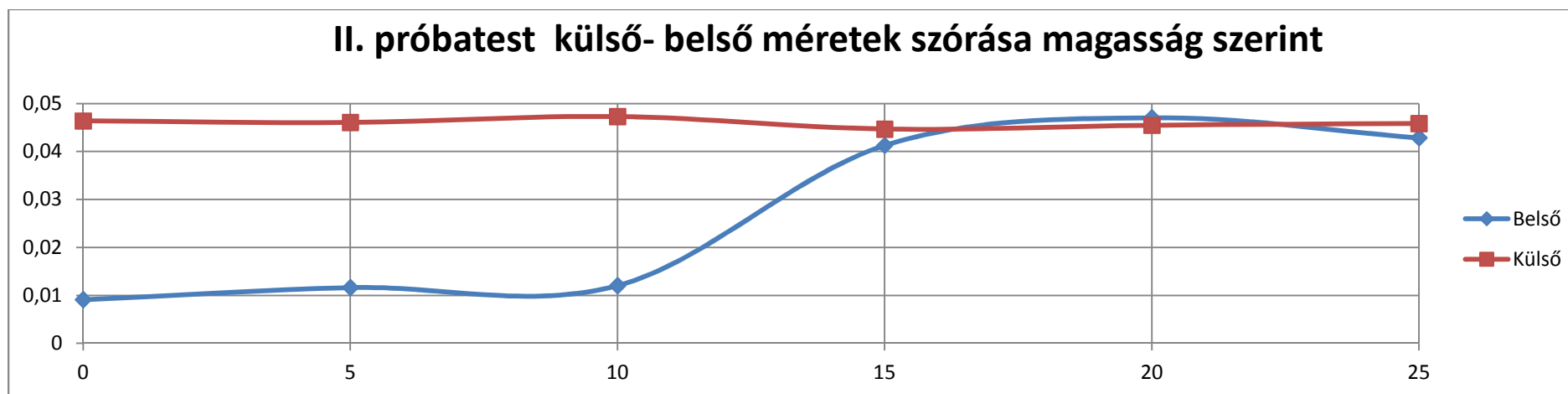


D2.9 diagram: A 2. test átlagtól való eltérése a belső felületen különböző magasságokban

Szórások grafikonjai



D2.10 diagram: A 2. test külső- belső eltéréseinek szórása szög szerint



D2.11 diagram: A 2. test külső- belső eltéréseinek szórása magasság szerint

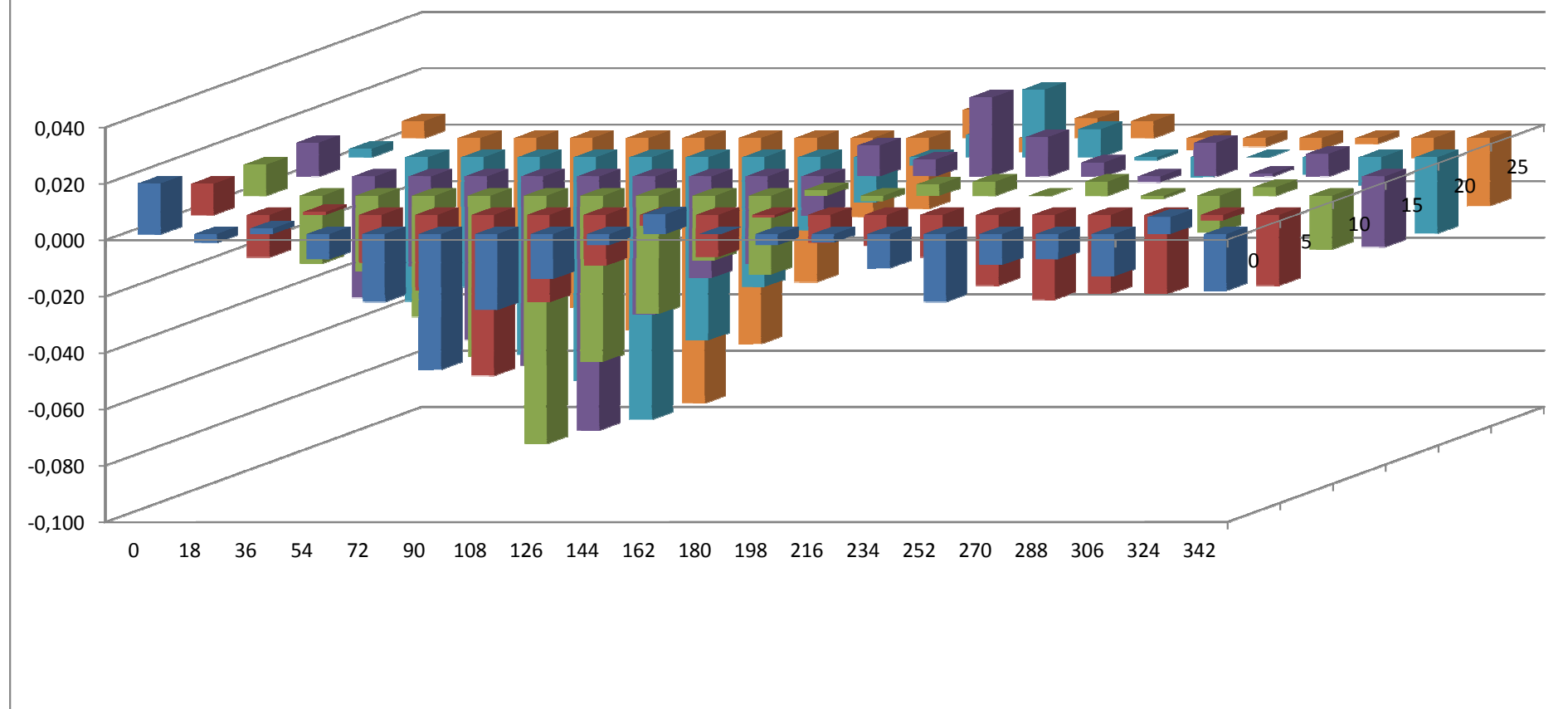
Fok	Orientáció	0	5	10	15	20	25	Átlag	Szórás
0	1	0,018	0,011	0,011	0,012	0,003	0,006	0,010	0,0052
18	2	-0,003	-0,015	-0,024	-0,043	-0,051	-0,032	-0,028	0,0178
36	3	0,002	0,001	-0,027	-0,032	-0,046	-0,038	-0,023	0,0203
54	4	-0,009	-0,017	-0,043	-0,058	-0,070	-0,060	-0,043	0,0248
72	5	-0,024	-0,027	-0,057	-0,067	-0,079	-0,068	-0,054	0,0229
90	6	-0,048	-0,057	-0,088	-0,090	-0,093	-0,094	-0,078	0,0203
108	7	-0,027	-0,031	-0,059	-0,049	-0,065	-0,073	-0,051	0,0186
126	8	-0,016	-0,018	-0,042	-0,036	-0,046	-0,051	-0,035	0,0147
144	9	-0,004	-0,004	-0,023	-0,031	-0,026	-0,028	-0,019	0,0122
162	10	0,007	-0,015	-0,028	-0,014	-0,016	-0,025	-0,015	0,0123
180	11	0,000	-0,001	0,002	0,011	-0,003	0,010	0,003	0,0059
198	12	-0,004	-0,010	-0,002	0,006	0,008	-0,005	-0,001	0,0069
216	13	-0,003	-0,011	0,004	0,028	0,024	0,007	0,008	0,0152
234	14	-0,012	-0,015	0,005	0,014	0,010	0,006	0,001	0,012
252	15	-0,024	-0,025	0,000	0,005	-0,001	-0,004	-0,008	0,013
270	16	-0,011	-0,030	0,005	-0,002	-0,007	-0,003	-0,008	0,012
288	17	-0,009	-0,028	-0,001	0,012	0,000	-0,004	-0,005	0,0132
306	18	-0,015	-0,028	-0,013	0,001	-0,006	-0,002	-0,011	0,0106
324	19	0,006	-0,002	0,003	0,008	-0,010	-0,007	0,000	0,0072
342	20	-0,020	-0,025	-0,019	-0,025	-0,027	-0,024	-0,023	0,0031
Átlag		29,98	29,963	29,966	29,967	29,955	29,944	29,963	0,0121
Szórás		0,0146	0,015	0,0268	0,0322	0,0332	0,0306		

T3.1 táblázat: A 3. test adatai a külső felületen

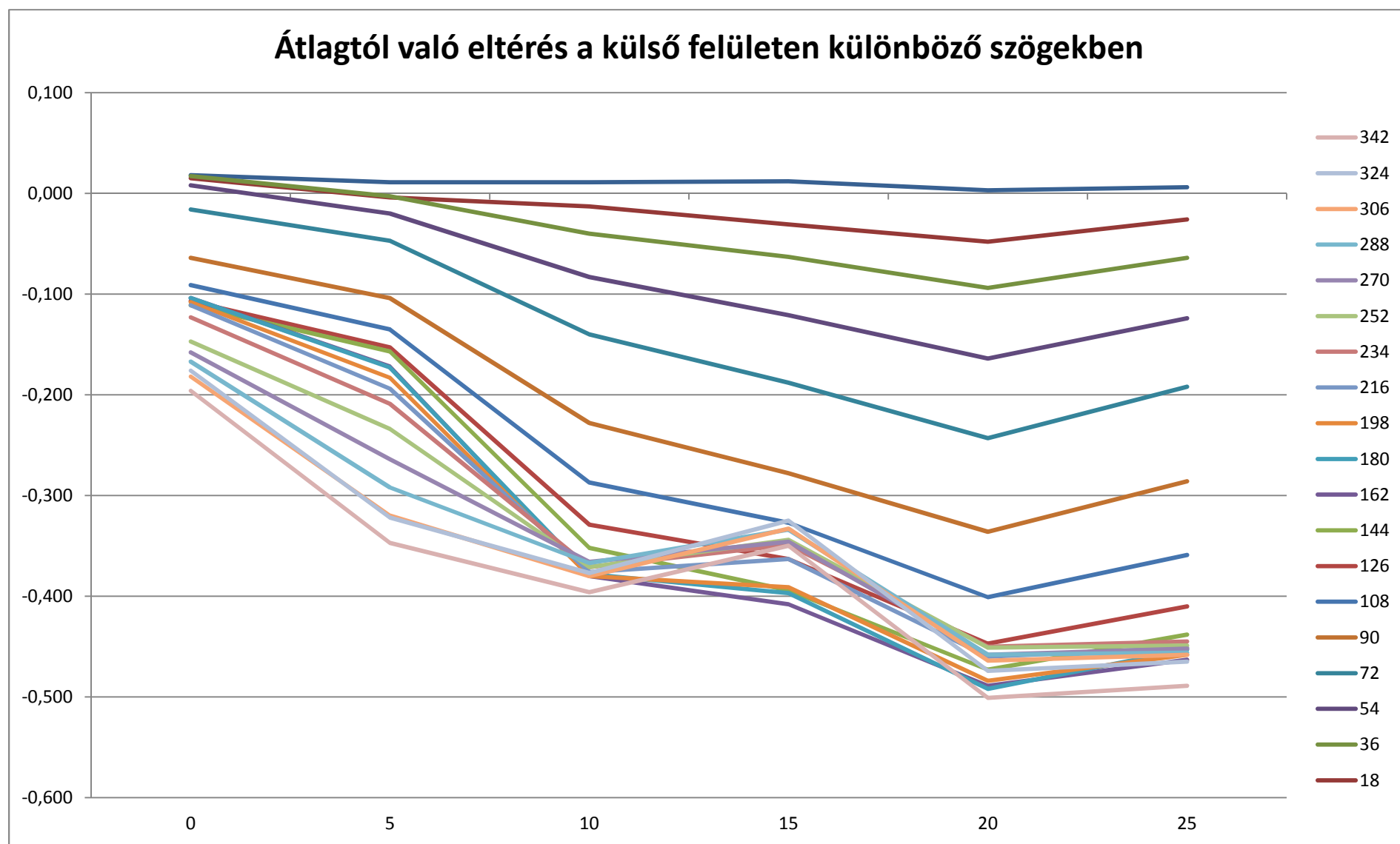
Fok	Orientáció	0	5	10	15	20	25	Átlag	Szórás
0	1	0,014	0,032	0,029	0,040	0,042	0,058	0,036	0,0147
18	2	0,026	0,025	0,036	0,060	0,055	0,058	0,043	0,0162
36	3	0,015	0,024	0,041	0,065	0,069	0,065	0,047	0,0233
54	4	0,020	0,014	0,051	0,067	0,061	0,066	0,047	0,0236
72	5	0,012	0,014	0,044	0,053	0,047	0,060	0,038	0,0204
90	6	0,005	-0,005	0,032	0,038	0,034	0,044	0,025	0,0198
108	7	0,008	0,012	0,040	0,057	0,055	0,062	0,039	0,0237
126	8	0,004	0,024	0,024	0,045	0,044	0,059	0,033	0,0197
144	9	0,023	0,025	0,042	0,047	0,044	0,039	0,037	0,0102
162	10	0,021	0,008	0,026	0,028	0,033	0,039	0,026	0,0107
180	11	0,044	0,042	0,048	0,036	0,045	0,047	0,044	0,0043
198	12	0,018	0,024	0,013	0,019	0,029	0,024	0,021	0,0056
216	13	0,021	0,035	0,010	-0,005	0,001	0,012	0,012	0,0143
234	14	0,007	0,024	0,014	0,004	0,006	0,003	0,010	0,008
252	15	0,010	0,009	-0,017	-0,017	-0,020	-0,015	-0,008	0,0139
270	16	-0,004	0,001	0,001	-0,017	-0,007	-0,003	-0,005	0,0067
288	17	0,006	0,012	-0,010	-0,001	-0,003	0,005	0,002	0,0078
306	18	0,025	0,019	0,005	0,002	0,006	0,014	0,012	0,009
324	19	0,028	0,024	0,008	0,021	0,020	0,025	0,021	0,007
342	20	0,024	0,033	0,022	0,020	0,023	0,027	0,025	0,0046
Átlag		19,96	19,961	19,951	19,935	19,946	19,946	19,950	0,0098
Szórás		0,0109	0,0117	0,0195	0,0269	0,025	0,0254		

T3.2 táblázat: A 3. test adatai a belső felületen

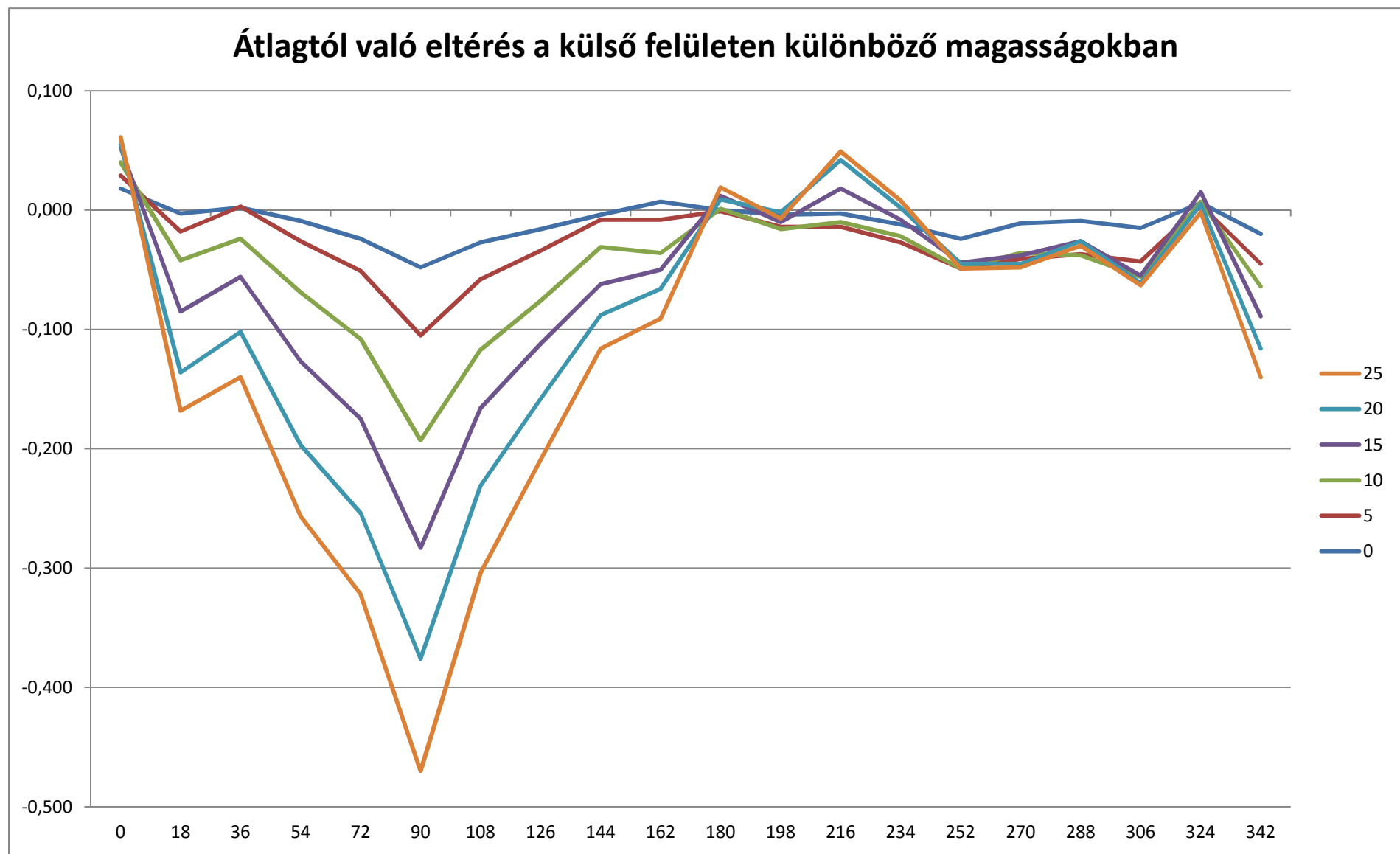
Az átlagtól való eltérések a külső felületen



D3.1 diagram: A 3. test átlagtól való eltérések a külső felületen

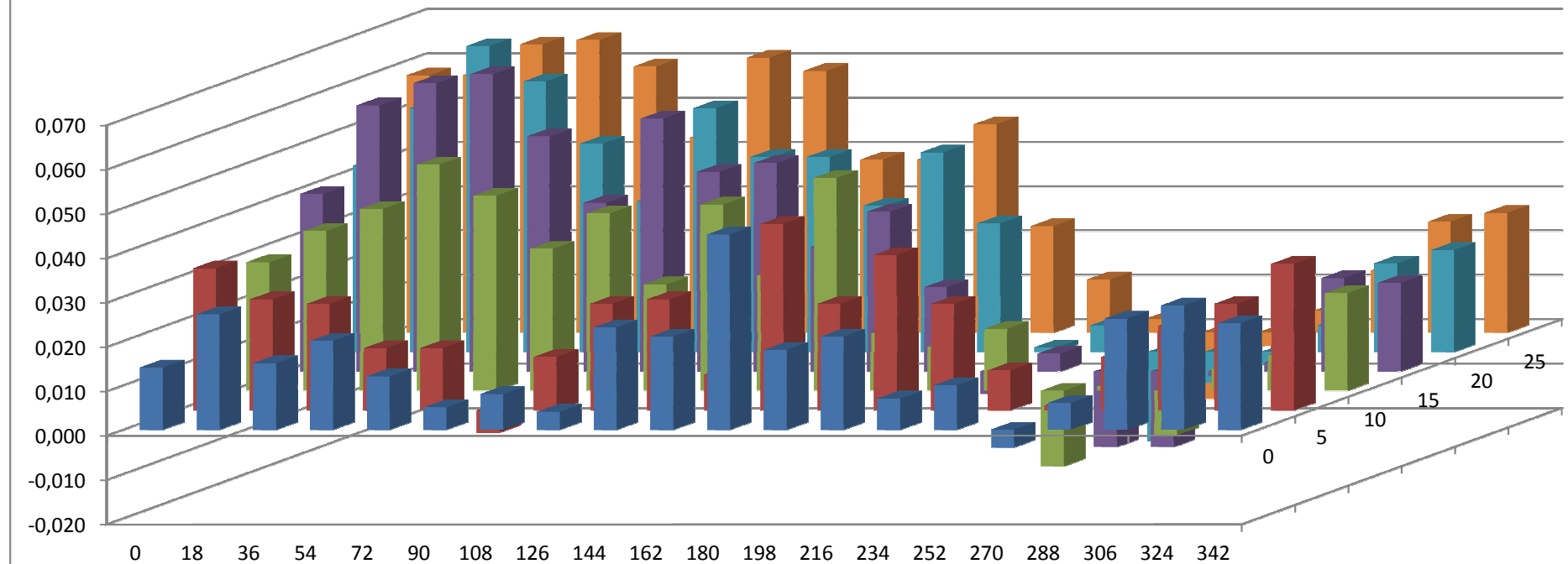


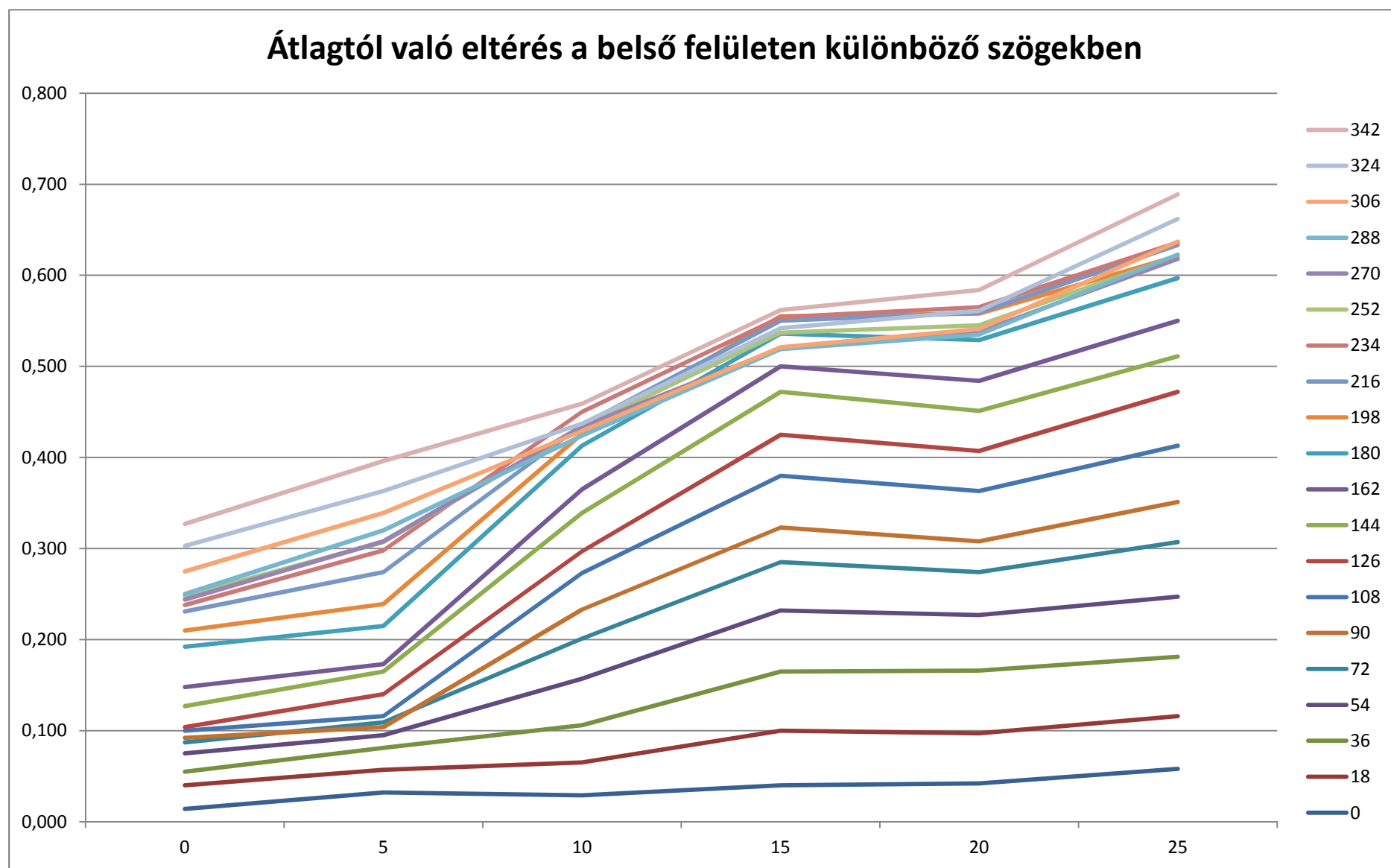
D3.2 diagram: A 3. test átlagtól való eltérése a külső felületen különböző szögekben



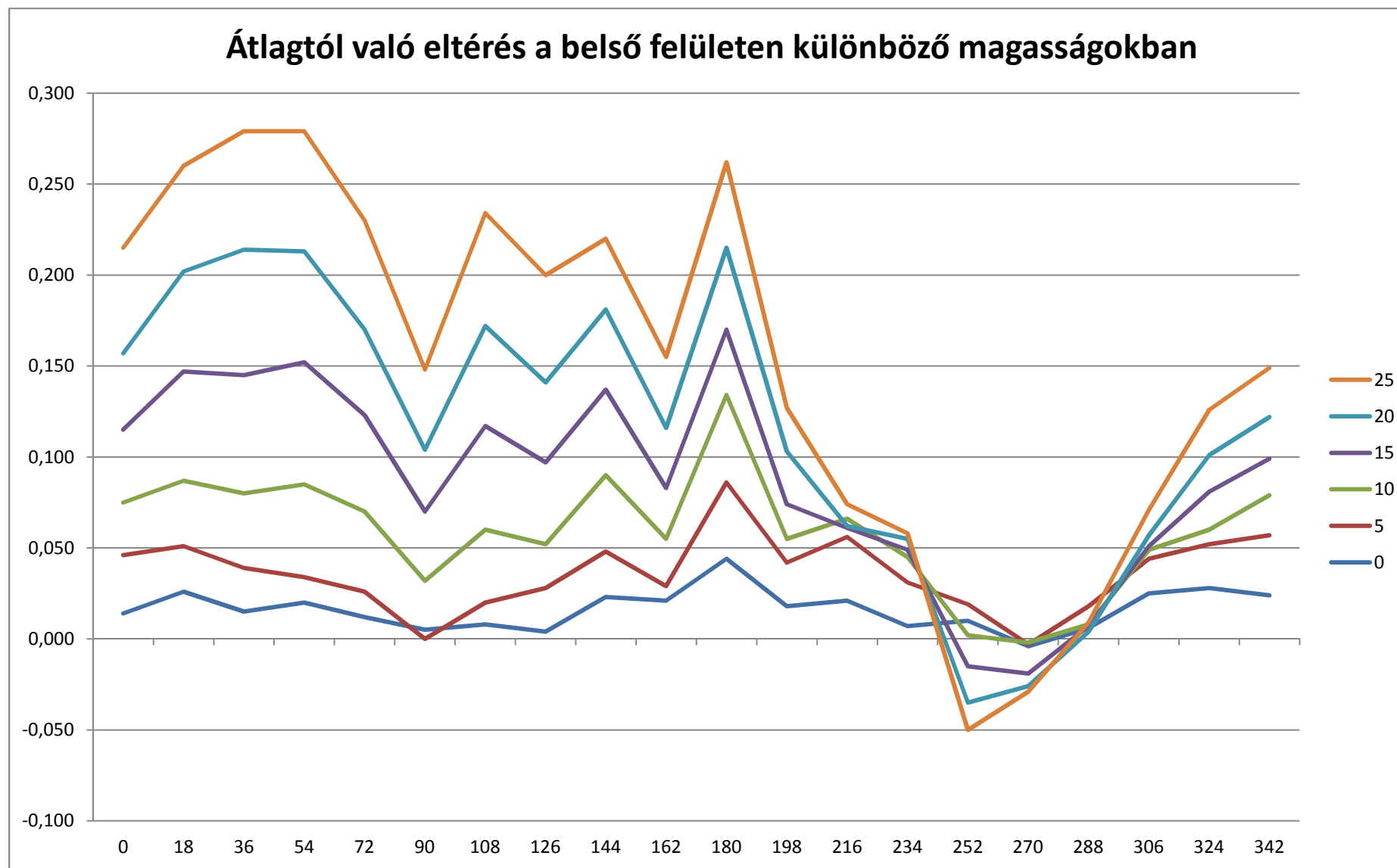
D3.3 diagram: A 3. test átlagtól való eltérése a külső felületen különböző magasságokban

Az átlagtól való eltérések a belső felületen



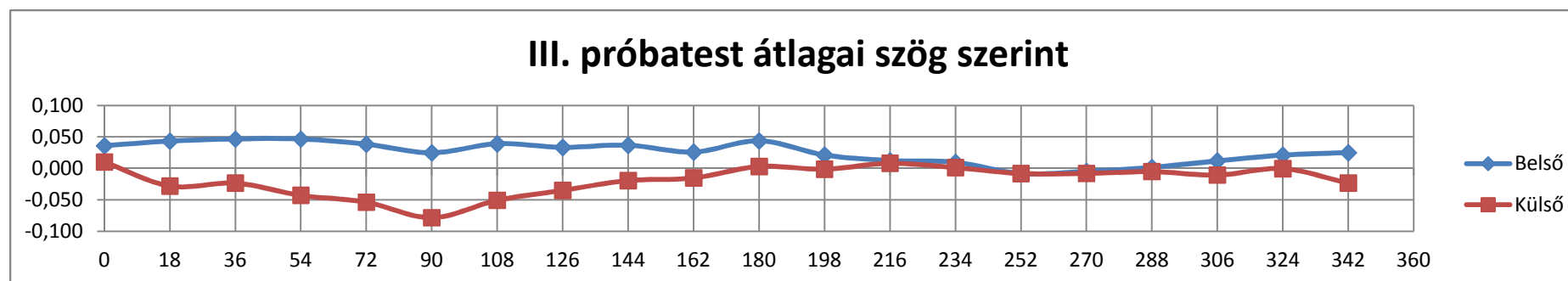


D3.5 diagram: A 3. test átlagtól való eltérése a belső felületen különböző szögekben

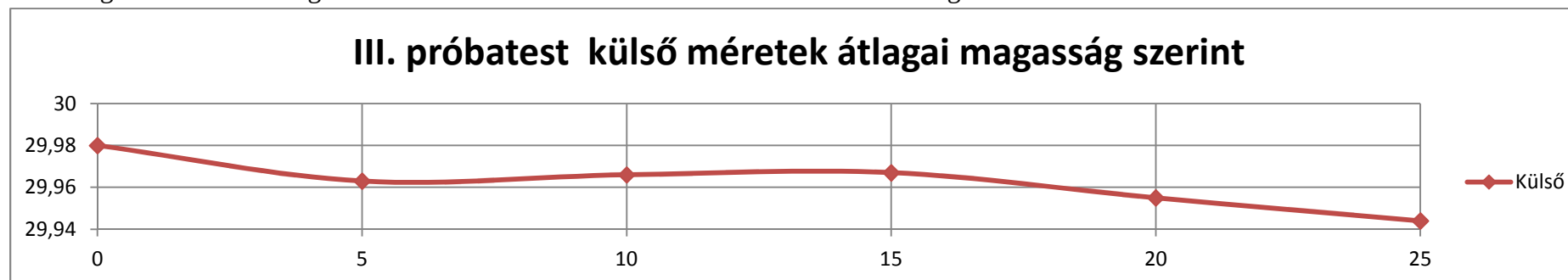


D3.6 diagram: A 3. test átlagtól való eltérése a belső felületen különböző magasságokban

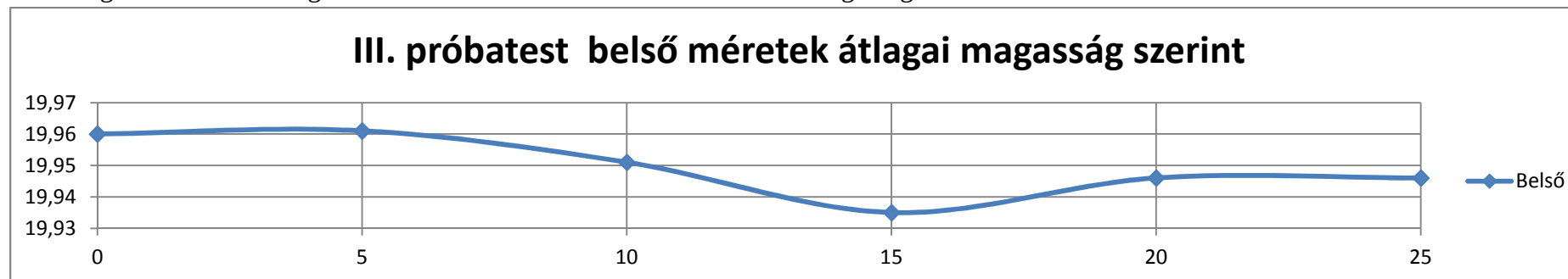
Átlagok grafikonjai



D3.7 diagram: A 3. test átlagtól való eltérése a külső- és belső felületen különböző szögekben

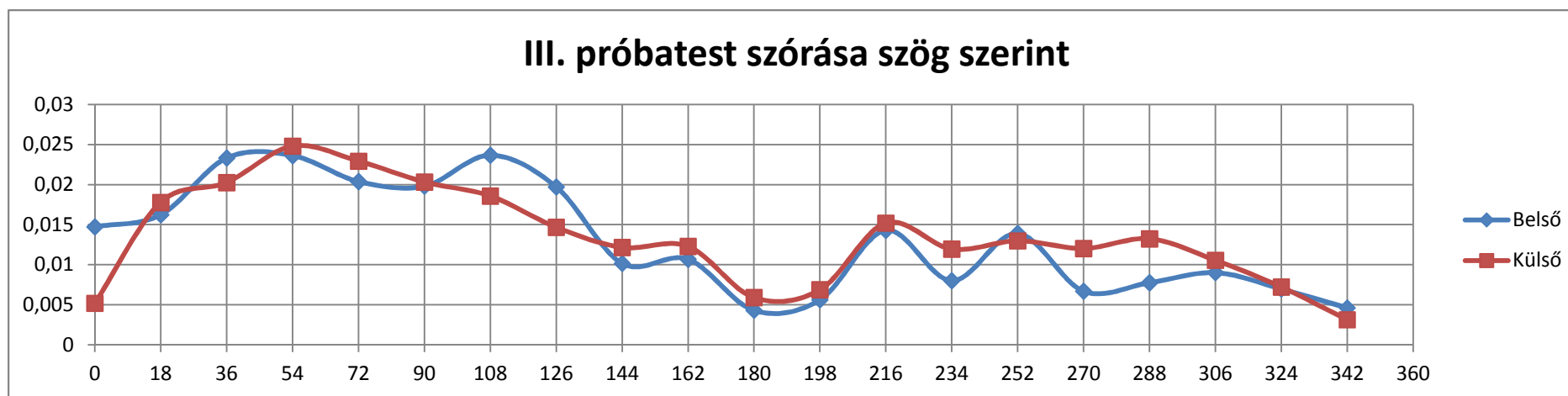


D3.8 diagram: A 3. test átlagtól való eltérése a külső felületen különböző magasságokban

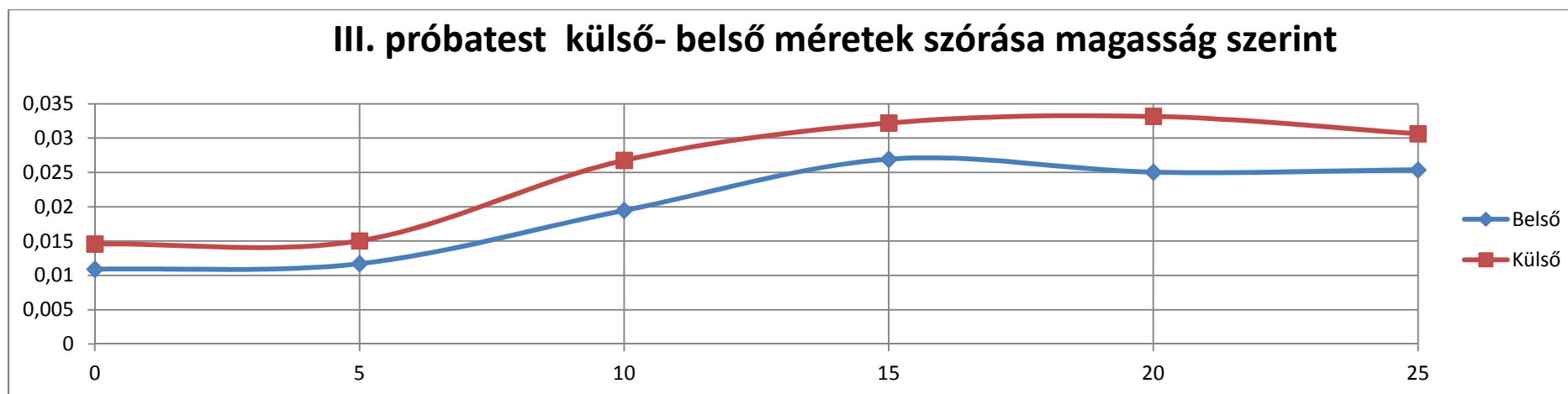


D3.9 diagram: A 3. test átlagtól való eltérése a belső felületen különböző magasságokban

Szórások grafikonjai



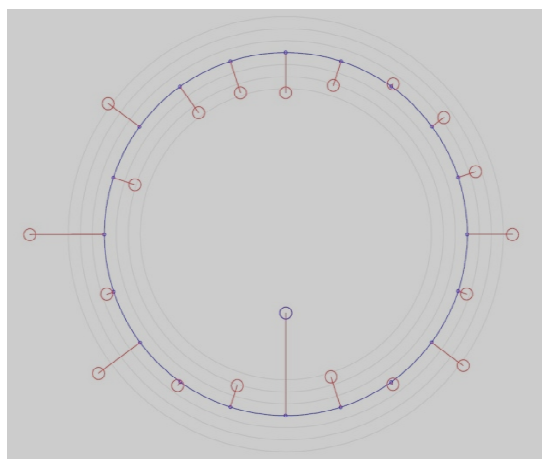
D3.10 diagram: A 3. test külső- belső eltéréseinek szórása szög szerint



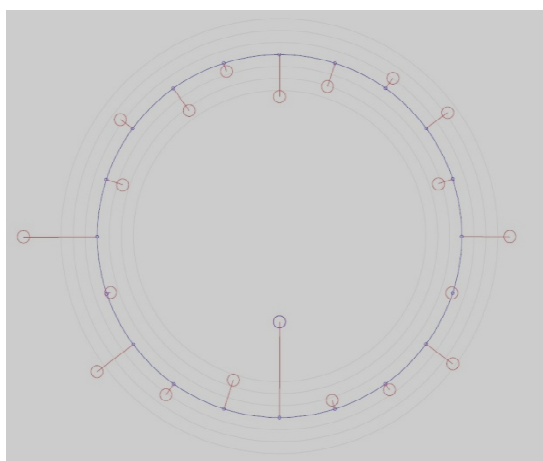
D3.11 diagram: A 3. test külső- belső eltéréseinek szórása magasság szerint

2. számú melléklet

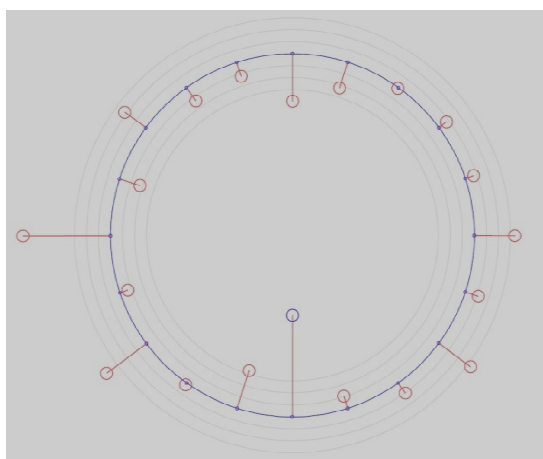
Külső méretek



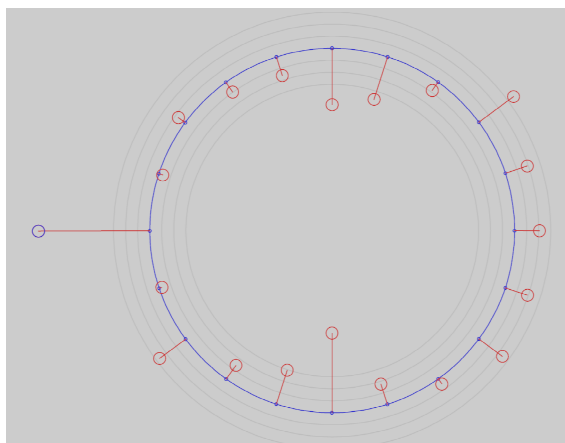
1. ábra 3D koordináta mérőgépen mért adatok az 1. test 5mm-es mélységében



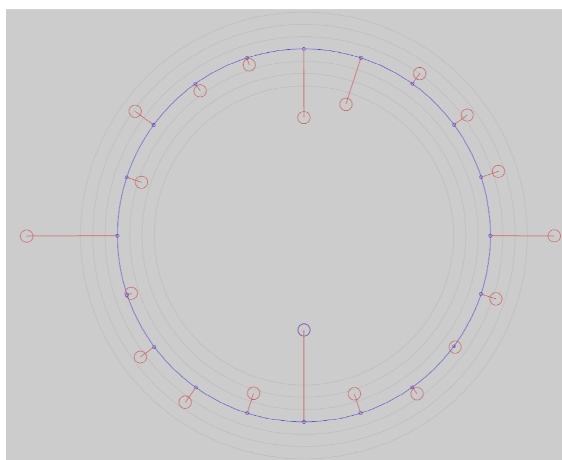
2. ábra 3D koordináta mérőgépen mért adatok az 2. test 5mm-es mélységében



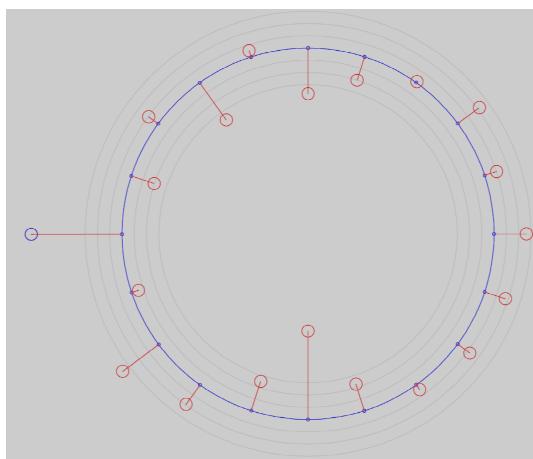
3. ábra 3D koordináta mérőgépen mért adatok az 3. test 5mm-es mélységében



4. ábra 3D koordináta mérőgépen mért adatok az 1. test 20mm-es mélységében

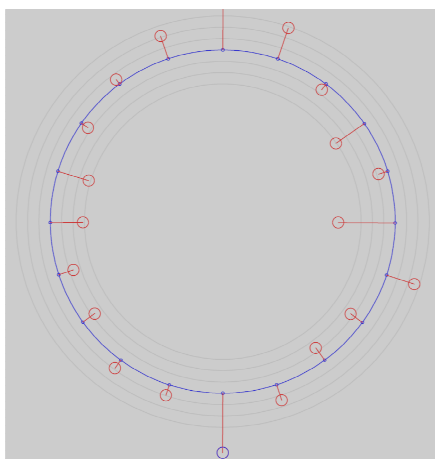


5. ábra 3D koordináta mérőgépen mért adatok az 2. test 20mm-es mélységében

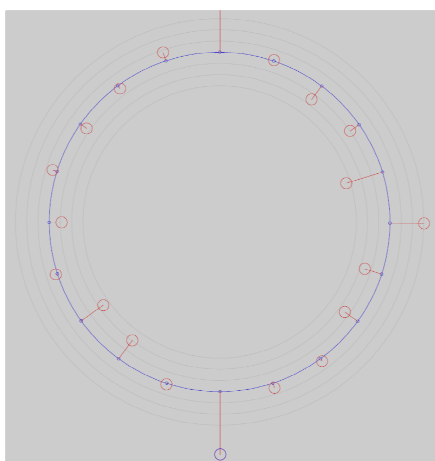


6. ábra 3D koordináta mérőgépen mért adatok az 3. test 20mm-es mélységében

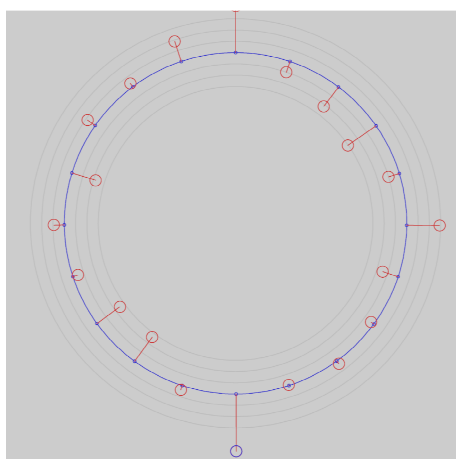
Belső méretek



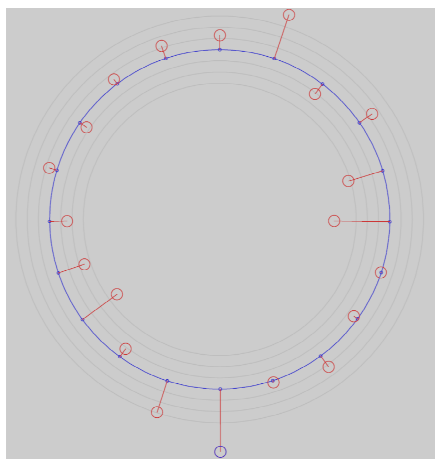
7. **ábra** 3D koordináta mérőgépen mért adatok az 1. test 5mm-es mélységében



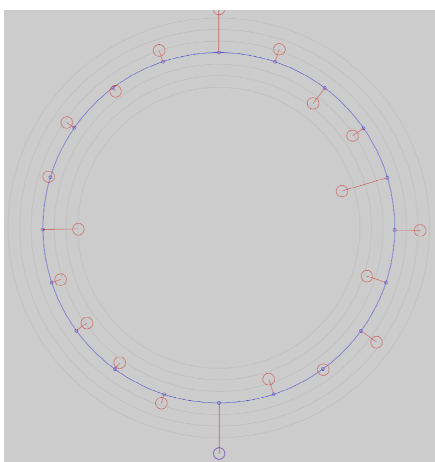
8. **ábra** 3D koordináta mérőgépen mért adatok az 2. test 5mm-es mélységében



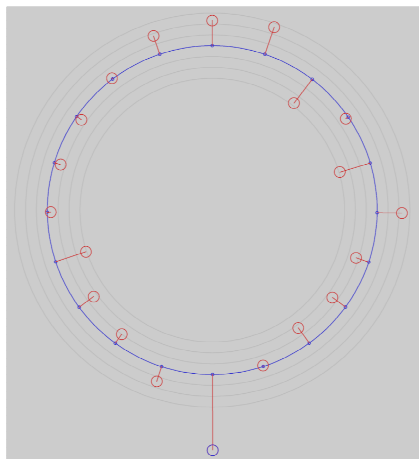
9. **ábra** 3D koordináta mérőgépen mért adatok az 3. test 5mm-es mélységében



10. ábra 3D koordináta mérőgépen mért adatok az 1. test 20mm-es mélységében



11. ábra 3D koordináta mérőgépen mért adatok az 2. test 20mm-es mélységében



12. ábra 3D koordináta mérőgépen mért adatok az 3. test 20mm-es mélységében