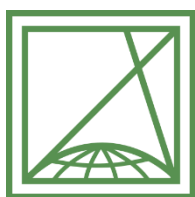




M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Tárgyszkenelési technológiák összehasonlító elemzése



Készítette:

Nagy Nándor Antal

Építőmérnök MSc-s hallgató

Konzulensek:

Dr. Lovas Tamás

Egyetemi docens, Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék

Dr. Somogyi József Árpád

Adjunktus, Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék

Külső konzulens:

Hadzijanisz Konsztantinosz, 4iG Nyrt.

AZ INNOVÁCIÓS ÉS TECHNOLÓGIAI MINISZTERIUM ÚNKP-20-2 KÓDSZÁMÚ ÚJ NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT



NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL

ÚNKP Új Nemzeti
Kiválóság Program

Tartalom

1. Tárgyszkenelési megoldások	4
1.1. Time of Flight (ToF) technológia	4
1.2. Strukturált fényű szkennerek (SLS)	4
2. Térbeli adatgyűjtés amatőr és professzionális szenzorokkal	5
2.1. A telefon bemutatása	5
2.2. A Breuckmann smartSCAN szkennerek bemutatása	7
2.3. Az Artec Eva szkennerek bemutatása	8
3. A modellek elkészítése és bemutatása	9
3.1. Modellek létrehozása okostelefonnal	11
3.2. Modellek létrehozása Breuckmann szkennerekkel	17
3.3. Modellek létrehozása Artec Eva szkennerekkel	19
4. Telefon mélységkamerájával előállított modellek referenciákkal való összehasonlítása. 21	
4.1. AutoCAD szoftverben készített modellek használata referenciaként	21
4.2. Artec Eva modellek használata referenciaként.....	31
5. Különböző technikákkal előállított modellek összehasonlítása síkmetszetekben	38
5.1. Breuckmann smartSCAN és a telefon modelljeinek összehasonlítása.....	41
5.2. Artec Eva és a telefon modelljeinek összehasonlítása.....	49
6. Összefoglalás	55
Források.....	56
Mellékletek.....	57

1. Tárgyszkenelési megoldások

Jelen kutatásban tárgyszkenelési megoldásokat hasonlítok össze egymással, ezek közül kiemelten egy okostelefonba épített Time of Flight (ToF) mélységkamera nyújtotta lehetőségeket fedezem fel. Megvizsgálom a telefon beépített ToF kamerájával készített modelleket és összehasonlítom referenciaként használt professzionális szkennerek által előállított modellekkel.

Tárgyszkeneléssel jellemzően pontfelhőket, a pontfelhőkből pedig modelleket lehet létrehozni, amelyeket kiértékelhetünk, minőség-ellenőrzés céljából (összehasonlíthatjuk tervezett, vagy korábbi állapotokkal), vagy az alapján mérnöki visszafejtést (reverse engineering tevékenységet) végezhetünk.

1.1. Time of Flight (ToF) technológia

A 3D képkalkotásnak több megoldása is létezik, ezek egyike a ToF technológián alapuló mélységkamerák használata. Az összehasonlításban részt vevő eszközök közül a Samsung hivatalos oldala szerint az okostelefon rendelkezik ToF kamerával [1].

A ToF kamerák az ipari kamerákhoz hasonlóan optikából, szenzorból és interfészből állnak, azonban ezek mellett beépített fényforrást is tartalmaznak. Ezek az eszközök igen kompaktnak mondhatók és a használatuk is egyszerű.

Működés közben a ToF kamera modulált fényt bocsát ki, és méri, hogy az objektumról visszaverődő fény mennyi idő alatt jut vissza a szenzorba, így távolságot tud számítani az eltelt időből. A kibocsátott fény hullámhossza a közeli infravörös tartományban van, így az ember számára nem látható. A szenzorba érkező fénynek csak egy része a visszavert fény; a környezetről a szenzorba juthat bármilyen más forrásból származó fény is, azonban csak a visszavert fény rendelkezik mélység információval [2], [3], [4].

A technológia egyik legnagyobb előnye, hogy mivel a mélységérzékelés független az intenzitástól és a tárgyak színétől, a vizsgált tárgy viszonylag egyszerű algoritmusok segítségével elkülöníthető a háttértől [3].

1.2. Strukturált fényű szkennerek (SLS)

Egy másik tárgyszkenelési megoldás a strukturált fény vetítésének módszere, ezt a strukturált fényű szkennerek (Structured Light Scanner – SLS) végzik. A vizsgált szkennerek közül ezt a technikát használja a Breuckmann smartSCAN és az Artec Eva tárgyszkenner.

Az SLS technikát használó berendezések legalább egy kamerából és egy aktív fényforrásból (pl. LED villanó, projektor) állnak. A technika alapja egy előre definiált minta (vékony fénysávok, egy pont vagy véletlen mintázat) vetítése a felmérendő objektumra. A berendezések eltérő vastagságú és színű fénysávokat vetítenek a szkennelendő tárgyra, egyes eszközöknél a vetített fénysávokat az alkalmazott hullámhossz miatt szabad szemmel nem látjuk. Egy adott fénysáv-struktúra kivetítése után a szkennerekbe épített szenzor rögzíti az objektum képét a rávetített fénysávokkal együtt, majd a fényforrás a következő struktúrát vetíti, és így tovább.

Az objektum ezeket a vékony fénysávokat valamilyen mértékben eltorzítja, ezekből a torzulásokból pedig mélység információ számítható [5], [6], [7].

A rohamos technológiai fejlődés hatására egyre újabb és újabb technikák és eszközök jelentek meg a piacon, mindegyik valamilyen új eljárással kísérletezett (sztereo kamera, SLS, ToF stb.), hogy pontosabban, gyorsabban tudja előállítani a modelleket az eltérő igényeknek megfelelően. Minden eljárásnak megvan a maga előnye és hátránya, ezek ismeretében mindig a feladat elvégzésére leginkább alkalmas eljárást kell választanunk. Ebben segíthet az 1. táblázat.

Szemponatok	Strukturált fény	Time of Flight
Szoftver összetettsége	Közepes	Alacsony
Gyártási költség	Magas	Közepes
Mérés közbeni válaszügy	Lassú	Gyors
Mélységmérés pontossága	Magas	Közepes
Teljesítmény gyenge fényviszonyok esetén	Jó	Jó
Teljesítmény erős fényviszonyok esetén	Gyenge	Jó
Energiafogyasztás	Közepes	Állítható
Felhasználás		
Játékok	X	X
3D filmek		
3D szkennelés	X	X
Felhasználói felület irányítása		X
Kiterjesztett valóság (AR)		X

1. táblázat: A két vizsgált modellalkotó technológiát összehasonlító táblázat [2]

2. Térbeli adatgyűjtés amatőr és professzionális szenzorokkal

A vizsgálat fő célja a telefon, mint amatőr, bárki által megvásárolható és ingyenes alkalmazás segítségével használható eszköz térmodellezési képességeink vizsgálata. Ehhez referenciamodelleket használtunk, melyeket már évek óta, széles körben alkalmazott, alaposan vizsgált (és publikált) szenzorokkal állítottunk elő. A dolgozat másik célja olyan összehasonlító elemzések elvégzése, melyek alkalmasak az egyes térmodellek minősítésére. Jelen fejezet az adatgyűjtő eszközöket mutatja be.

2.1. A telefon bemutatása

Jelen dolgozat egyik célja a Samsung Galaxy Note10+ készülék 3D szkennérének tesztelése, és az általa készített modellek összehasonlítása más, az iparban alkalmazott skennerek által előállított modellekkel. Ehhez különböző objektumokat vizsgálom meg, hogy több szempontból is elemezhessem a telefon által előállított modelleket. A szabályos alakú tárgyakon azt vizsgálom, hogy a telefon mennyire adja vissza a pontos geometriai méreteket. Az eltérő felületek (fényes vagy matt) kapcsán elemzem, hogy a felületkezeléseknek milyen hatása van a modellalkotásra.

A Samsung elektronikai cikket forgalmazó cég az utóbbi években élen járt az okostelefonok fejlesztésében és eladásában is. 2019. augusztus 7-én jelent meg az addig is nagy sikernek örvendő Note széria két új tagja, a Samsung Galaxy Note10 és Note10+. A két készülék közül az utóbbit ellátták egy 3D szkennelvel, amely Time of Flight technológiát alkalmazva képes 3D modelleket előállítani [8]. A Note10+ készülék megjelenésével egyidejűleg került fel a Google Play Áruházba a „3D szkennel” nevű app is [1], amely segítségével a felhasználó a telefonnal képes térbeli modelleket készíteni. A Note10+ készüléken kívül korábban megjelent, szintén 3D szkennelvel felszerelt Samsung okostelefonok is hasznát vehetik ennek az applikációnak, mint például a Samsung Galaxy S10+ 5G, valamint a Samsung Galaxy A80 is. Mások is kínálnak a 3D modellek létrehozására alkalmas ToF szenzort, ilyen például a Huawei P30 Pro és P40 Pro, sajtóhírek alapján több gyártó is hamarosan felszereli új készülékeit hasonló eszközökkel.

A Note10+ telefon (1. ábra) a 2019-es Samsung kínálat zászlóshajója volt, így a prémium telefonok felszereltségét is megkapta a szkennel mellett; 6,8 hüvelykes Dynamic AMOLED kijelzöt, 12 GB RAM-ot, 256 vagy 512 GB belső tárhelyt, IP68-as szabványnak megfelelő por- és vízállósági tanúsítványt, 3 hátlapi és egy előlapi kamerát. A telefon a kornak megfelelő legújabb operációs rendszerrel (Android 10, Samsung OneUI 1), és processzorral (Qualcomm Snapdragon 855 SM8150 vagy Samsung Exynos 9 9825) érkezett [9].

A nagy képernyő indokolja a szintén nagy, 4300 mAh-os akkumulátort is, amelyre a 3D szkennel miatt szintén szükség van, ugyanis a szkennelés jelentős energiaigénnyel jár.



1. ábra: Samsung Galaxy Note10+ okostelefon

2.2. A Breuckmann smartSCAN szkennert bemutatása

A Breuckmann SmartSCAN (2. ábra) egy olyan 3D mérő és digitalizáló rendszer, amellyel a gyártó adatai szerint igen nagy, 5-10 μm -es távmérési pontosságot is elérhet a labor körülmények között. Ennek a műszernek a használata adott méretű objektumra vetítve időigényesebb feladat, ebből kifolyólag gazdasági és idő ráfordítási okokból a mérendő objektum mérete nem lehet túl nagy kiterjedésű [10]. A szkennelés és feldolgozás eredménye egy felületmodell.



2. ábra: Breuckmann smartSCAN szkennert

A felmérő rendszer egy munkaállomásból (amelyen a mérést az Optocat feldolgozó szoftver segítségével lehet vezérelni), továbbá magából a műszerből áll, amely 2 db CCD kamerát tartalmaz ismert bázistávolságban egymástól. A két kamera között egy projektor található, mely mérés közben szabályos távolságközű, egymás után változó vonalas mintát vetít a mérendő objektumra. A felszereléshez tartozik továbbá egy forgató asztal is, amely kis tárgyak felmérésekor nyújt segítséget. Ezenkívül még a műszerhez tartozik a műszerállvány és a kalibráláshoz szükséges kalibrációs tábla is [10].

A műszer cserélhető tartozéka a kamerához és a projektorhoz tartozó lencserendszer, amely kiválasztása a méréstervezés egyik legfontosabb feladata. A lencserendszer típusait a látószög (FOV- Field of View), a kamerák távolsága és a fókusz távolság paraméterei szerint osztályozzák [10].

	Látószög: 27° Kamerák távolsága: 470 mm Fókusz távolság: 1.000 mm					
FOV jele [mm]	M-125	M-200	M-300	M-450	M-600	M-850
FOV mérete [mm]	105 x 90	170 x 140	240 x 200	335 x 280	500 x 380	650 x 560
Mélységélesség [mm]	60	100	150	240	300	400
x, y felbontás [μm]	45	70	100	140	205	265
Elméleti pontosság (z) [μm]	2	4	5	8	11	15
Zaj (z) [μm]	± 5	± 8	± 11	± 17	± 23	± 31
Jellemző pontosság [μm]	± 10	± 17	± 26	± 38	± 51	± 72
	Látószög: 32.5° Kamerák távolsága: 240 mm Fókusz távolság: 370 mm			Látószög: 18° Kamerák távolsága: 470 mm Fókusz távolság: 1.500 mm		
FOV jele [mm]	S-030	S-060	S-125	L-650	L-1500	
FOV mérete [mm]	25 x 20	50 x 40	120 x 80	500 x 400	1175 x 975	
Mélységélesség [mm]	15	25	60	320	750	
x, y felbontás [μm]	10	20	50	205	480	
Elméleti pontosság (z) [μm]	1	1	2	12	28	
Zaj (z) [μm]	± 2	± 2	± 5	± 25	± 59	
Jellemző pontosság [μm]	± 7	± 8	± 10	± 55	± 128	

2. táblázat: A Breuckmann smartSCAN szkennер cserélhető lencserendszerének adatai [10]

2.3. Az Artec Eva szkennер bemutatása

Az Artec Eva 3D szkennер (3. ábra) ideális választás közepes méretű tárgyak textúrázott és pontos 3D szkenneléséhez. Gyors, könnyű és rugalmas felhasználást tesz lehetővé. [11]

A szkennert kézben tartva kell körbejárni a szkennelendő objektumot, amelynek mérete lehet egész kicsi (akár egy rubik-kocka), vagy meglehetősen nagy (személygépkocsi). Az Artec Eva geometriát vagy geometriát és textúrát rögzít, a textúra a feldolgozás során kerül rá a modellre. Szkennelés közben a szkennert össze kell kötnünk egy lappal vagy számítógéppel, így a monitoron láthatjuk a szkennelés közbeni állapotot, az egyes elkészült frame-eket (egy időpillanatban készült képek).

A szkenneren két kamera és összesen 12 db LED villanó található. Ezek a LED-ek vetítenek villódzó fényt a felméréndő objektumra (a Breuckmann szkennерhez hasonlóan). A szkennер kézben tartva nem nehéz, könnyedén lehet mozgatni, forgatni a térben, amit egy tárgy szkennelésé közben meg is kell tennünk, hogy ne legyenek a modellben hiányos részek.



3. ábra: Artec Eva szkennel [11]

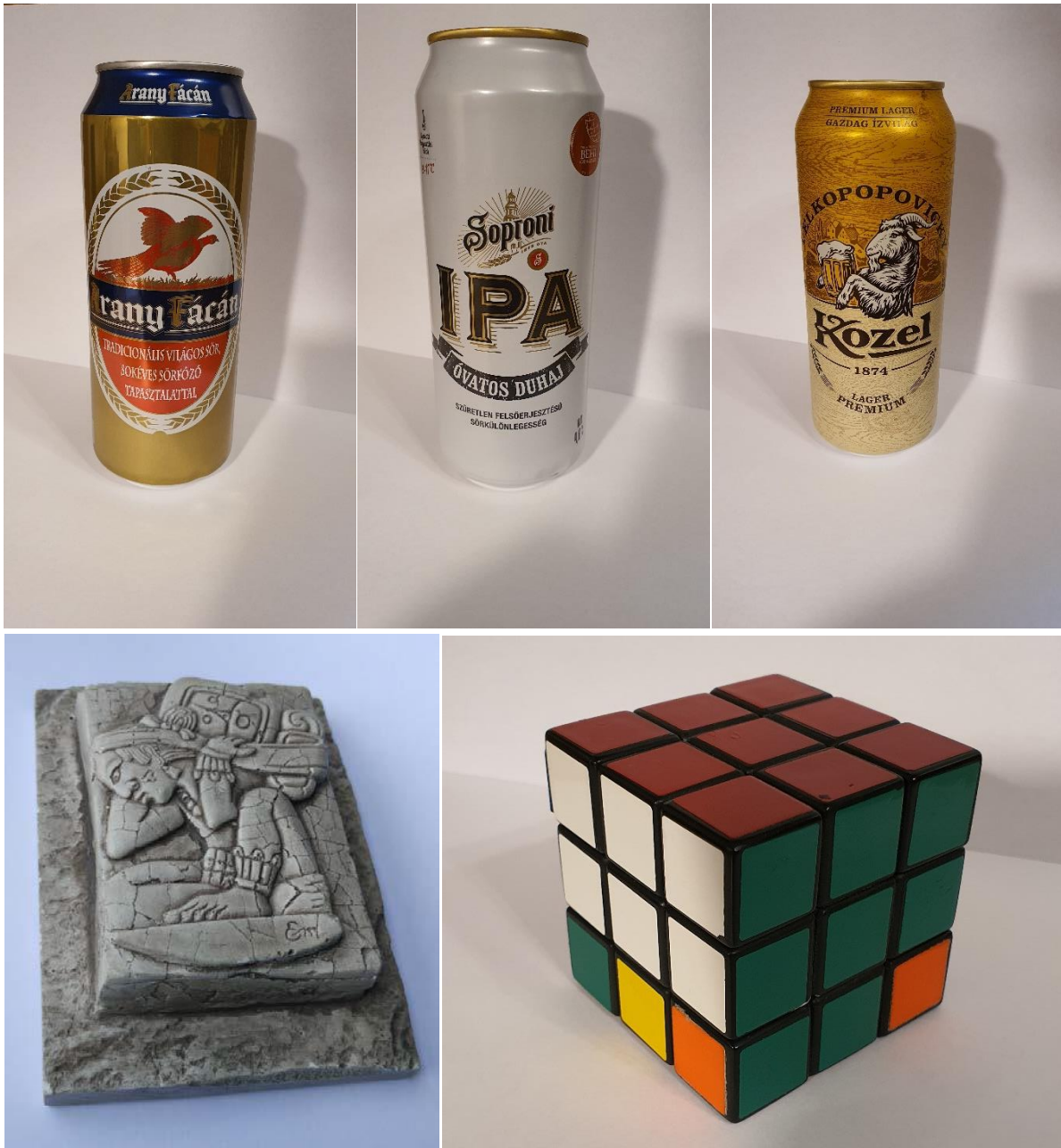
3. A modellek elkészítése és bemutatása

A vizsgálati modellek előállításához használt tárgyak kiválasztásakor az alábbi szempontokat kívántuk megvizsgálni:

- Szabályos geometriájú modellek → a telefon szkennelje mennyire pontosan tudja visszaadni a geometriát.
- Egyedi megmunkálású, részletességű felület → a telefon szkennelje mennyire pontosan képes visszaadni az apró és egyedi részleteket.
- Eltérő mintázatú és felületmegmunkáltságú tárgyak → a telefon szkennelje által készített modellt mennyire befolyásolják az eltérő fényvisszaverő képességű felületek.

A vizsgálatban résztvevő tárgyak (4. ábra) a fenti szempontok alapján a következők:

- Soproni IPA dobozos sör (0,5l)
- Kozel dobozos sör (0,5l)
- Arany Fácán dobozos sör (0,5l)
- Rubik Kocka
- Maja dombormű



4. ábra: Az összehasonlításban részt vevő tárgyak [6]

Mindhárom sörösdoboz azonos méretű és közel azonos alakú, így lehet rajtuk vizsgálni a szkennerek geometriai helyességét. A felső és alsó karimák között elhelyezkedő legvastagabb hengeres rész szabályos méretű henger, így könnyen vizsgálható objektum is egyben.

A felületi fényesség vizsgálatára is a sörösdobozokat alkalmaztam, mivel míg a Soproni IPA és a Kozel doboza matt, az Arany Fácán doboza fényes felületű. Egyes szkennerek nem, vagy csak részben használható modellt tudnak előállítani fényes felületű tárgyakról, így érdekes kérdés lehet, hogy egy telefonba épített amatőr szenzor hogyan birkózik meg ezzel a problémával.

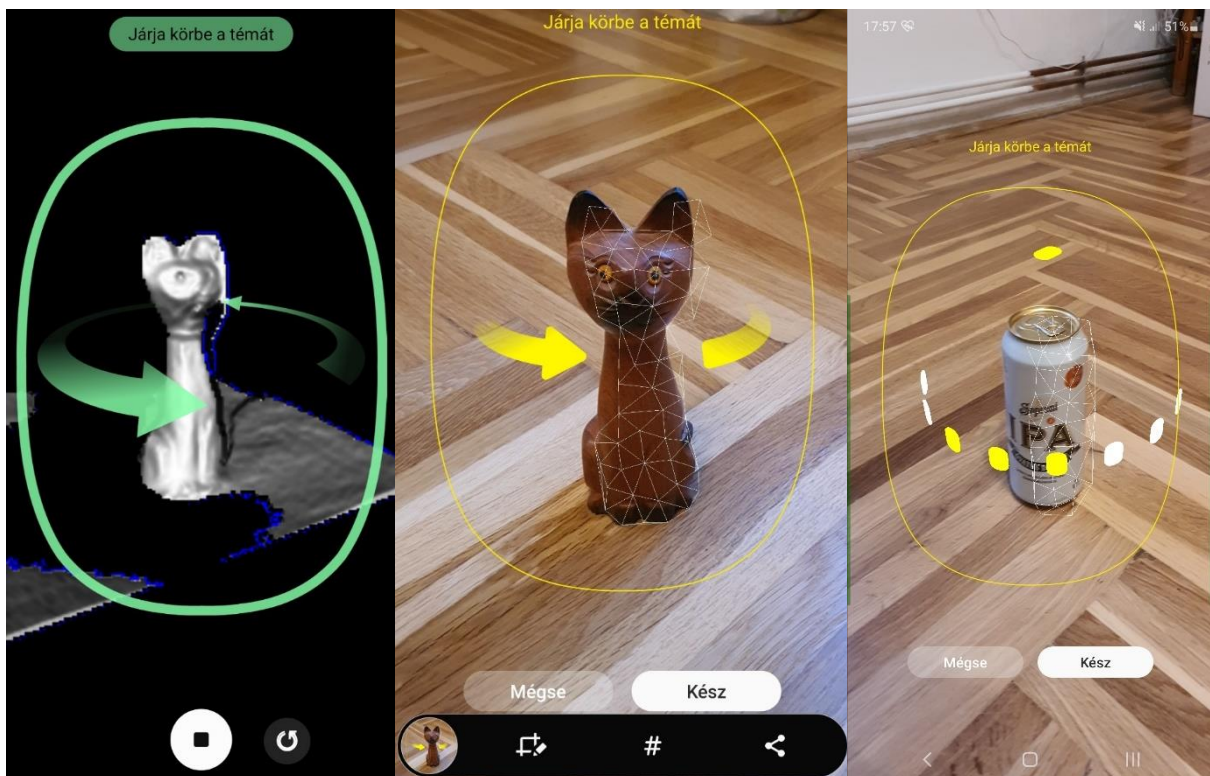
A maja dombormű egy egyedileg megmunkált felület sok kis bemélyedéssel, karcolattal, amelyek mélysége eltérő. A professzionális tárgyszkennek többsége jól vissza tudja adni ezeket az apró részleteket [6].

A modellalkotáshoz használt sörösdobozok minden modell létrehozásánál bontatlanok voltak, és minden modell létrehozásánál ugyanazokat a dobozokat használtam, így tudtam csökkenteni a szállítás közben az esetleges horpadások, karcok, deformációk keletkezésének esélyét.

3.1. Modellek létrehozása okostelefonnal

A telefonos szkennelés folyamata igen egyszerű és nem is túl időigényes, ha egy kevésbé részletgazdag tárgyat szeretnénk felmérni. Az alkalmazás könnyen érthető instrukciókkal segít minket a szkennelés során.

Mivel a 3D szkennert appot (5. ábra) [1] folyamatosan fejlesztik, így az egyes verziók között kisebb-nagyobb különbségek jelentkezhetnek, viszont a korábbi verzióhoz képest megjelent különbségeket is dokumentálják. A dolgozat leadásakor elérhető legfrissebb verzió az 1.0.47.5, viszont a vizsgálathoz használt modellek még az 1.0.46.6 számú verzióval kerültek szkennelésre.



5. ábra: A 3D szkennert működés közben – szkennelés előtt

A felméréndő tárgynak kb. 20-60 cm nagyságúnak kell lennie, ám a túrés igen nagy. Tapasztalataim szerint a tárgy nem lehet túl kicsi (pl. dobókocka), viszont túl nagy sem (pl. asztal, szekrény), hiszen a szenzor mérési tartománya korlátozott, de erre a gyártó nem ad meg pontos paramétereket; az alkalmazás használata közben jelzi, hogy alkalmas-e adott felvételi geometria a modellalkotáshoz. A mérési terület is limitált a kamerák felbontása és a távmérés mérési tartománya miatt, míg a felület megmunkáltságára nincs előírás.

A szkennelendő objektumnak bele kell férnie a sárga ovális tartományba (5. ábra), ekkor az fehérről sárga színre (korábbi verzióban zöldre) vált. Előtte az alkalmazás instrukciókkal segít

bennünket, pl. a tárgy nem fér bele a tartományba, menjen hátrébb, vagy menjen közelebb. Ha egy tárgy túl kicsi, vagy túl nagy, akkor az alkalmazás kiírja, hogy ezt a tárgyat nem lehet beszkennelni.

Nagyon fontos, hogy a szkennelés során a felméréndő objektumot sík felületen kell elhelyezni; ez lehet egy papírlap vagy mintázott felület is. A szkennelést a telefon végrehajtja nem sík felületen is, ilyenkor azonban a szkennerek a nem sík részeket is a felméréndő objektum részeként észleli, és az elkészült modellben is meg fogja jeleníteni, ahogy az a 6. ábrán látható.

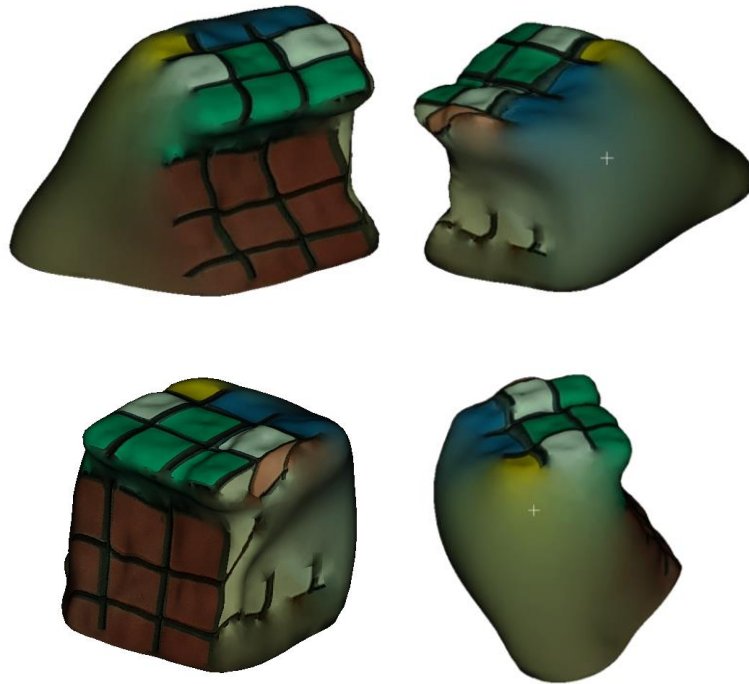


6. ábra: Modellalkotásba bevont háttér

Szkennelés közben körbe kell járnunk a tárgyunkat (a szkennerek app témának nevezi), az irányt a nyilak mutatják, azonban a másik irányba is mehetünk, az alkalmazás akkor is helyes modellt fog előállítani. Egyes szkennerek használatához esetleg forgóasztalt is kell használni, melynek használata során a tárgy a forgóasztal közepén helyezkedik el, a szkennerek pedig egy helyben áll és az asztalon lévő tárgyat méri bizonyos időközönként vagy elfordulásonként.

A szkennelés befejeztével a tárgy megjelenik a telefon képernyőjén, forgathatjuk és nagyíthatjuk is. A telefon a galériába egy gif fájlt ment a modelltől, ebben a modell csak forog, nem tudjuk mozgatni. A fájlkezelőben megjelenik egy dátummal ellátott zip fájl a modelltől, ezt kicsomagolva egy obj, egy mtl és egy texture kiterjesztésű fájlt kapunk. Az utóbbiak a textúráért felelősek, míg az első a geometriáért.

A szkennelés vizsgálata során kipróbáltam a forgóasztal használatát, ez a korábbi verzióknál nem volt sikeres, a szkennerek nem tudott helyes modellt előállítani. A szkennelés közben a szkennerek csak a kiinduló állapotot rögzítette, utána pedig egy elmosódott, homályos felülettel pótolta azt, amit a kiinduló állapotban nem látott (7. ábra). Az alkalmazás egyre újabb és újabb verzióinak megjelenésekor újra megpróbáltam a forgóasztalos modellek készítését, azonban egyik verzióknál sem lett jelentősen jobb a modell. A legújabb (1.0.47.5) verzió esetében az alkalmazás már nem mossa el azt a részt, amit először nem lát, viszont a modell körüljárása esetében pontosabb modellt alkot.



7. ábra: Forgóasztal használatakor a modell hátsó része elmosódik

Ezen tapasztalatok alapján a végső, összehasonlítás részét képező modelleket a körüljárásos módszerrel készítettem el, azonban minden modellt többször is elkészítettem annak érdekében, hogy az esetleges emberi hibákat minimalizálni tudjam. Ahogy a 3D szkennerek egyre újabb verziói jelentek meg, egyre jobb modelleket készítettem az egyes tárgyokról. Eleinte a sörösdobozok mind behorpadtnak, összegyűrtnek látszottak vagy egyes helyeken hiányoztak belőlük részek, máshol pedig kilógó nyúlványaik nőttek (8. ábra).



8. ábra: Első szkennelési modellek sörösdobozokról

Az egyre újabb verziókkal és a szkennerek megismerésével, szkennelési eljárás finomításával már a valósághoz nagyon közel álló modellek jöttek létre (9. ábra). Sajnos még a végső összehasonlításhoz használt modelleken is látható némi átlapolás a textúrában, és a geometria sem tökéletes, ami a nem textúrázott modelleken nagyon jól látszik. A deformáció mértéke az összehasonlításból derül ki.



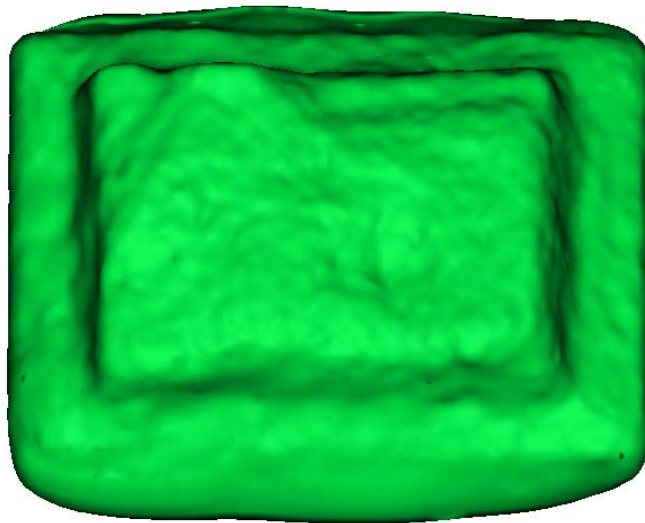
9. ábra: A Samsung szkenneléssel készített modellek, felső sor balról: Arany Fácán, IPA, Kozel, alsó sor balról: Maja, Rubik

Amint az a 9. ábrán látható, az Arany Fácán doboza kissé összegyűrtnek, horpadtnak látszik, ami valószínűleg a fényes felülete miatt van így. A másik két dobozról a modellek sokkal valóságosabbnak látszanak, az alakjuk jól közelíti a hengert, ennek ellenére az IPA dobozán vannak nagyobb mélyedések. Jól látszik mind a kettőn, hogy a felső, keskenyedő, csonka kúp alakú rész a Kozel modelljénél sokkal jobban lekerekített, mint az IPA esetében. Mind a három dobozról elmondható, hogy a felső karima és a dobozok teteje nem képződött le megfelelően; göröngyös, nem egyenletes, összegyűrt felületű lett a modell. Ez szintén a fényes felület miatt alakulhatott így, ugyanis a matt dobozok (IPA és Kozel) esetében is a felső, nyitófület tartalmazó rész fényes felületű és arany színű.

A Rubik-kocka modelljén minden lap göcsörtös, úgy néz ki, mintha a kocka éppen elolvadna. A szemközti falai nem párhuzamosak, az egymás melletti nem teljesen merőlegesek egymásra, trapéz alakúak, valamint az alsó oldala sokkal nagyobb, mint a teteje és a többi oldala. Az alsó oldalon a sarkok nem képződtek le élesen, kidomborodtak.

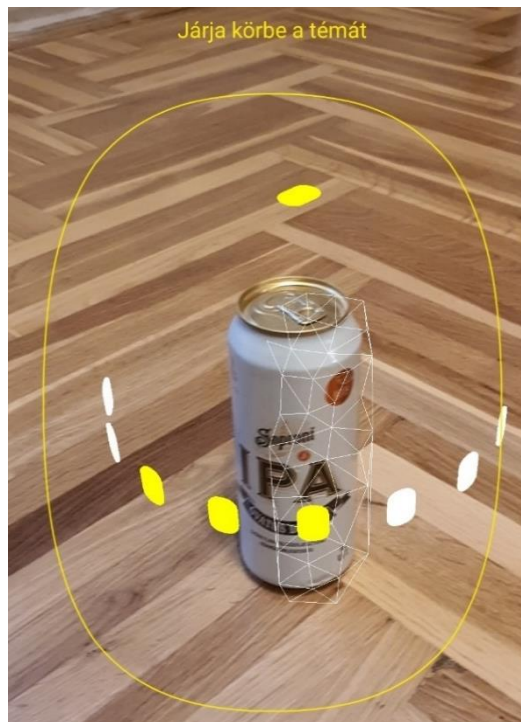
A maja domborműről készített modell felső része, ahol a faragvány látható, a modellen szépen látszik a textúra miatt, azonban a mélyedések, karcolatok a modellen elnagyoltak, simítottak.

Emellett az oldalsó, téglalap alakú részek kissé kidomborodtak. A textúra nélküli ábrán látható, hogy a rések, mélyedések nem képződtek le a modellen, így csak sejteni tudjuk a figura helyzetét. A 9. és 10. ábrákon a maja dombormű modellje ugyanúgy van tájolva.



10. ábra: A maja domborműről készült modell textúra nélkül

Annak ellenére, hogy a szoftver dolgozat leadásakor elérhető legújabb verziója az 1.0.47.5-ös verzió (11. ábra), az összehasonlításban részt vevő modellek nem ebben a verzióban készültek. Az 1.0.46.6-os verzióval készített modellek esetében a végeredmény egy obj, egy mtl és egy texture kiterjesztésű fájl volt, a legújabb verzió esetében egy bin, egy gltf és egy png kiterjesztésű fájl kaptam, továbbá a szkennelés közben a modell körüli AR tér is megváltozott. Ahogy az a 11. ábrán látható, a tárgy körül és felett megjelenik több lekerekített sarkú téglalap.



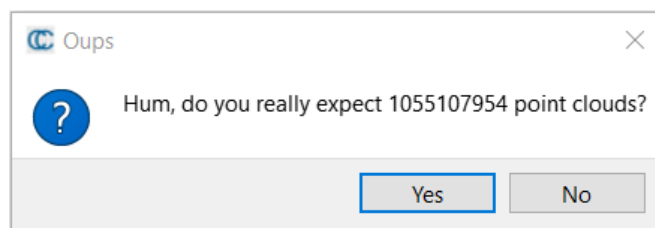
11. ábra: Modellezési interfész a 3D szkennер legújabb verziójában

A körbejárás során ezek a téglalapok fehérről sárga színűre váltanak, amint elmozgattuk az adott téglalap előtt a telefont. A szkennelés megkezdésénél a felső és az éppen velünk szemben elhelyezkedő téglalap már sárga színű. Ez a megjelenés azt mutatja, hogy feltehetőleg az adott téglalapok helyeinél készít a telefon 1-1 fényképet az objektumról; mérés közben jól követhető a modellalkotás által megkövetelt felvételi geometria. A tömörített fájlban helyet foglaló png fájlban ezek a képek szerepelnek, azonban ezek a nyers, textúrához használt képek (12. ábra).



12. ábra: A telefon által a szkennelés közben készített képek

A textúra fájl nem a szkennelés közben készített képeket tartalmazza, hanem a textúra alapját képező képeket. A nyers felületmodellt ezen képek segítségével fogja textúrázni. Ennek ellenére a végeredmény fájl (bin) a CloudCompare nem képes megnyitni, a következő hibaüzenetet írja ki:

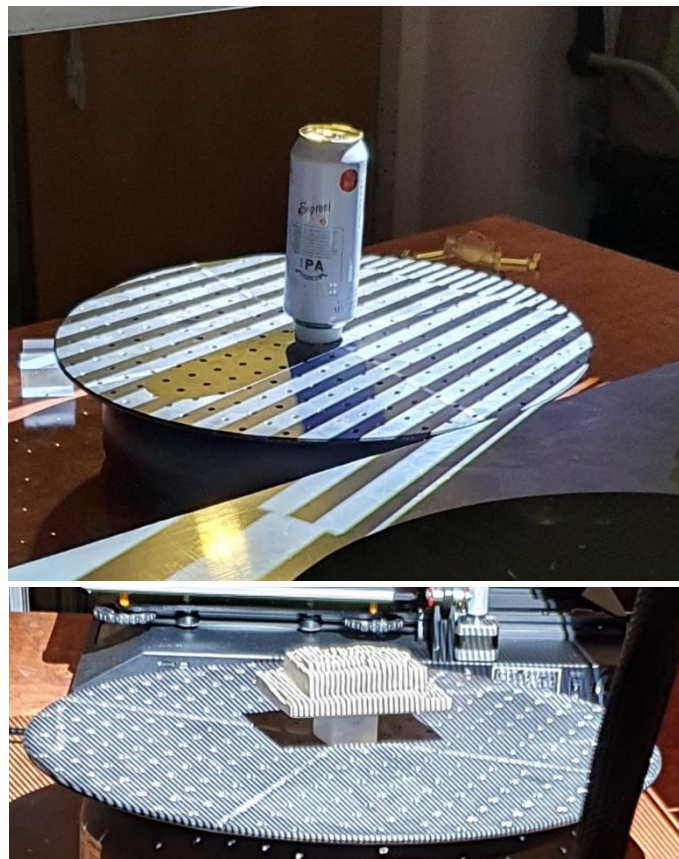


13. ábra: CloudCompare hibaiüzenet

Próbaként megpróbáltam betölteni a pontfelhőket, azonban ahogy az várható volt, a program az elsőnél lefagyott és bezáródott. Így, mivel a legújabb verzióval nem tudtam feldolgozható modelleket létrehozni, az előző verzióval előállított modelleket használtam az összehasonlítások során. Az előálló eset háttérben egy verzióhiba állhat.

3.2. Modellek létrehozása Breuckmann szkennerral

Szkennelés közben a Breuckmann szkennerek strukturált fényt (szabályos, változó mintákat) vetít az objektumra. A struktúra ennél a szkennernél igen egyszerű, az objektumon változó méretű fehér sávokat fogunk látni. A szkennerek először szélesebb, majd egyre keskenyebb sávokat vetít az objektumra, majd rögzíti azt. Ezután fordít egyet a forgóasztalon. A forgóasztalt a szkennelés előtt be lehet állítani, hogy a folyamat alatt mennyi állás legyen, azaz egy forgatásnál hány fokkal forduljon el. A tárgyaim szkennelésénél minden tárgynál 8 állás volt beállítva. Az egyes állások szkennelése 1-2 percet vesz igénybe, azonban 5 tárgynál 8 állással való szkennelés és előtte a tárgyakra a strukturált fény vetítése már jelentősen hosszabb folyamat. A forgóasztal egyes állásaiból az egy-egy modell előállítását, valamint az egyes modellek feldolgozása szintén időigényes, így az 5 végleges modell (méréssel és feldolgozással együtt) megközelítőleg 4 óra alatt készült el.



14. ábra: Strukturált fény vetítése

Annak érdekében, hogy az előállt 3D modelleket a későbbiekben könnyebben fel tudjam dolgozni (kevesebbet kelljen vágni), minden egyes tárgy szkennelése előtt a tárgy alá elhelyeztünk egy kis távtartó elemet. Emiatt az előállt 3D modell alsó síkje nem esik egybe a forgóasztal síkjával.

A forgóasztalon lyukak is találhatóak. Ez azt a célt szolgálja, hogy egyes tárgyakat hozzá lehessen csavarozni az asztalhoz, így pontosan be lehet állítani, hogy az asztal közepén helyezkedjenek el. A végleges modellek feldolgozás után a 15. ábrán láthatóak:



15. ábra: Breuckmann szkennerekkel készült modellek, felső sor balról: Arany Fácán, IPA, Kozel, alsó sor balról: Maja, Rubik.

A CloudCompare szoftverben feldolgozható modelleket bin kiterjesztésben kaptam meg. Ahogy a 15. ábrán látható, minden modell zöld színű, azaz a Breuckmann szkennerek csak geometriát rögzítettek, textúrát nem, és a geometriát sem sikerült a teljes felületeken rögzíteni. A bal felső, Arany Fácánról készült modell nagyon hiányos, csak a minta maradt meg, valamint a felirat és a doboz teteje. Ez a nagy hiányosság valószínűleg azért adódott így, mert az Arany Fácán doboza fényes sárga felületű. A nagy lyukak miatt ezt a modellt nem fogom összehasonlítani a telefonos modellel. A többi modellel is láthatók lyukak, viszont jelentősen kisebbek. Az IPA és a Kozel dobozán a termékek nevei lyukasak lettek, azonban így még el tudom végezni az összehasonlítást. A 15. ábrán a lyukas részeket keresztül láthatók az egyes modellek belső részei világosabb, fakó kékes színnel.

A maja dombormű esetében a felület majdnem teljesen folytonos, mindössze egy kis lyuk van rajta az alap oldalán, egy konkáv részen.

A Rubik-kocka modelljénél látszik, hogy az egyes kis kockák gond nélkül leképződtek, viszont köztük a hézagok lyukként jelentek meg. Ez azért történt így, mert a szkennelés közben egyik állásból sem lehetett a lyukak mélyére látni eléggé, hogy ott a felület modellje folytonos legyen.

3.3. Modellek létrehozása Artec Eva szkennelvel

Ahogy a 2.3 számú fejezetben említettem, az Artec Eva szkenneren 12 LED villanó található a kamera körül. A vetítés közben villódzásokat láthatunk. A szkennel olyan fényel dolgozik, amely a fény spektrumában a látható és nem látható tartomány határán van. A szkennel közben folyamatosan rögzíti az objektum geometriáját, és a folyamatot nyomon tudjuk követni egy a szkennelre csatlakoztatott kijelzőn (16. ábra).



16. ábra: Modell létrehozása Artec Eva szkennelvel

Az egyes tárgyak szkennelési ideje igen rövid, akár 30 másodperc alatt kész lehet egy modell, azonban az utómunka, a feldolgozás, a hibás frame-ek szűrése és a textúra hozzáadása a modellhez több időt vesznek igénybe. Az Artec Evával való szkennelésnél az 5 tárgyam szkennelési és feldolgozási ideje hozzávetőleg 2 órát vett igénybe.

Ha egy modell nem elég pontos, vagy hiányosan volt felmérve, akkor többször is beszkennehetjük, majd a több előállt modellt az Artec Studioban (Artec Eva saját feldolgozó szoftvere) ICP algoritmus segítségével az Alignment paranccsal egymáshoz igazíthatjuk és egyesíthetjük. Az én esetemben az Arany Fácán dobozán kellett alkalmazni az Alignment parancsot, mivel ez a doboz fényes felületű, így több hiányos állomány egyesítésével értem el a végleges, teljes modellt. Az elkészült, textúrázott modellek a 17. ábrán láthatók:



17. ábra: Artec Eva szkennelvel készült modellek, felső sor balról: Arany Fácán, IPA, Kozel, alsó sor balról: Maja, Rubik

A CloudCompare szoftverben történő feldolgozáshoz obj formátumban exportáltam a modelleket, valamint minden állományhoz egy mtl (material) fájl is tartozott, ami a textúrát tartalmazza. A material fájl segítségével láthatjuk a modelleket a valós színeikkel, melyeket az Artec Eva a mérés során rögzít. Rendelkezésre állt továbbá még egy ply fájlt, ami a textúra nélküli modellt tartalmazza, és két kép (jpg és png kiterjesztéssel) is. A sörösdobozok alján az alapként használt színes brosúra visszaverődései figyelhetők meg.

Az Artec Evával készült modelleken nincsenek lyukak, mint a Breuckmann szkennelvel készült modelleknél. Minden felület folytonos, mivel a szkennert többször körbe lehet mozgatni a tárgy körül aszerint, hogy a képernyőn helyesnek ítéljük-e meg a lefedettséget, így nem keletkeznek lyukas részek a konkáv felületeken sem. A tárgyakat itt nem egy forgóasztalra, hanem egy irodai asztalra tettük, a tárgyak alapjaként sík felületet használtunk, így annyi utómunkát igényelnek a modellek, hogy az alapot adó brosúra leképződését le kell vágni a modellről. Ezt a műveletet a CloudCompare szoftverben végeztem el.

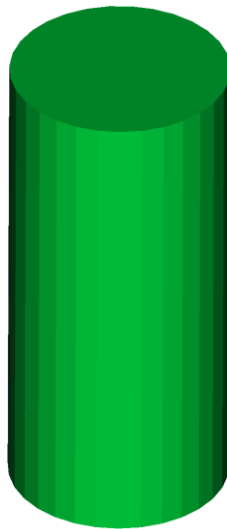
4. Telefon mélységkamerájával előállított modellek referenciákkal való összehasonlítása

A telefon alkotta térmodell minősége alapvetően a szenzortól, mérési geometriától (kamera elhelyezkedése az objektumhoz képest), mérési körülményektől (fényviszonyok) és a feldolgozó algoritmusoktól függ. A modell minőségét térbeli és síkbeli összehasonlító vizsgálatok segítségével végeztem. A síkbeli, metszetekben történt vizsgálatot az 5. fejezetben tárgyalom. A térmodellek összehasonlítására két utat választottam: 1) idealizált térmodellekkel és 2) referenciaként használható valós térmodellekkel való összevetés.

4.1. AutoCAD szoftverben készített modellek használata referenciaként

A telefontal készített modelleket AutoCAD Civil 3D szoftverben készített referenciaként használt modellekkel is összehasonlítottam. A referenciamodellek készítéséhez először megmértem a tárgyak jellemző méreteit tolmérővel többször is, majd a kiközpelt értékek alapján AutoCAD-ben elkészítettem az egyes modelleket. A szabálytalan geometriájú maja domborműről nem készítettem modellt.

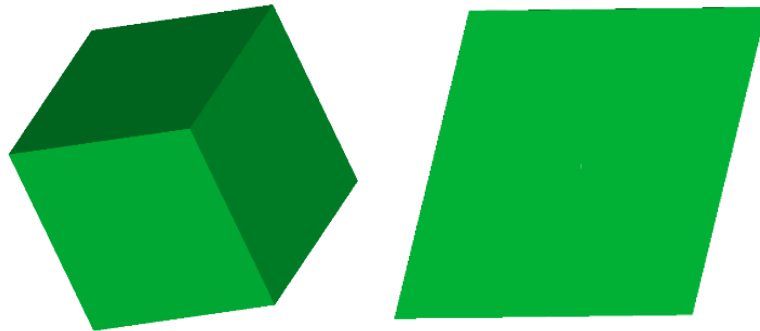
A sörösdobozokhoz használt referenciahenger olyan vastagságú lett, mint a sörösdobozok, a magassága pedig megegyezik a dobozok legvastagabb részének magasságával (144 mm). Ez a modell látható a 18. ábrán.



18. ábra: Henger alakú referenciamodell

A henger modell átmérője 65,7 mm (internetes forrásokban 66,2 mm található, viszont az ellenőrzésnél mind a három doboz esetében a kisebb értéket kaptam), magassága 144 mm, míg egy 0,5 literes sörösdoboz teljes magassága 168 mm. Azért nem készítettem egy teljes sörösdobozmodellt, mert mindhárom dobozomnál eltérő méretű volt a dobozok tetején és alján lévő csonka kúp alakú rész, valamint az átmenetek lekerekítése is, továbbá az alkalmazott technikák egyike sem tudta leképezni az alsó karimát, mivel ez a rész kitakarásban volt a szkennelés során. A dobozok modelljeiről levágtam ezeket a részeket, mivel a henger referenciamodell sem tartalmazta őket.

A Rubik-kocka egy teljes élének hossza 57 mm, így referenciának egy megegyező élhosszú kockát készítettem, valamint az egyes lapok ellenőrzésére egy ugyancsak 57 mm élhosszú négyzethasábot 0,1 mm-es magassággal (19. ábra).



19. ábra: Kocka és lap referenciamodellek

Az egyes telefonos modellek összehasonlítása a referenciamodellekkel CloudCompare szoftverben történt. A két modell egyidejű betöltésénél a modellek nem estek egybe, így a szoftveren belül kézzel (*Alignment* paranccsal) és az ICP algoritmus segítségével igazítottam egymáshoz őket (20. ábra).



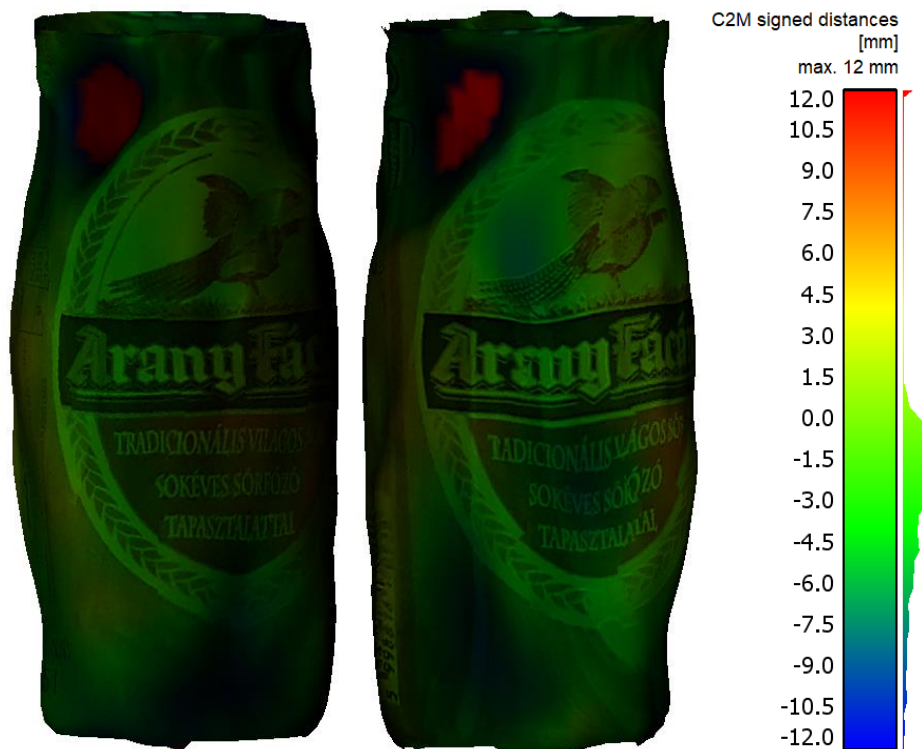
20. ábra: Az egymáshoz igazított modellek

A 20. ábrán a henger zöld modelljét áttetszővé tettem, hogy láthatóvá váljon a ráillesztett Arany Fácán modellje. Ahogy látható az ábrán, a sörösdoboz meglehetősen amorf, nem teljesen henger, így nagy eltérésekre számítottam ennél a modellnél. A többi sörösdobozon nem volt ekkora látványos eltérés, ahogy az a 21. ábrán látható.



21. ábra: IPA (bal) és Kozel (jobb) modellek illesztése a referencia hengerrel

Az illesztés után az egyes modelleket összehasonlítottam a CloudCompare beépített *Compute cloud/mesh distance* parancsával. A szoftver eredményként a normális irányban számított eltérésértékek hisztogramját adja, amit exportálni lehet csv formátumban, valamint képként is. A vizsgálat az eltéréseket alapesetben összesen 8 osztályba (hisztogram rekeszbe) sorolja. A vizsgálat elvégzése előtt be lehet állítani, hogy maximum mekkora eltéréseket vizsgáljon, azonban az ennél nagyobb eltéréseket (ha vannak) is ugyanebbe a kategóriába sorolja a vizsgálat közben (22. ábra). Az összehasonlítás után a hisztogram osztályainak száma változtatható, sokkal többet is képes mutatni. Az összehasonlítások vizuális eredményei a 22., 23., 24. és 25. ábrákon láthatók:



22. ábra: Arany Fácán összehasonlítása referenciamodellel (max. 12 mm-es eltérés)



23. ábra: IPA összehasonlítása referenciamodellel (max. 6,5 mm-es eltérés)



24. ábra: Kozel összehasonlítása referenciamodellel (max. 5 mm-es eltérés)

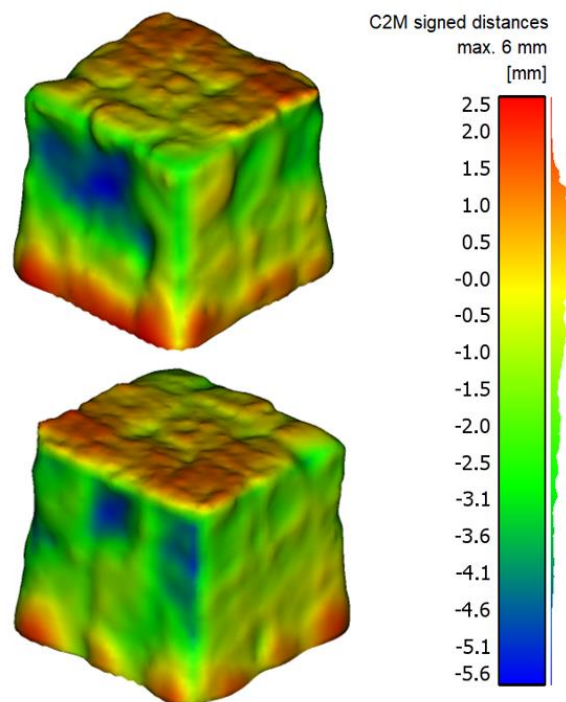
Az egyes összehasonlításoknál a maximális vizsgált eltérést kisebbre állítottam, mint amennyit a program alapesetben felajánlott, így tudtam elérni, hogy a színezett modellek ne legyenek egyszínűek és csak a legnagyobb (esetleg fals) eltérésnél vörösek vagy kékek.

A 22. ábrán az Arany Fácán modelljét figyelhetjük meg. Ahogy azt vártuk, a három modell közül itt tapasztaljuk a legnagyobb eltéréseket a fényes felület miatt. A doboz felső részén nagy mélyedések láthatók kékes és a legnagyobb eltérésnél vörös színnel, valamint a felső karima sem rajzolódik ki egyértelműen. A legnagyobb megengedett eltérést 12 mm-re állítottam, azonban felül, a karima alatt ennél nagyobb értékek is keletkeztek. Ennek ellenére a modell többi részén 3-4 mm nagyságrendű eltérések a jellemzők.

Az IPA és a Kozel telefonos modelljei már sokkal kevésbé térnek el a referenciától, nincs bennük durva deformáció. Két nagyobb és egy kisebb mélyedés az IPA dobozán felül mégis megjelenik, ez a 23. ábrán kék, beljebb pedig vörös színnel látszik. Ennél a két doboznál már kisebbre állítottam a legnagyobb megengedett eltéréseket, mivel a telefonos modellek sokkal jobban közelítették a henger alakját.

A legjobb eredményeket a Kozelről készült összehasonlítás adta, ezen a dobozon ugyanis nincsenek nagyobb, szemmel látható és könnyen elkülöníthető eltérések. Egy kék folt látható a 24. ábra alján a modellen; ez a tartomány az összes telefontal készített modell gyengéje.

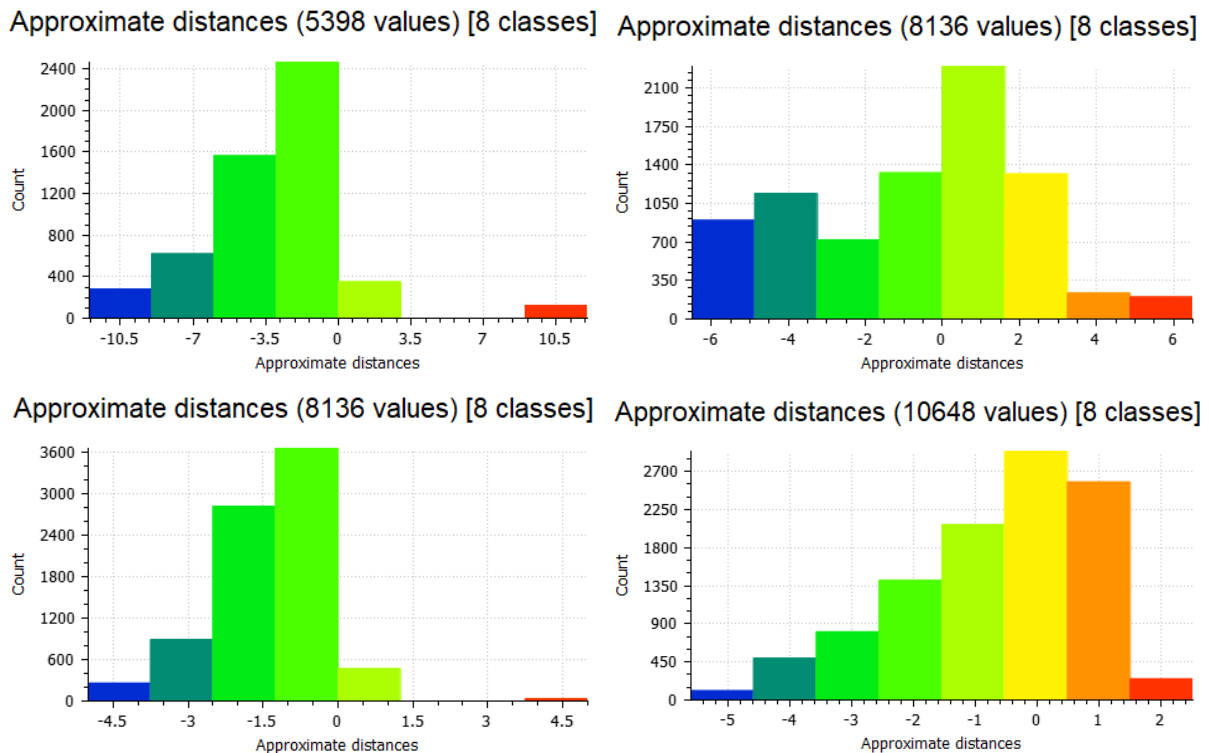
A Rubik-kocka esetében a textúra nélküli modellt használtam az összehasonlítás során, így a színes matricák nem befolyásolták a CloudCompare színes megjelenítését az összehasonlítás végén. Először a kocka alakú modellt hasonlítottam össze a Rubik-kockával, majd az egyes lapjait (kivéve az alsót) a lap modellel. Minden esetben elvégeztem az illesztést kézzel bejelölt pontok alapján (minimum 5 db), majd az ICP algoritmust használtam.



25. ábra: A Rubik-kocka összehasonlítása a referenciakockával (max. 6 mm-es eltérés)

A 25. ábrán megfigyelhető, hogy a kocka egyik lapján sokkal nagyobb a bemélyedés, mint a többi oldalon. Ez kékkel van jelölve és ezen a részen majdnem 6 mm az eltérés a referenciamodell és a telefonos modell közt. A szemközti oldalon is láthatók kékkel jelölt horpadások, azonban ezek 4-5 mm nagyságrendűek. A modellen az is látható, hogy a felső oldal kivételével az egy oldalon elhelyezkedő 9 db kisebb négyzet csak sejthető, nem tudjuk őket pontosan lehatárolni.

Az eltérés értékekről a CloudCompare-ből exportált hisztogramok a 26. ábrán láthatók:



26. ábra: CloudCompare-ben készített hisztogramok [mm], felső sor balról: Arany Fácán, IPA, alsó sor balról: Kozel, Rubik-kocka (egész modell)

A 26. ábrán látható hisztogramok közül az Arany Fácánhoz tartozón figyelhetők meg a legnagyobb minimum és maximum skálaértékek (-10,5 mm és +10,5 mm), a tartomány 21 mm. Itt egy kicsit eltért a skálázás a beállított legnagyobb 12 mm-es eltéréstől. A nagyobb beállított eltérést a fényes felület miatt egyenetlenebb modell indokolta. Egy adott irányú eltérésből találkozunk nagy értékkel más hisztogramon is (Rubik-kocka), viszont ekkora tartománnyal nem. Mindegyik hisztogramon látható, hogy a 0 mm körüli értékű eltérésekből van a legtöbb. A Rubik-kockához tartozó hisztogramon figyelhetjük meg a legkisebb értéktartományt, mivel a Rubik-kocka kisebb kiterjedésű a dobozoknál.

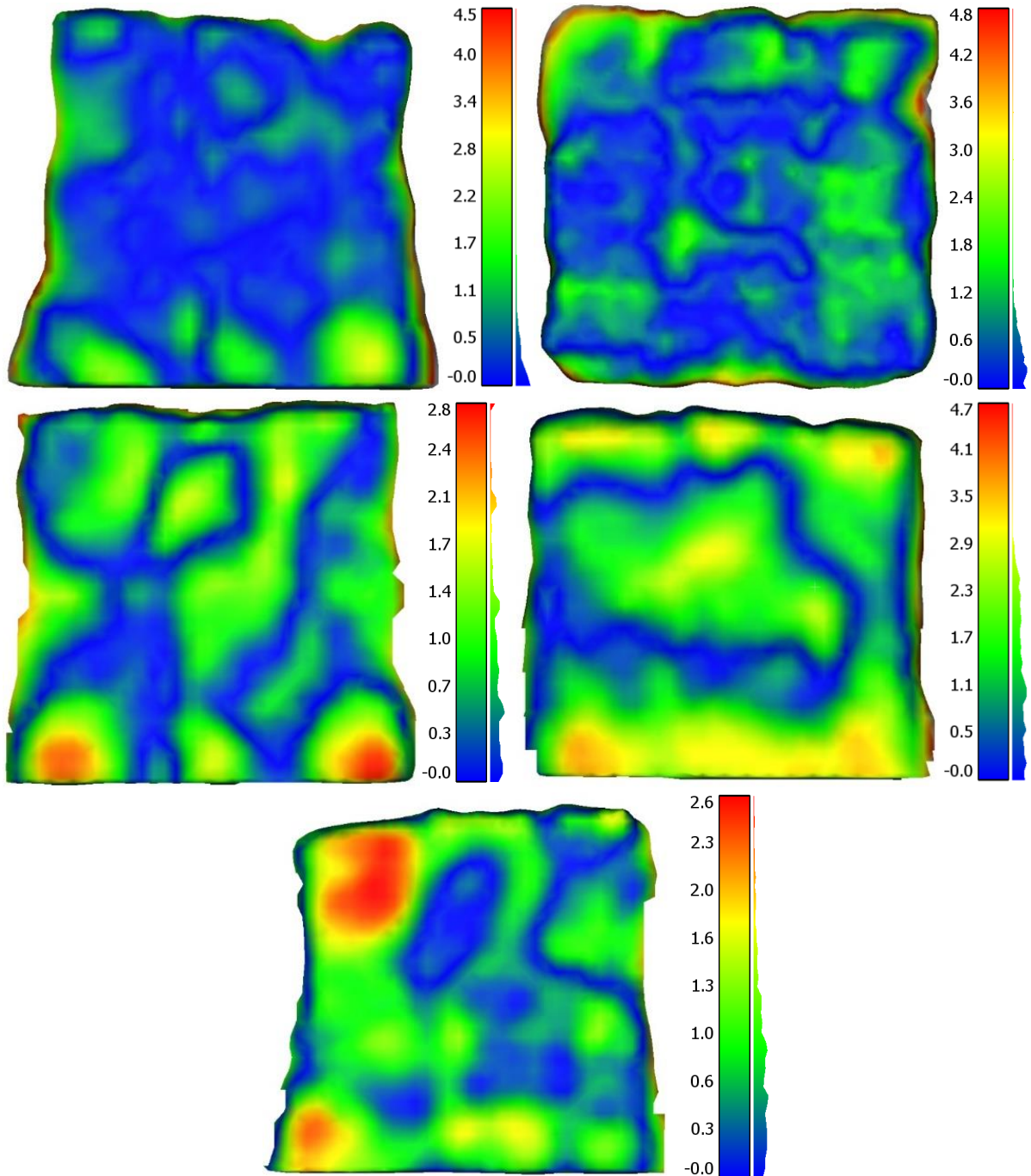
A hisztogramokat csv formátumban is exportáltam, majd egy összesítő táblázatot készítettem belőlük (3. táblázat).

Nagy Nándor Antal - Tárgyszkenelési technológiák összehasonlító elemzése											2020	
Referenciamodellek és telefontal készített modellek összehasonlítása CloudCompareben - egész modellek												
Osztály	Arany Fácán			IPA			Kozel			Rubik-kocka		
	Eltérés [db]	Min. [mm]	Max. [mm]	Eltérés [db]	Min. [mm]	Max. [mm]	Eltérés [db]	Min. [mm]	Max. [mm]	Eltérés [db]	Min. [mm]	Max. [mm]
1	280	-11.99	-8.99	897	-6.50	-4.87	258	-5.00	-3.75	108	-5.60	-4.58
2	619	-8.99	-5.99	1141	-4.87	-3.25	890	-3.75	-2.50	493	-4.58	-3.57
3	1563	-5.99	-2.99	720	-3.25	-1.62	2825	-2.50	-1.25	805	-3.57	-2.55
4	2463	-2.99	0.01	1329	-1.62	0.00	3663	-1.25	0.00	1412	-2.55	-1.53
5	350	0.01	3.00	2296	0.00	1.63	469	0.00	1.25	2070	-1.53	-0.52
6	0	3.00	6.00	1318	1.63	3.25	0	1.25	2.50	2936	-0.52	0.50
7	0	6.00	9.00	235	3.25	4.88	0	2.50	3.75	2574	0.50	1.51
8	123	9.00	12.00	200	4.88	6.50	31	3.75	5.00	250	1.51	2.53

3. táblázat: A referenciamodellek és a telefontal készült modellek eltérései a hisztogramok alapján

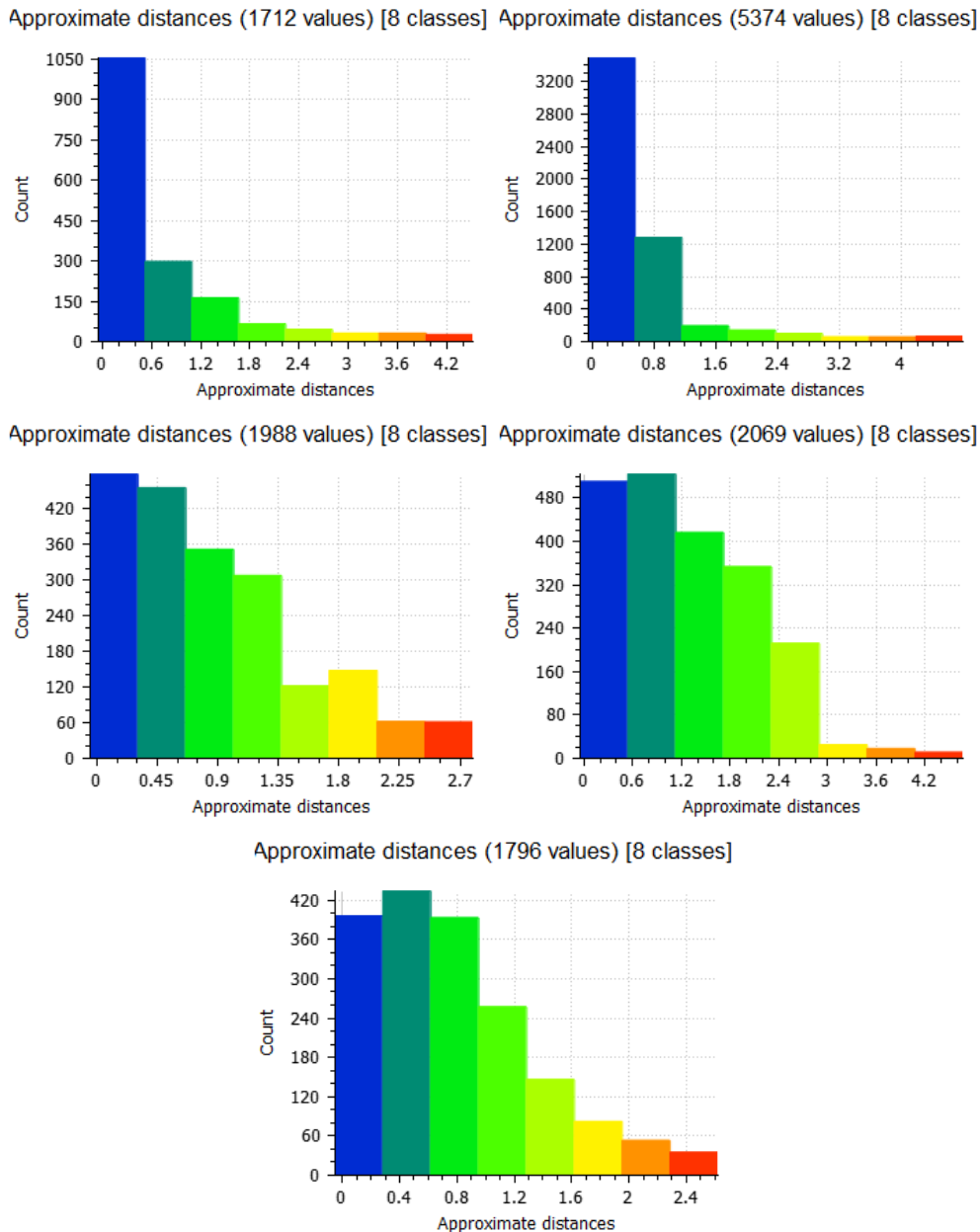
A 3. táblázat jól mutatja, hogy mindig abban a kategóriában van a legtöbb érték, amelyik a 0 mm-es eltérés (azaz jó illeszkedés) körül helyezkedik el. Ezeket a kategóriákat zöld színnel emeltem ki. A Kozel és a Rubik-kocka esetében a két legtöbb értéket tartalmazó osztály számossága csak kis mértékben tér el egymástól. Az Arany Fácán és az IPA modellek esetében az eltérés már sokkal nagyobb.

Külön megvizsgáltam a Rubik-kocka 5 db lapját (az alsó lapot kihagytam, mivel azt nem tudta modellezni egyik technika sem) a referencia modellekkel összehasonlítva (27. ábra). Az egyes oldalaknak az alapján a szín alapján adtam nevet, amiből a legtöbb volt rajtuk. Az illesztéseket kézzel végeztem el, próbáltam a legjobb illeszkedést elérni, azonban ez a modell szabálytalan mivoltából fakadóan igen nehéz volt. A modell vizsgált lapjait levágtam az elemzés elvégzéséhez. A vizsgálatot azért végeztem el, hogy megtudjam, hogy a lapok egyenként mennyire illeszkednek egy síkra.



27. ábra: A Rubik-kocka egyes lapjainak eltérése mm egységben a referencia laptól
 Felső sor balról: fehér, kék, középső sor: narancssárga, piros, alsó sor: sárga

A 27. ábrából kitűnik, hogy a kék oldal volt felül a szkennelés közben. Korábban már láttuk, hogy a modell úgy néz ki, mintha olvadna, így a többi oldalra jellemző, hogy inkább trapézra hasonlítanak, mint téglalapra. A 28. ábrán láthatók az egyes oldalak eltéréseiről készült hisztogramok.



28. ábra: A Rubik-kocka egyes lapjainak eltérése a referencia laptól hisztogramon [mm], felső sor balról: fehér, kék, középső sor balról: narancssárga, piros, alsó sor: sárga

A 28. ábrán látható, hogy a kék oldalon valóban a 0 mm-hez közeli értékek szerepelnek többségben. Ez várható volt abból kifolyólag, hogy a modell kék oldala közelíti legjobban a síkot. Azonban azt is megfigyelhetjük, hogy az egyik függőleges lap (fehér) hisztogramja meglehetősen hasonlít a kék hisztogramjára. A többi oldal, melyek a fehérhez hasonlóan trapéz alakúak a modellen, már több nagyobb eltérést is tartalmaz, a 0 mm körüli értékek nincsenek nagy többségben. A hisztogramok értékeit összesíti a 4. táblázat.

Nagy Nándor Antal - Tárgyszkenelési technológiák összehasonlító elemzése															2020
Referenciamodellek és telefonnal készített modellek összehasonlítása CloudCompareben - rubik-kocka oldalai															
Osztály	Fehér			Kék			Narancssárga			Piros			Sárga		
	Eltérés [db]	Min. [mm]	Max. [mm]	Eltérés [db]	Min. [mm]	Max. [mm]	Eltérés [db]	Min. [mm]	Max. [mm]	Eltérés [db]	Min. [mm]	Max. [mm]	Eltérés [db]	Min. [mm]	Max. [mm]
1	1054	-0.05	0.52	3490	-0.05	0.56	479	-0.05	0.31	510	-0.05	0.54	396	-0.05	0.28
2	297	0.52	1.09	1281	0.56	1.16	456	0.31	0.66	524	0.54	1.13	434	0.28	0.62
3	162	1.09	1.66	192	1.16	1.77	352	0.66	1.02	416	1.13	1.72	393	0.62	0.95
4	66	1.66	2.24	139	1.77	2.37	308	1.02	1.37	353	1.72	2.31	257	0.95	1.29
5	45	2.24	2.81	98	2.37	2.98	122	1.37	1.73	212	2.31	2.90	146	1.29	1.62
6	31	2.81	3.38	56	2.98	3.58	148	1.73	2.08	25	2.90	3.49	82	1.62	1.95
7	31	3.38	3.95	55	3.58	4.19	62	2.08	2.44	18	3.49	4.08	53	1.95	2.29
8	26	3.95	4.52	63	4.19	4.79	61	2.44	2.80	11	4.08	4.67	35	2.29	2.62
Összesen	1712	db		5374	db		1988	db		2069	db		1796	db	

4. táblázat: A Rubik-kocka egyes oldalainak eltérései a hisztogramok alapján

A 4. táblázatban látható, hogy a felső (kék) oldalról sokkal több (5374 db) értéket kaptam, mint a többi oldalról. Ennek oka, hogy a modellek készítése közben a kocka teteje minden esetben látszott, így részletesebben képződött le. A többi oldal kevesebbszer látszott, ezért róluk kevesebb, hasonló mennyiségű értéket kaptunk. A felső lap helyzete miatt több érték hasonlítható össze, mint az oldalsó lapok esetében.

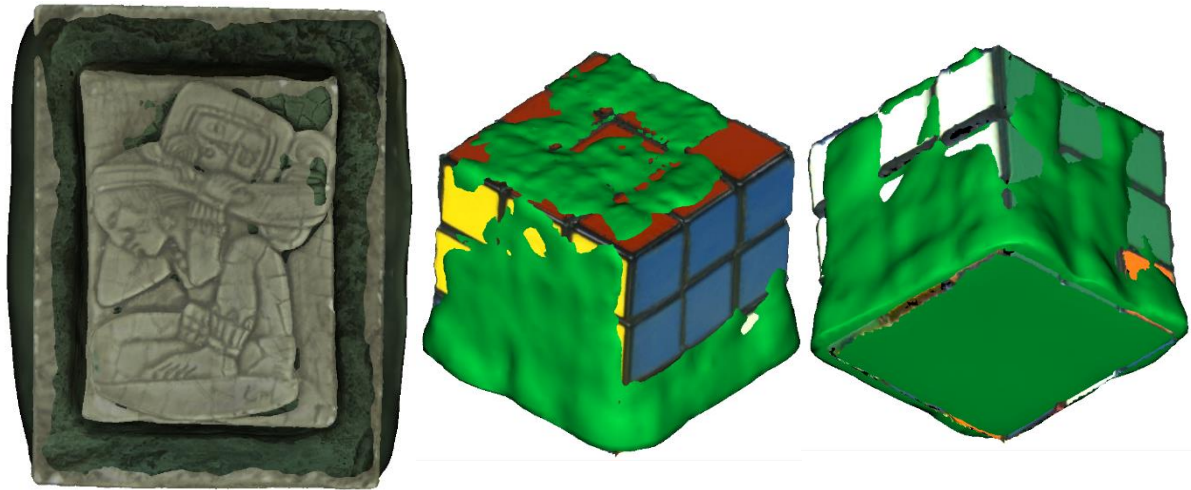
Ebben az összehasonlításban már nem érvényes általánosan, hogy az eltérések túlnyomó része a legkisebb, 0 mm körüli kategóriába esik, ez csak a fehér és a kék oldalak esetében van így. A piros és a sárga oldalak esetében a második kategóriában több érték van, mint az első, legkisebb eltérést mutató osztályban.

4.2. Artec Eva modellek használata referenciaként

A telefonnal előállított modelleket a referenciaként használt Artec Evával készített modellekkel is összehasonlítottam. Ez a számítás is a CloudCompare szoftverben történt. A modellek egymáshoz illesztése ebben az esetben is kézi illesztéssel (*Alignment* paranccsal) és ICP algoritmussal történt (29. és 30. ábra). Ebben az összehasonlításban minden modell részt vett.

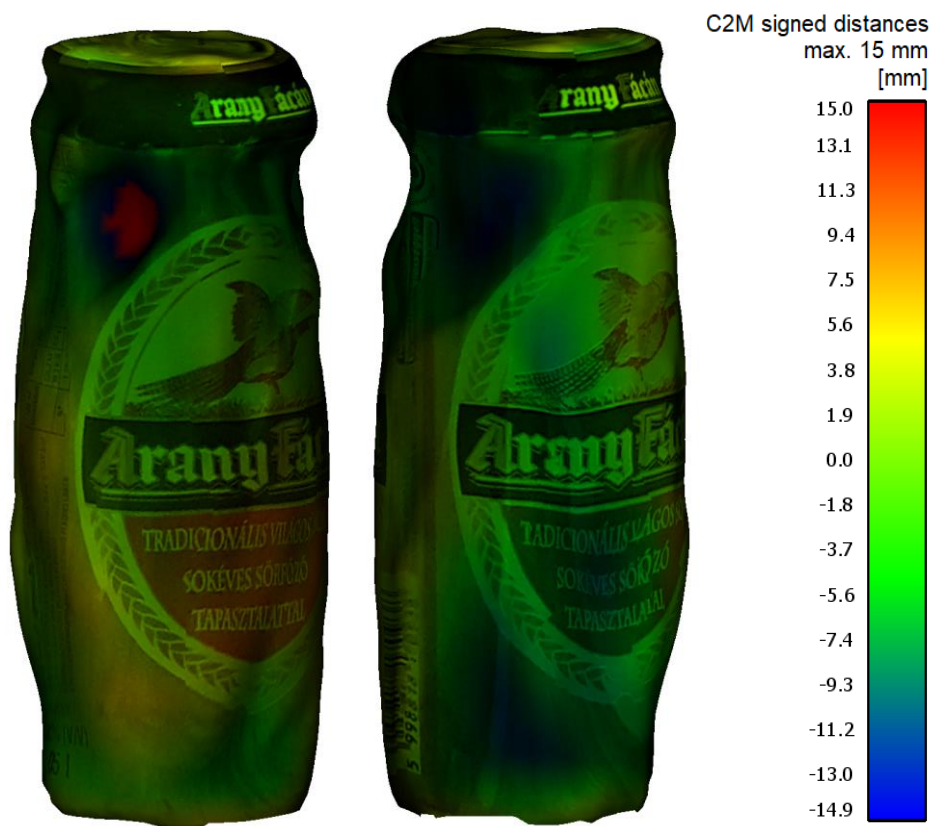


29. ábra: A sörösdobozok modelljei illesztés után, balról: Arany Fácán, IPA, Kozel

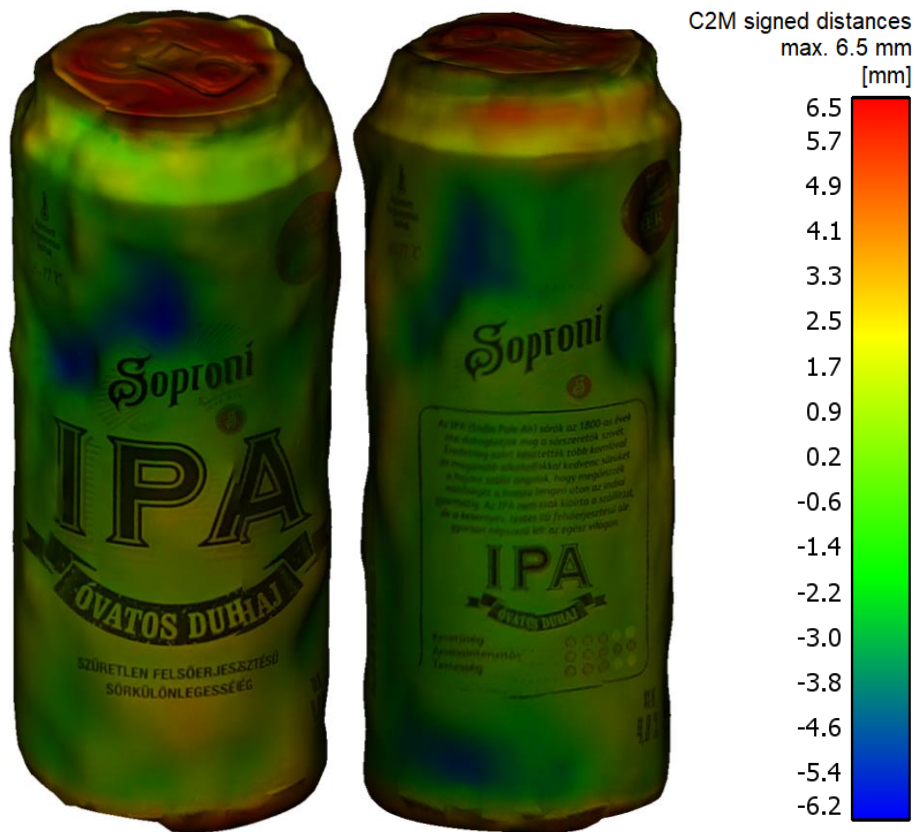


30. ábra: A maja dombormű (bal) és a Rubik-kocka (középső és jobb) modelljei illesztés után

A 29. és 30. ábrákon azt láthatjuk, hogy a modellek igen jól illeszkednek a Rubik-kockát kivéve minden esetben. A Rubik-kockánál ebben az esetben is a textúra nélküli modellt használtam, hogy az összehasonlítást ne zavarják meg a színes matricák. Az eltéréseket a *Compute cloud/mesh distance* paranccsal számítottam, majd exportáltam az eredményül kapott hisztogramokat táblázatos és képi formában is. Az összehasonlításokról készült képek a 31. – 35. ábrákon láthatók. Az Arany Fácán modelljére vonatkozó összehasonlítást kétszer is elvégeztem eltérő megengedett legnagyobb eltérésekkel.



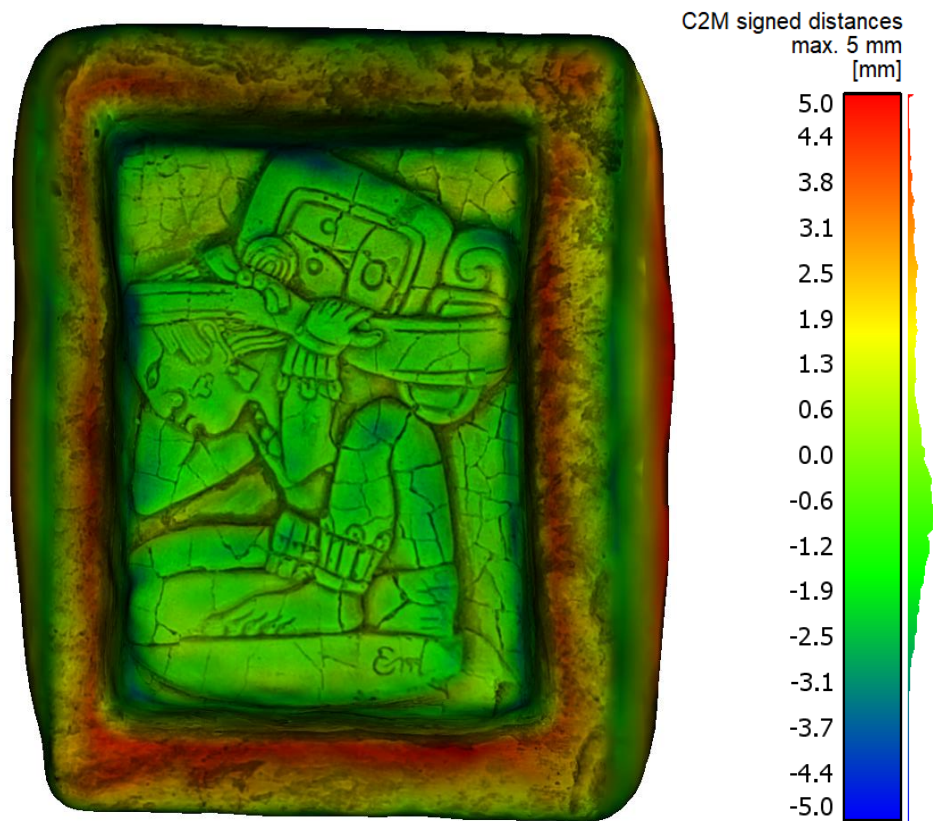
31. ábra: Az Arany Fácán modelljeinek összehasonlító elemzése (max. 15 mm-es eltérés)



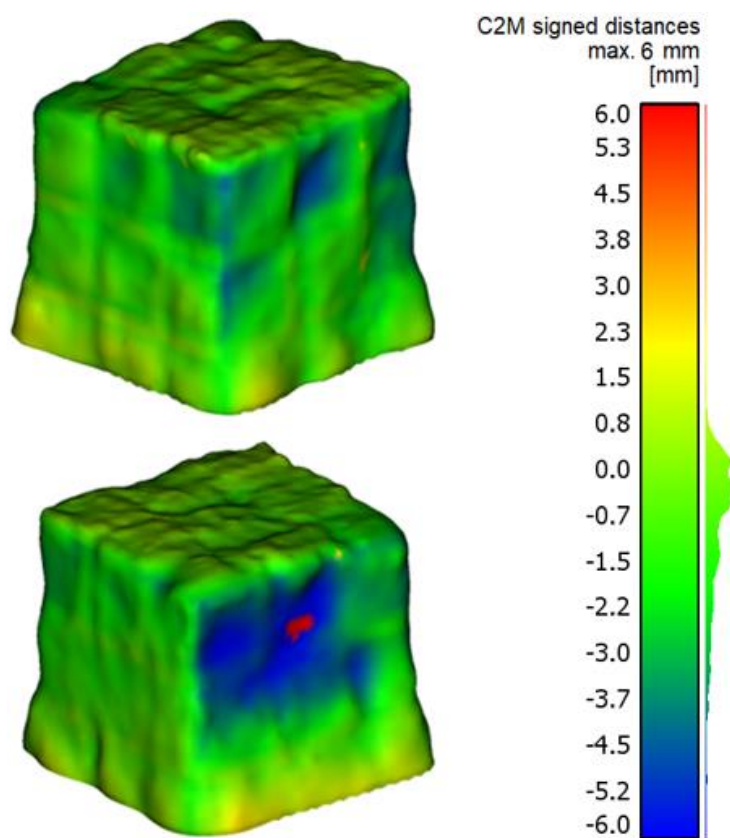
32. ábra: IPA modelljeinek összehasonlító elemzése (max. 6,5 mm-es eltérés)



33. ábra: Kozel modelljeinek összehasonlító elemzése (max. 5 mm-es eltérés)



34. ábra: Maja dombormű modelljeinek összehasonlító elemzése (max. 5 mm-es eltérés)



35. ábra: Rubik-kocka modelljeinek összehasonlító elemzése (max. 6 mm-es eltérés)

A 31. ábrán az Arany Fácánról készült modell eltérései és az eltéréstartományai láthatók. A megengedett eltérés 15 mm volt. A felső karima alatt, ahol a fácán látható, nagyobb mélyedések figyelhetők meg, ezeken a helyeken sötétkék színű a modell a mélyedések belsejében pedig vörös, azaz itt található a legnagyobb eltérés. Az ábra többi részén majdnem mindenhol zöld a modell. Ez a megjelenítés jól mutatja, hogy a konkáv részeken a legnagyobbak az eltérések az egész modellen, a felső karima pedig az Artec Eva modelljén beljebb található megközelítőleg 4 mm-rel. Az alsó karima felett is láthatók mélyedések kék színnel, azonban ezek nem olyan mélyek, mint a felső karima alattiak.

Az IPA modelljén (32. ábra) a legnagyobb, 6,5 mm-es eltérések a felső részen, a nyitófül környezetében található, ezen a modellpáron is a telefonos modell kiemelkedik az Artec Eva modelljének síkjából. A második legnagyobb, 6-6,2 mm-es eltérések a mélyedésekben található a telefonos modellen, ezek kékre vannak színezve.

Szintén a felső karimán láthatók a legnagyobb pozitív irányú eltérések a Kozel modelljén is (33. ábra), azonban ezen a modellen nem tapasztalunk akkora mélyedéseket, mint az előző két modell esetében, csak alul van egy kisebb horpadás. A nagyobb eltérés mégis a felső részen, a nyitófülnél található (5 mm).

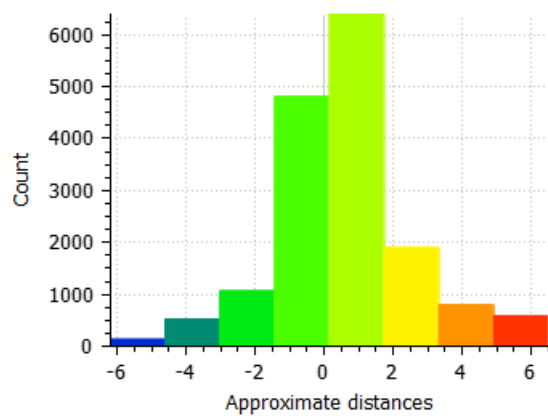
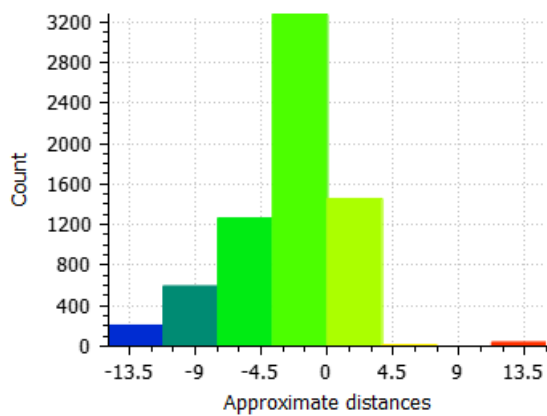
A Maja modellen (34. ábra) a tetején, a figuránál nem mutatkoznak 1-2 mm-nél nagyobb eltérések. Kicsit nagyobb eltérés az emberalak fejénél látható, a legnagyobb eltérések pedig a dombormű alsó peremén, amely a telefonos modellen nem sík, hanem íves, kidudorodó felület. A telefonos modell továbbá az alapot képző téglatest, és a felső, kisebb téglatest közt nem egy derékszöghöz közeli átmenetet állított elő, ahogy az a valóságban van, hanem egy átmenetes, lekerekített felületet. Ezen a helyen körben a modellen a beállított maximális 5 mm-t alulról közelítő értékeket láthatunk.

A Rubik-kockánál ugyanaz a helyzet, mint amit az AutoCAD-ben előállított modellekkel való összehasonlítás esetében; a legnagyobb eltérés (6 mm-nél is nagyobb) az egyik oldalsó lapon negatív irányban (befelé) keletkezett, itt látható a maximális, 6 mm-nél is nagyobb eltérést mutató kis rész vörös színnel. A kocka többi oldalán csak kisebb mélyedések voltak, egy a legnagyobb mélyedéssel szemközti oldalon, viszont a többi oldalon 2-3 mm-nél nagyobb eltéréseket nem láthatunk.

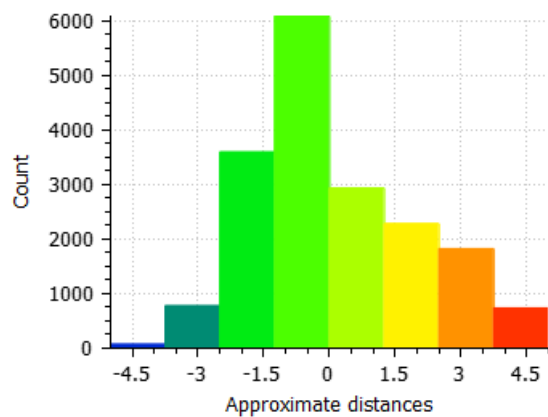
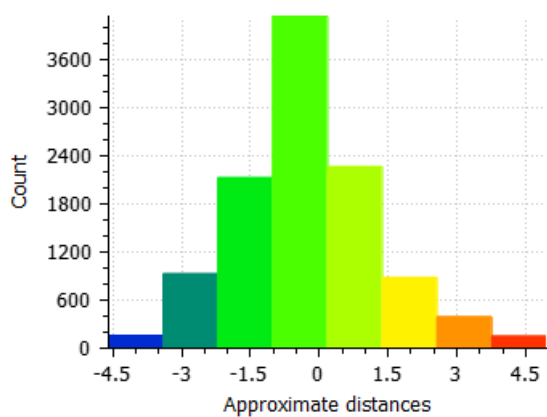
Összességében elmondható, hogy az összes modell közül az Arany Fácánon tapasztalhattuk a legnagyobb eltéréseket, a legkisebbeket pedig a Kozel dobozán. A telefon által készített modellek az éles részeket (a maja domborművön az élek, a Rubik-kocka élei, a sörösdobozok felső karimái) nem voltak képesek visszaadni a valóságnak megfelelően; a sarkok, élek lekerekített íves felületekké váltak. Azonban elmondható, hogy a telefonos modellek sehol nem tartalmaznak lyukakat, ami önmagában jó, mert mindenhol folytonos felületet kapunk, viszont a modellek alját is becsült, közelítő felülettel helyettesíti.

Az összehasonlítások eredményeiről készült hisztogramok a 36. ábrán láthatók.

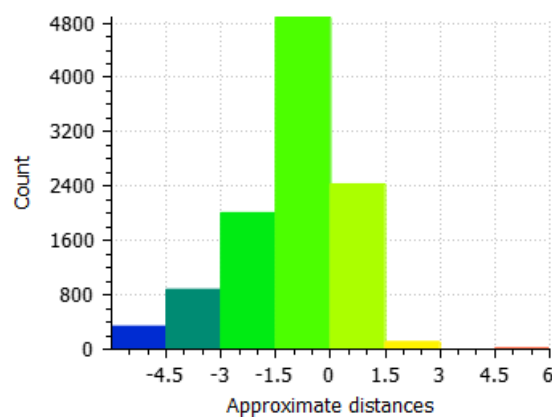
Approximate distances (6836 values) [8 classes] \ Approximate distances (16186 values) [8 classes]



\ Approximate distances (11053 values) [8 classes] \ Approximate distances (18283 values) [8 classes]



\ Approximate distances (10648 values) [8 classes]



36. ábra: CloudCompare-ben készített hisztogramok [mm], felső sor: Arany Fácán, IPA, középső sor: Kozel, Rubik-kocka, alsó sor: Maja dombormű

A 36. ábrán jól látszik, hogy a 0 mm nagyságrendű eltérések vannak többségben az összes esetben, az értékek az 5. táblázatból is jól kivehetők.

Nagy Nándor Antal - Tárgyszkennelési technológiák összehasonlító elemzése															2020
Artec Eva szkennelrel és telefonnal készített modellek összehasonlítása CloudCompareben															
Osztály	Arany Fácán			IPA			Kozel			Maja			Rubik-kocka		
	Eltérés [mm]	Min.	Max.	Eltérés [mm]	Min.	Max.	Eltérés [mm]	Min.	Max.	Eltérés [mm]	Min.	Max.	Eltérés [mm]	Min.	Max.
1	206	-14.9	-11.2	132	-6.2	-4.6	159	-4.6	-3.4	70	-5.0	-3.7	334	-6.0	-4.5
2	590	-11.2	-7.4	519	-4.6	-3.0	928	-3.4	-2.2	774	-3.7	-2.5	877	-4.5	-3.0
3	1262	-7.4	-3.7	1065	-3.0	-1.4	2129	-2.2	-1.0	3591	-2.5	-1.2	2007	-3.0	-1.5
4	3273	-3.7	0.0	4807	-1.4	0.2	4147	-1.0	0.2	6079	-1.2	0.0	4884	-1.5	0.0
5	1455	0.0	3.8	6393	0.2	1.7	2267	0.2	1.4	2932	0.0	1.3	2431	0.0	1.5
6	13	3.8	7.5	1897	1.7	3.3	883	1.4	2.6	2279	1.3	2.5	106	1.5	3.0
7	0	7.5	11.3	794	3.3	4.9	391	2.6	3.8	1822	2.5	3.8	0	3.0	4.5
8	37	11.3	15.0	579	4.9	6.5	149	3.8	5.0	736	3.8	5.0	9	4.5	6.0

5. táblázat: Az Artec Evával és a telefonnal készült modellek eltérései a hisztogramok alapján

Az Arany Fácán modellek esetében megfigyelhető, hogy a legnagyobb arányban a 0 mm-es eltérés közelében vannak értékeink, az ettől messzebb megjelenő értékek sokkal kevesebben vannak, csökkennek. A többi modellnél is a 0 mm körülotti eltérések vannak nagyobb többségben, és csak az IPA modelljének esetében közelíti meg az elsőt a második legnagyobb számosságú osztály.

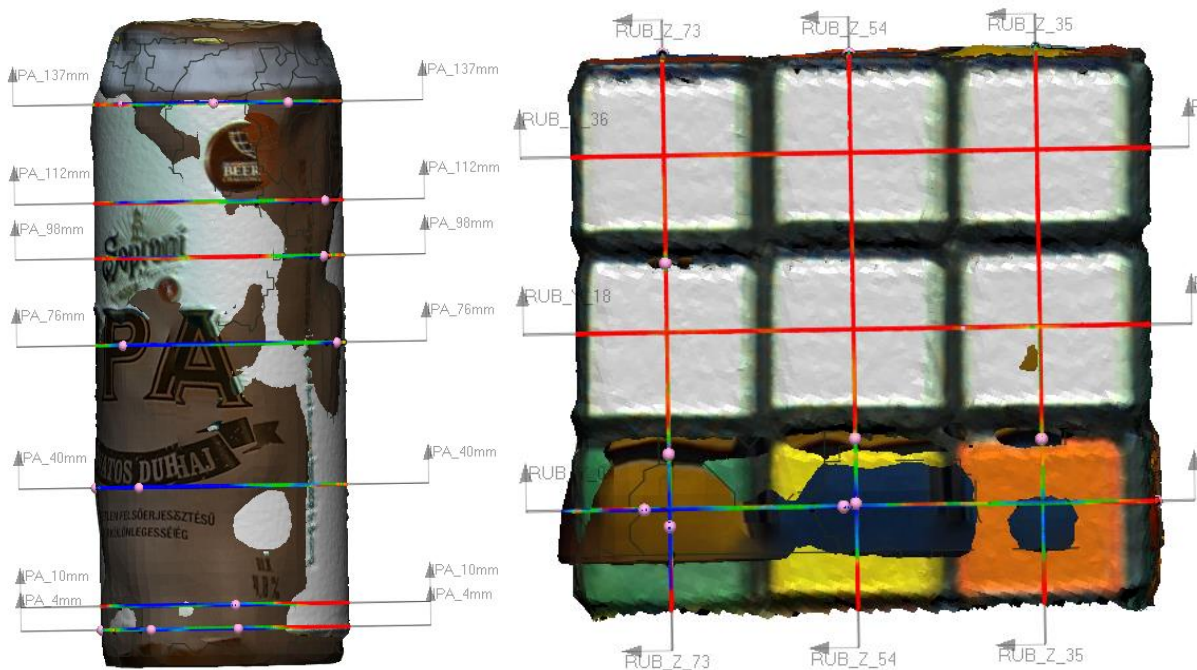
5. Különböző technikákkal előállított modellek összehasonlítása síkmetszetekben

A végleges összehasonlítást Geomagic Control X (a továbbiakban Control X) szoftverben végeztem el, amely segítségével mérnöki minősítő feladatokat lehet ellátni. A Control X segítségével számos különböző kiterjesztésű 3D modellt importálhatunk, majd ezeket össze tudjuk hasonlítani 3D-ben, valamint 2D-ben kijelölt szelvényenként is. Munkám során a telefonnal készült modelleket hasonlítottam össze az Artec Eva, majd pedig a Breuckmann smartSCAN által előállított modellekkal (minden esetben az alap a telefonnal készített modell). A modelleket a Control X szoftverbe való importálás után nem kellett egymáshoz illesztenem, ez CloudCompare szoftverben már megtörtént. A vizsgálatoknál 2 dimenziós technikát használtam, valamint minden modellen és mind a két esetben (Artec Eva és Breuckmann) a helyzettől függően ugyanott vettem fel a szelvényeket.

- A sörös dobozoknál a legvastagabb, 65,7 mm átmérőjű és 144 mm magasságú részek alján, tetején, illetve ezek között 3 szelvényt vettem fel (37. ábra). Az IPA esetében kettővel több szelvényt vettem fel (38. ábra bal oldala) a korábban ismertetett meghatározó mélyedések miatt.
- A Rubik-kocka esetében X, Y és Z tengelyen is 3-3 szelvényt vettem fel a kis kockák oldalfelezőiben (38. ábra jobb oldala).
- A maja dombormű esetében a minta részletessége miatt sokkal több szelvényt vettem fel, a függőleges (Y) tengely mentén 3 db-ot, a rövidebb oldalán (X) 11, a hosszabb oldalán (Z) pedig 13 db-ot (39., 40. és 41. ábra).



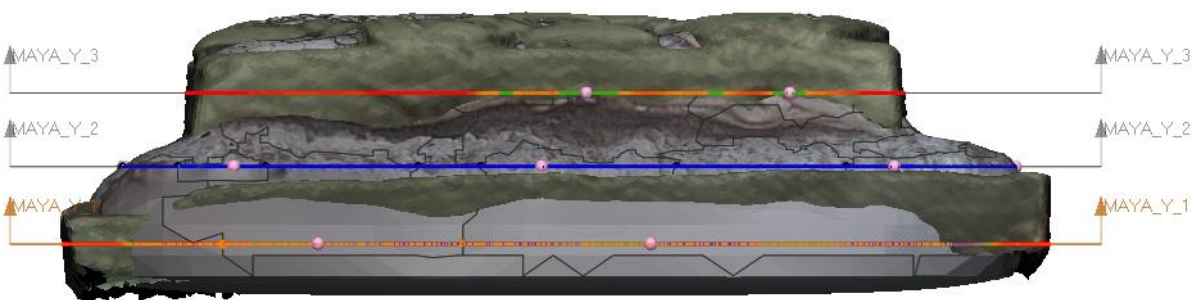
37. ábra: Metszetek az Arany Fácán és a Kozel dobozain



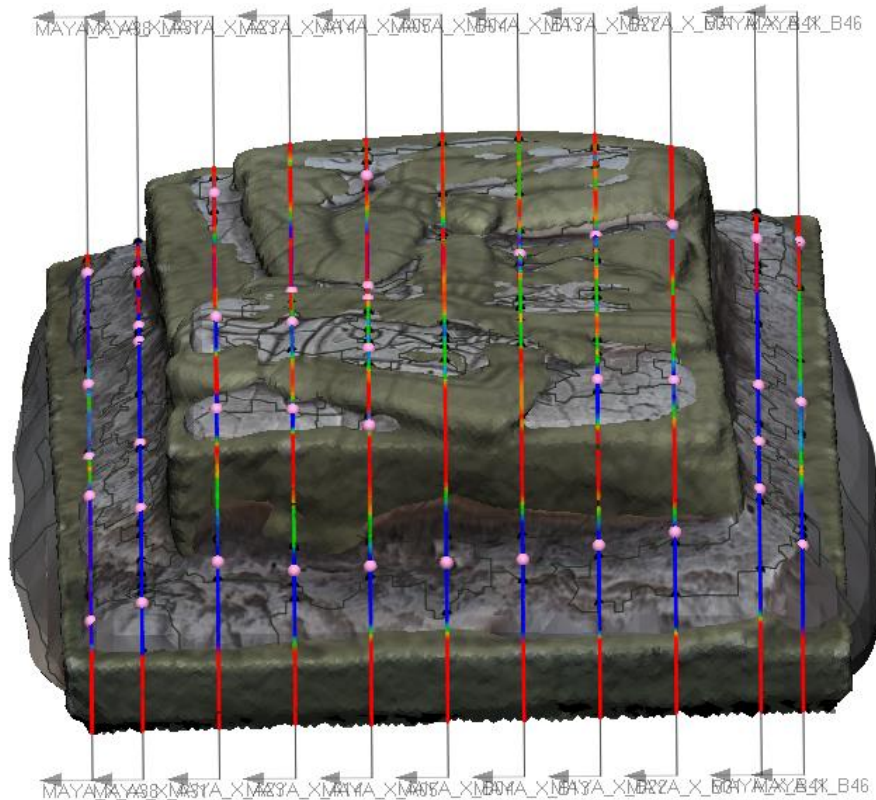
38. ábra: Metszetek az IPA dobozán és a Rubik-kockán

A sörösdobozok esetében a metszeteket egymástól hozzávetőlegesen egyforma távolságokra helyeztem el. A dobozok alsó karimája kb 4-5 mm-nél van, innen kezdtem felfelé felvenni a szelvényeket 36 mm-enként, kivéve az IPA esetében, ahol még két szelvényt vettem fel (10 és 98 mm-nél). A többi modell esetében is a milliméteres felosztást alkalmaztam, a maja dombormű esetén 9-10 mm-enként vettem fel a szelvényeket a részletes vizsgálat érdekében. A Rubik-kockánál, mivel a tárgy igen szabályos, minden oldalán összesen 3 db szelvényt vettem csak fel. Minden tárgynál a modellekhez igazodva vettem fel a szelvényeket, ezzel a vizsgálat részletességének és hatékonyságának növelése volt a célom.

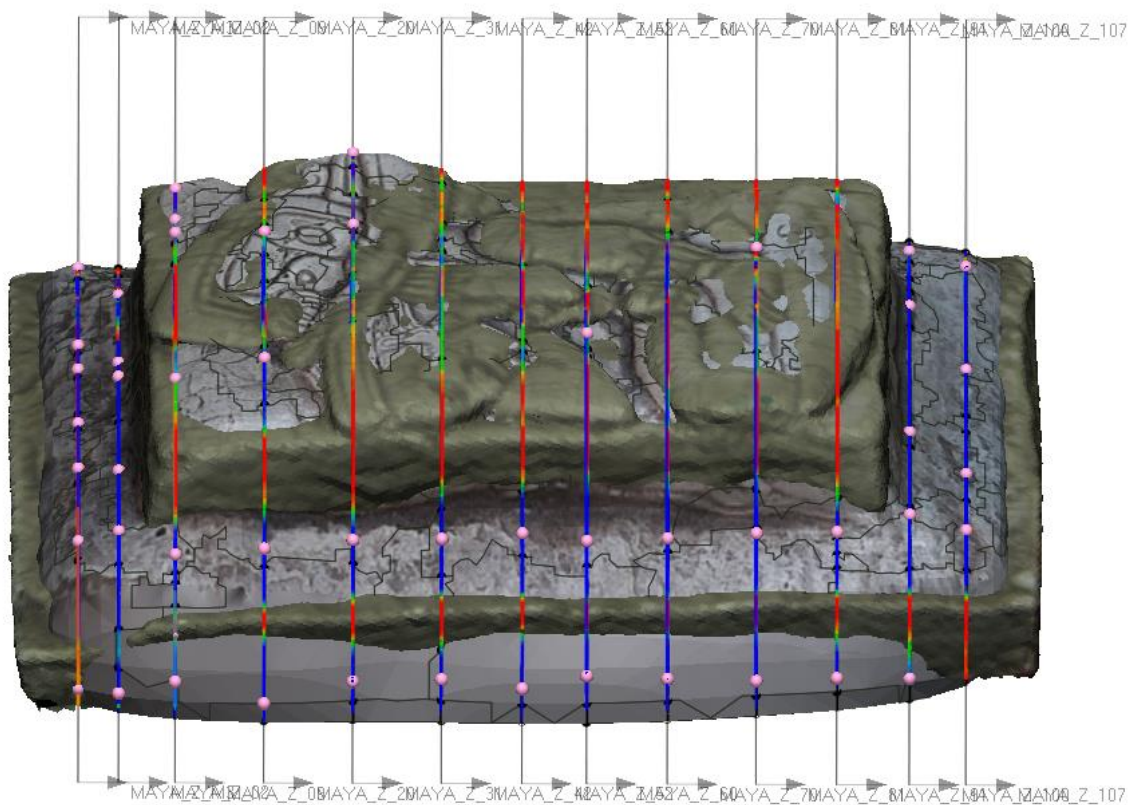
A szelvények elhelyezése előtt ki kell választanunk, hogy melyik tengelyen legyenek (pl. az Y tengelyen felvett metszet az X-Z síkban van), majd megadhatjuk tizedmilliméter élességgel, hogy a tengely kezdőpontjától (ezt a szoftver veszi fel a modellekben vagy a modellek közvetlen közelében) milyen messze legyen a szelvény. Később ezt kézzel átállíthatjuk. Megadhatjuk továbbá, hogy mekkora legyen a maximális eltérés, amit a szoftver vizsgálni fog. A CloudCompare-rel ellentétben a Control X a maximális eltérést meghaladó helyeken nem mutat értéket, „No Result” jelenik meg a címkézésben.



39. ábra: A maja domborművön felvett Y irányú metszetek (3 db metszet)



40. ábra: A maja domborművön felvett X irányú metszetek (rövidebb oldal, 11 db metszet)



41. ábra: A maja domborművön felvett Z irányú metszetek (hosszabb oldal, 13 db metszet)

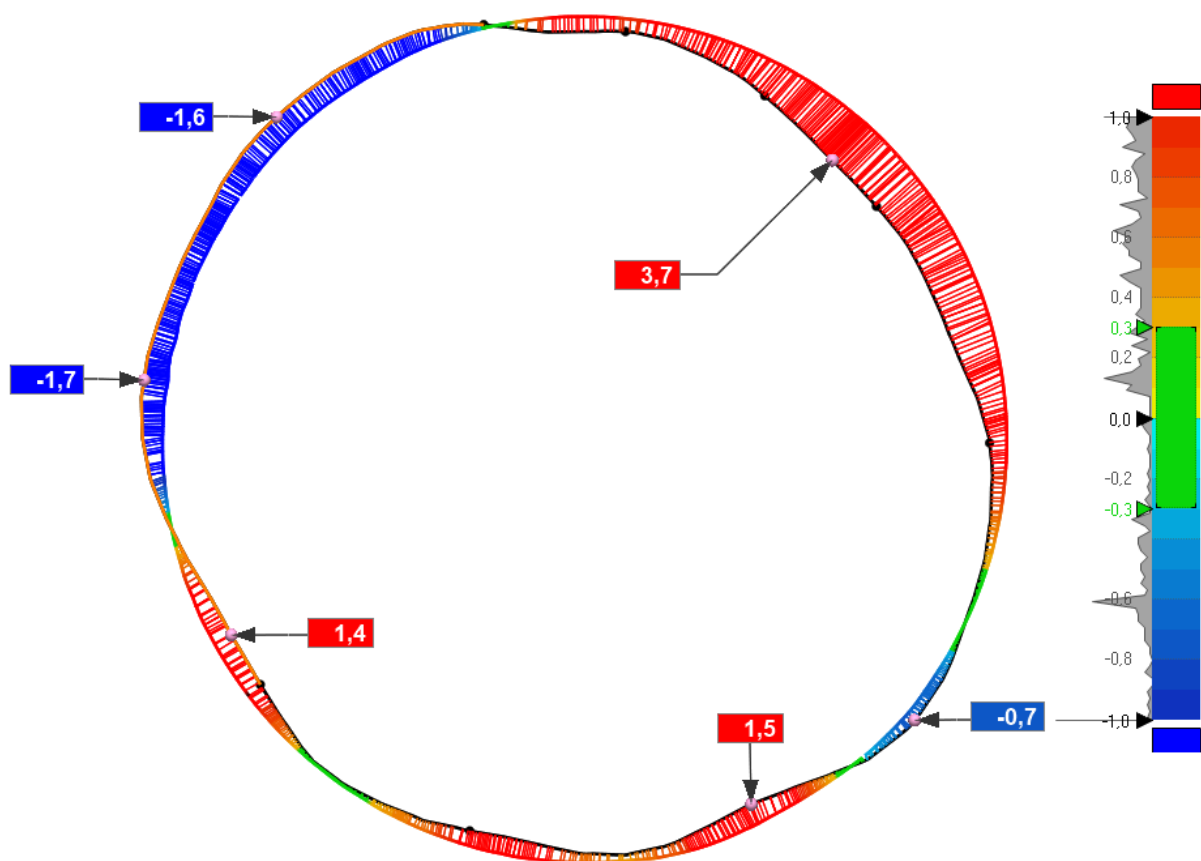
Az egyes metszetek elhelyezése után a program kiszámítja a különbségeket (normális irányban), és ha kézzel megváltoztatjuk a metszetek helyeit, akkor rögtön újra kiszámítja őket. Miután beállítottam a metszeteket a megfelelő helyekre, megkerestem rajtuk a vizsgálandó helyeket (sarkok, jellemző részek az egyes modelleken, kiugró értékeket mutató helyek), és olyan címkéket (labelket) helyeztem el rajtuk, amelyek tizedmilliméter élességgel, milliméter egységben mutatják az eltéréseket.

5.1. Breuckmann smartSCAN és a telefon modelljeinek összehasonlítása

A Breuckmann-Samsung összehasonlítás keretein belül készült összes metszet az *I. mellékletben* található.

A Breuckmann szkennelvel készített modell az Arany Fácánról ebből az összehasonlításból kimaradt, mert a fényes felület miatt egy nagyon hiányos modell állt csak elő.

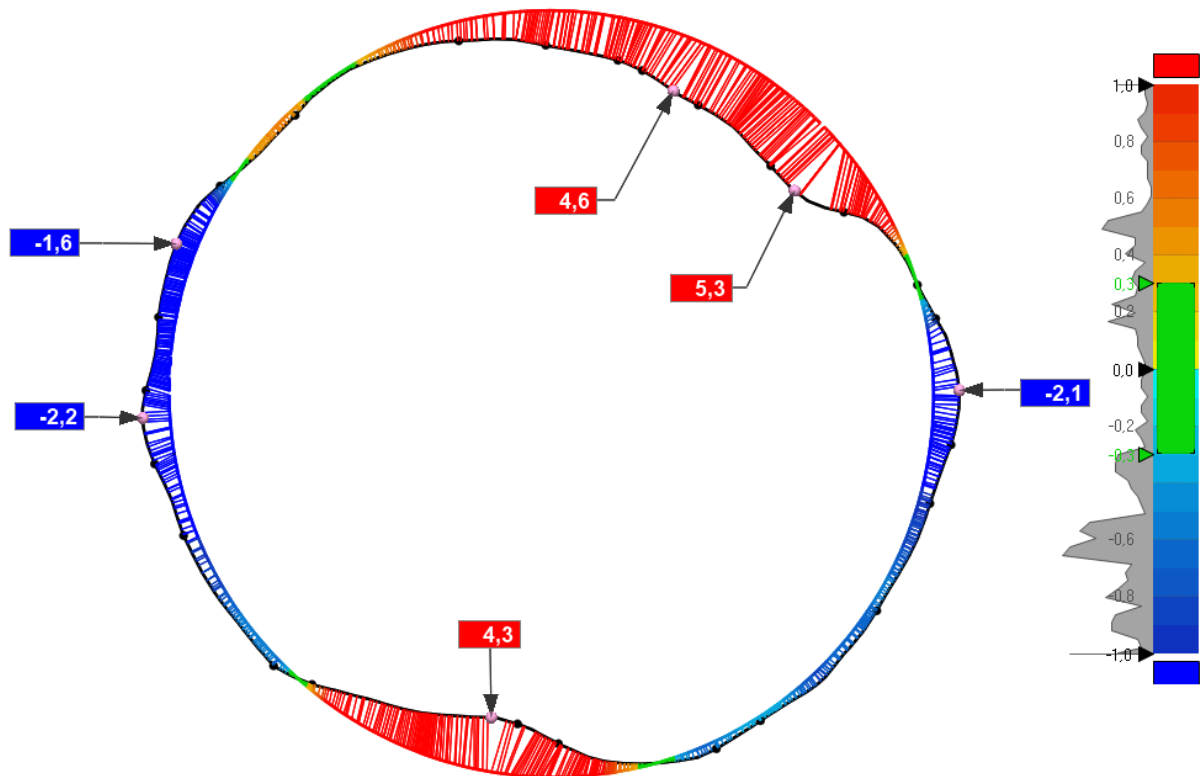
Az IPA dobozán az alsó részen 10 mm-nél vettem fel egy metszetet, hogy az ott található mélyedés mértékét meg tudjam határozni. Ez az a hely, ahol minden sörösdobozról a telefontal készült modell egy kis deformációt mutat.



42. ábra: IPA dobozán 10 mm magasan felvett metszet

Ahogy a 42. ábrán is látható, a horpadás 3,7 mm nagyságú. Ennél az értéknél egy laposodást is láthatunk a telefonos modellen (fekete körvonal), viszont a piros részek (a Breuckmann szkennelvel készített modellen) itt is körív alakúak. A doboz tetején, a felső karima alatt

azonban ennél is nagyobb eltérés mutatkozik (43. ábra). Ez az a hely, ahol a legnagyobb eltérés volt a CloudCompare-ben történő összehasonlítások szerint is.



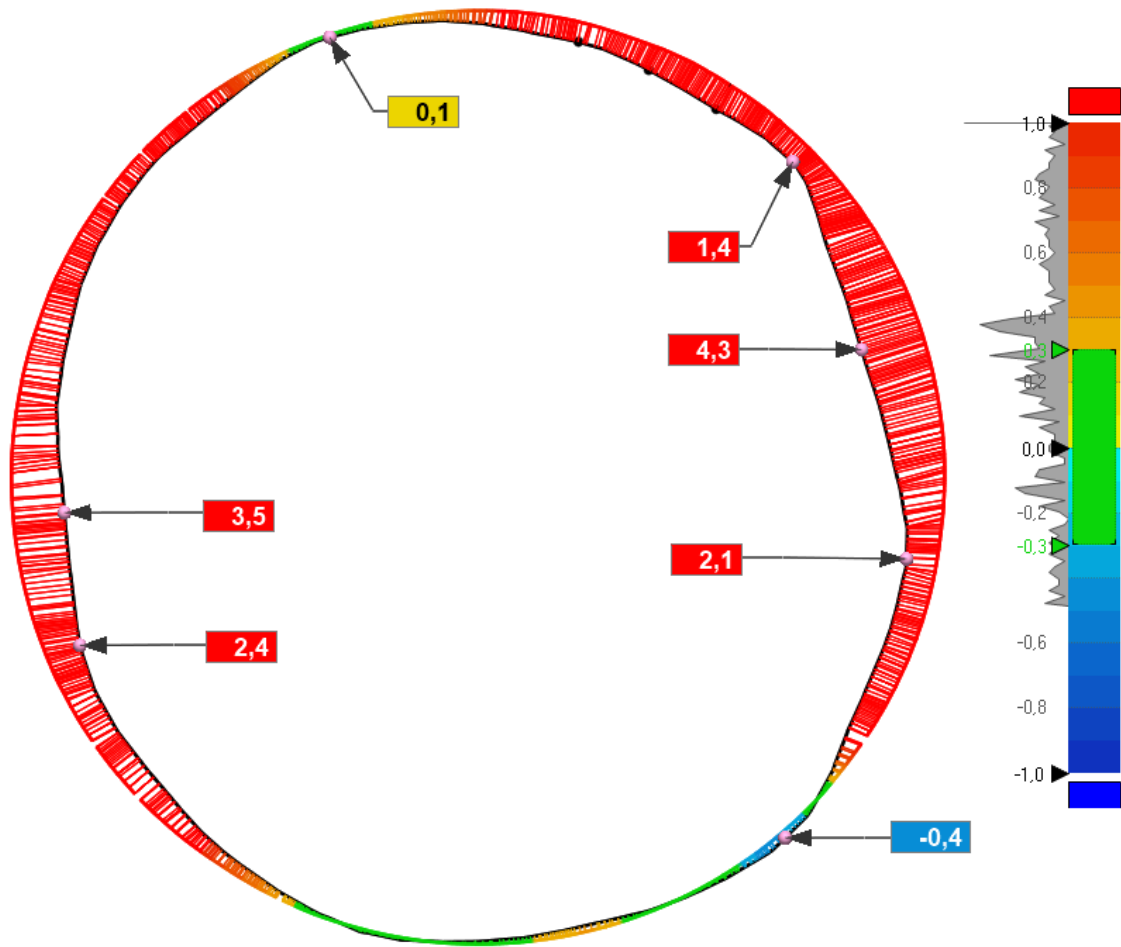
43. ábra: IPA dobozán 112 mm magasan felvett metszet

A 43. ábrán már látható, hogy a Breuckmann szkennert készített modell közelíti a szabályos kört, míg a telefonos modell hol belül, hol pedig kívül esik ezen a körvonalon. A modell tetején található az IPA dobozának legnagyobb eltérése, ez 5,3 mm nagyságú, és egy kis sugarú görbülettel látszik a 43. ábrán.

A doboz szemközti oldalán szintén egy mélyedés található, viszont ez csak 4,3 mm nagyságú. A másik két oldalon a telefonos modell van kívül (a Breuckmann szkennert által készített modell itt a kék körvonallal látható), így ez egy ellipszisre emlékeztet.

A Kozel dobozáról készült modellek összehasonlításánál kisebb eltérések adódtak, akár csak a CloudCompare-ben elvégzett ellenőrzés esetén. A Kozelről készült telefonos modell minden esetben jobban közelítette a kört, mint az IPÁ-ról ugyanezen technikával készült modell, viszont az alsó és felső karima környékén nagyobb, 2-4 mm nagyságú eltérések is jelentkeztek (44. ábra) a Kozel modelljén is.

Ez nem meglepő, ugyanis az alsó karima minden sörösdobozról készült telefonos modell gyengéje. Az összes többi metszeten viszont kisebb, 1-2 mm nagyságú eltérések jelentek meg, és a telefonos modell metszete minden esetben inkább emlékeztet körre, mint ellipszisre.



44. ábra: A Kozel dobozán 5 mm magasan felvett metszet (alsó karima)

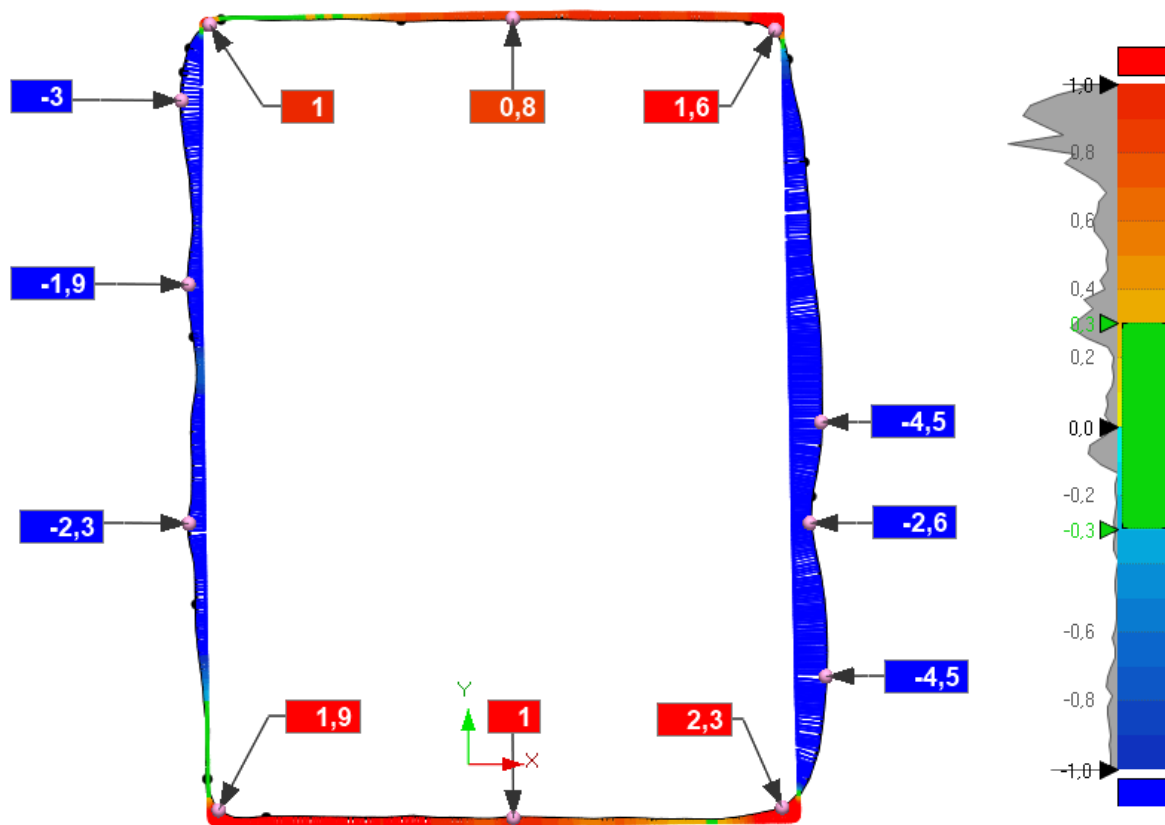
A maja domborműről készült modellek összehasonlításánál mind a három tengelyen vettem fel metszeteket. Az X és Z tengelyeken felvett metszeteket igen sűrűn helyeztem el (9-10 mm), így nagyon sok adatom keletkezett.



45. ábra: A maja domborműről készült modellek illeszkedése

A sok metszetben elvégzett vizsgálatot a dombormű részletessége indokolta, azt szerettem volna megtudni, hogy az egyedi vonásokat, rovátkákat mennyire jól képezte le a telefon ToF szenzorja. Ahogy az a 45. ábrán látható, a telefon a sarkokat, egyenes oldalakat lekerekítette, íves felületeket képzett. A 45. ábrán a Breuckmann szkennerral készült modell narancssárga színnel látható. Ez a modell nincs ellátva textúrával, így a Control X szoftver egy színnel jeleníti meg.

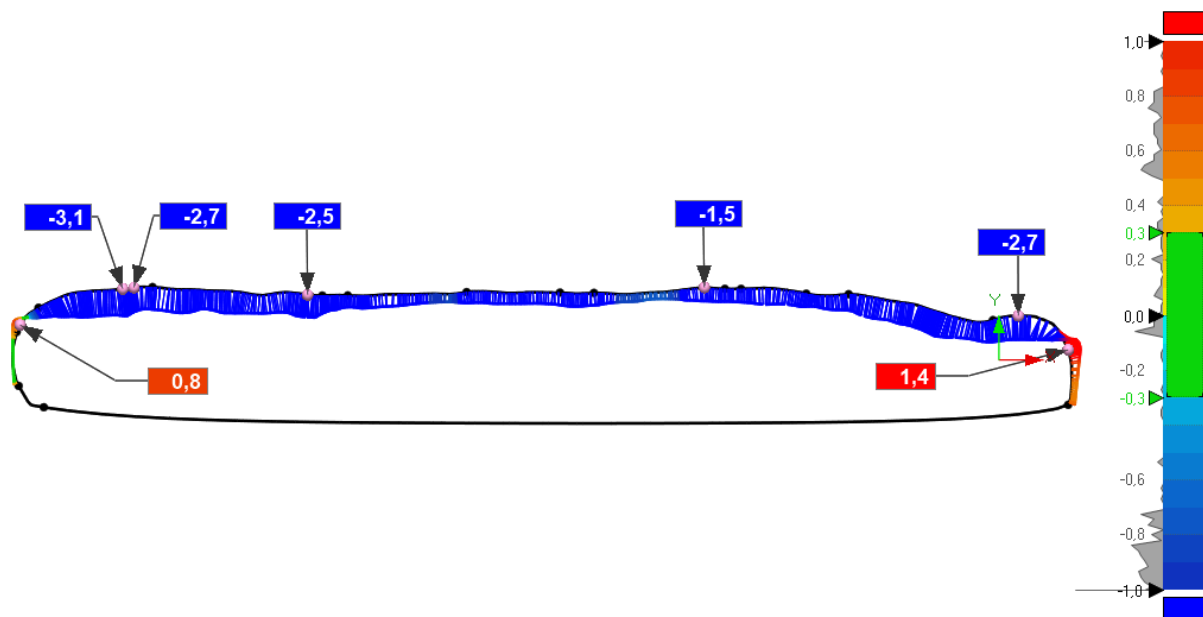
Az Y tengelyen felvett metszetek jól mutatják, hogy a sarkos, lépcsőzetes részeket a telefon szkennere ívekkel közelíti, így nagyobb eltérések is mutatkozhatnak (46. ábra).



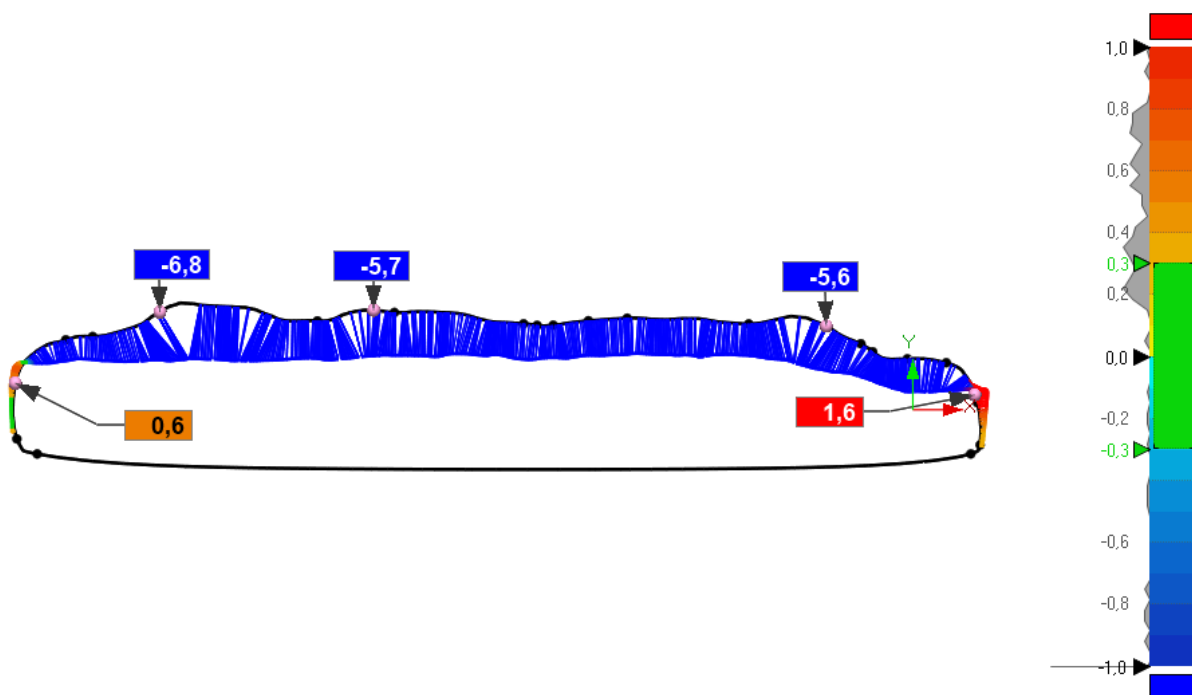
46. ábra: A maja dombormű aljáról készült Y irányú metszet 1 mm magasságban

A 46. ábrán a Breuckmann-féle modell téglalap alakja belül jól kirajzolódik. Ezt veszi körül a telefontal előállított modell, egy szabálytalanabb téglalap, a sarkok eltérően mosódnak el, ívesednek, az oldalak pedig sokkal hullámosabbak, mint az eredeti tárgyé; több, mint 5 mm-es eltérések is vannak a modellek közt.

Az X és Z tengelyen (vízszintes tengelyeken) felvett modellek két részre tagozódnak: alap, és maga a dombormű. Az alapokon is 2-2 metszetet vettem fel, az egyiket közel a tárgy széléhez (47. ábra), a másikat pedig közel ahhoz a részhez, ahol egy lépcsőzetes rész emelkedik ki az alapból, amelyen a dombormű található (48. ábra). Az első metszettípuson kisebb eltérésekre számítottam, mint a domborműhöz közelebbin, mert ez utóbbin már megjelenik a sarkos, egyenes részek görbületekkel való közelítése.



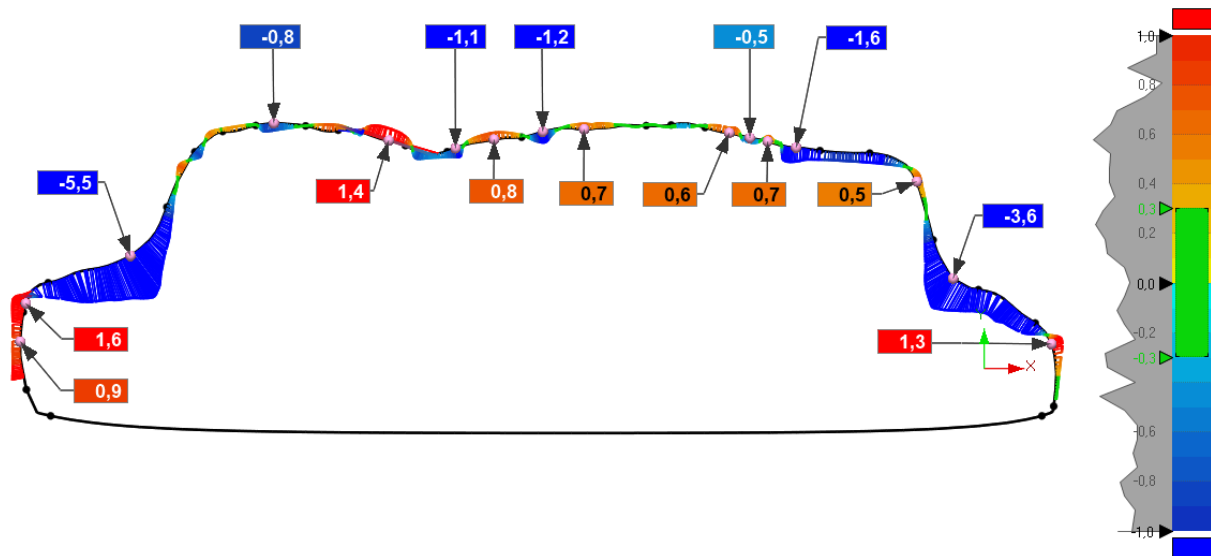
47. ábra: A maja domborművön az X tengelyen felvett, a tárgy széléhez közeli metszet



48. ábra: A maja domborművön az X tengelyen felvett, a szintugráshoz közeli metszet

A fenti ábrákon látható, hogy a hipotézis helyes volt; a szintugráshoz közelítve az eltérések nagysága nő (1-3 mm-ről 5-6 mm nagyságúra). Emellett azt is látjuk, hogy a sarkok a telefon modelljein nem sarkosak, hanem ezek is íveltek, és a referenciaként használt modelleken belülré esnek. Ez azért történt, mert a telefon az éleket nem kezeli megfelelően, ezek a részek ívesednek, kipúposodnak.

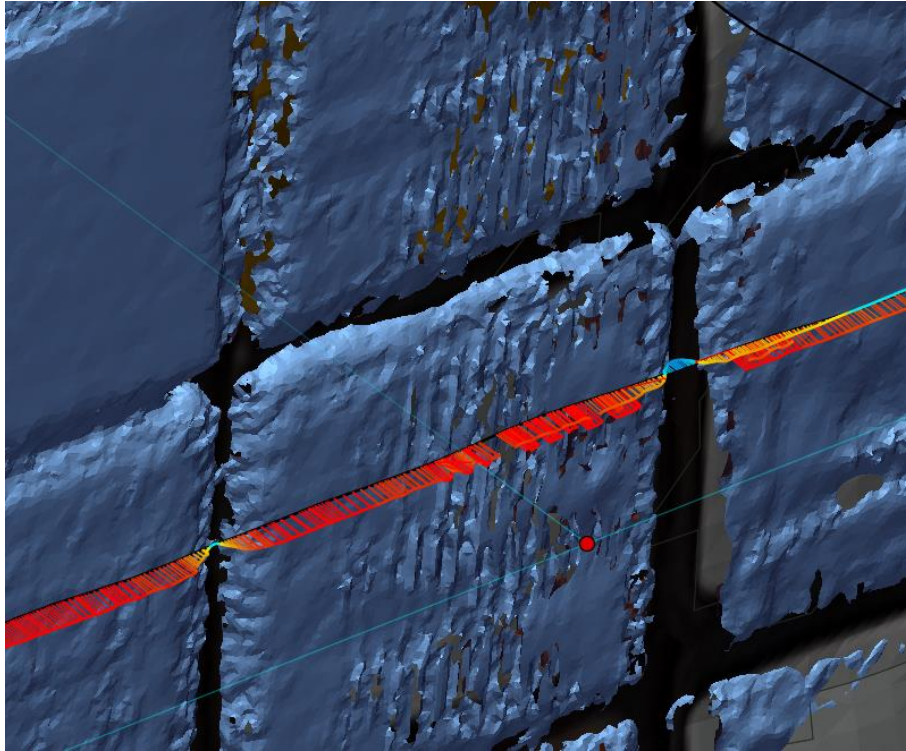
Azokon a részeken, ahol a dombormű található, sokkal több vizsgálati pontot helyeztem el annak érdekében, hogy a lehető legtöbb mélyedést, egyedi karcolatot tudjam vizsgálni. A Breuckmann szkennerral készített modellen textúra hiányában is jól látszik a dombormű, a telefonos modell esetében azonban a textúra szükséges a megértéshez. Ha azt eltávolítjuk, nem értelmezhető a modell. Ez az oka annak, hogy a 49. ábrán sokkal több helyen látható címkézett eltérés, melyek nem nagyok (1-2 mm értékűek), viszont egyértelműen láttatják, hogy nagyon sok helyen vannak kis különbségek a modellek közt. Az eltéréstérképen látszanak továbbá a lépcsőzetes részeken megjelenő nagyobb (5-6 mm-es) eltérések.



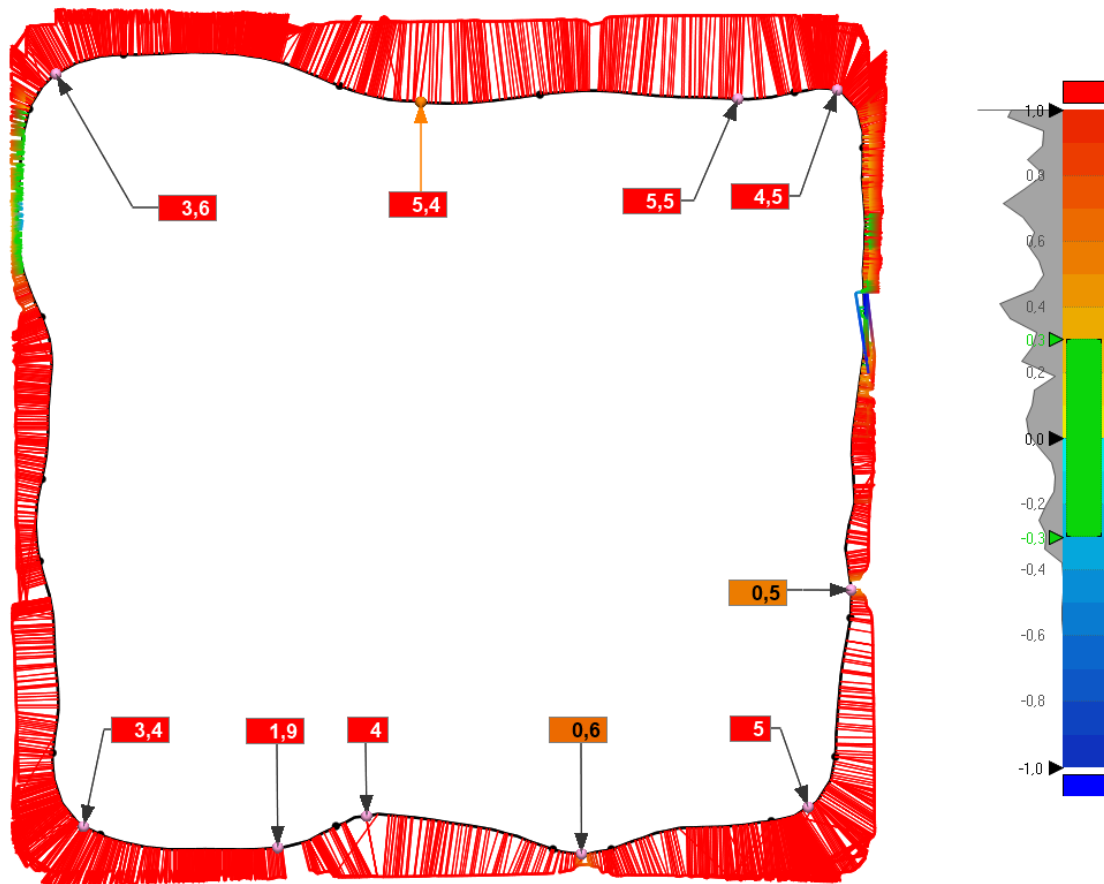
49. ábra: A maja domborművön az X tengelyen az egyedi mintájú részen felvett metszet

Egyes esetekben a telefon által készített modell pontosnak mondható volt, azonban ez csak lokálisan igaz, a kis mélyedések, karcolatok nem, vagy csak kis mértékben képződtek le a modellen.

A Rubik-kockáról készült modell esetében egyrészt az volt a vizsgálati szempont, hogy a telefon által előállított modell az egyenes oldalakat mennyire tudja pontosan leképezni. Másrészt pedig az egy oldalon található kilenc kis négyzet közötti rés, amelyeknél a kocka el tud forogni használat közben, mennyire pontosan képződik le a telefonos modellen. Ezek a részek a Breuckmann modellen valódi lyukkaként jelentek meg, ahogy azt a 3.2. fejezetben láttuk. Emellett egy másik probléma is adódott; a Breuckmann modellen némely oldalsó lap recés felületű lett (50. ábra). A Rubik-kockán található matricák fényes felületűek, visszaverik a fényt; valószínűleg azért alakultak ki a recés részek a modellen, mert a forgóasztal éppen olyan állásban volt, hogy a matricák visszaverték a szkennertől kibocsátott fényt. Ezáltal a kivetített minta olyan mértékben torzult, hogy a sík helyett az 50. ábrán látható recés felület jött létre. A recés részek hatása, ahogy az az 50. ábrán is látható, hogy a szoftver a távolságok számításánál nehezen értelmezhető eredményt ad, van olyan hely is, ahol nem ad értéket, de olyan is előfordul, hogy egy recés résznél két eltérésérték is megjelenik. Ez sajnos a maximális megengedett eltérés beállításának iterálásával sem megszüntethető probléma. A Rubik-kockáról készült vízszintes (X-Z síkban felvett) metszeteken (51. ábra) ez a hatás mindenhol megjelent.



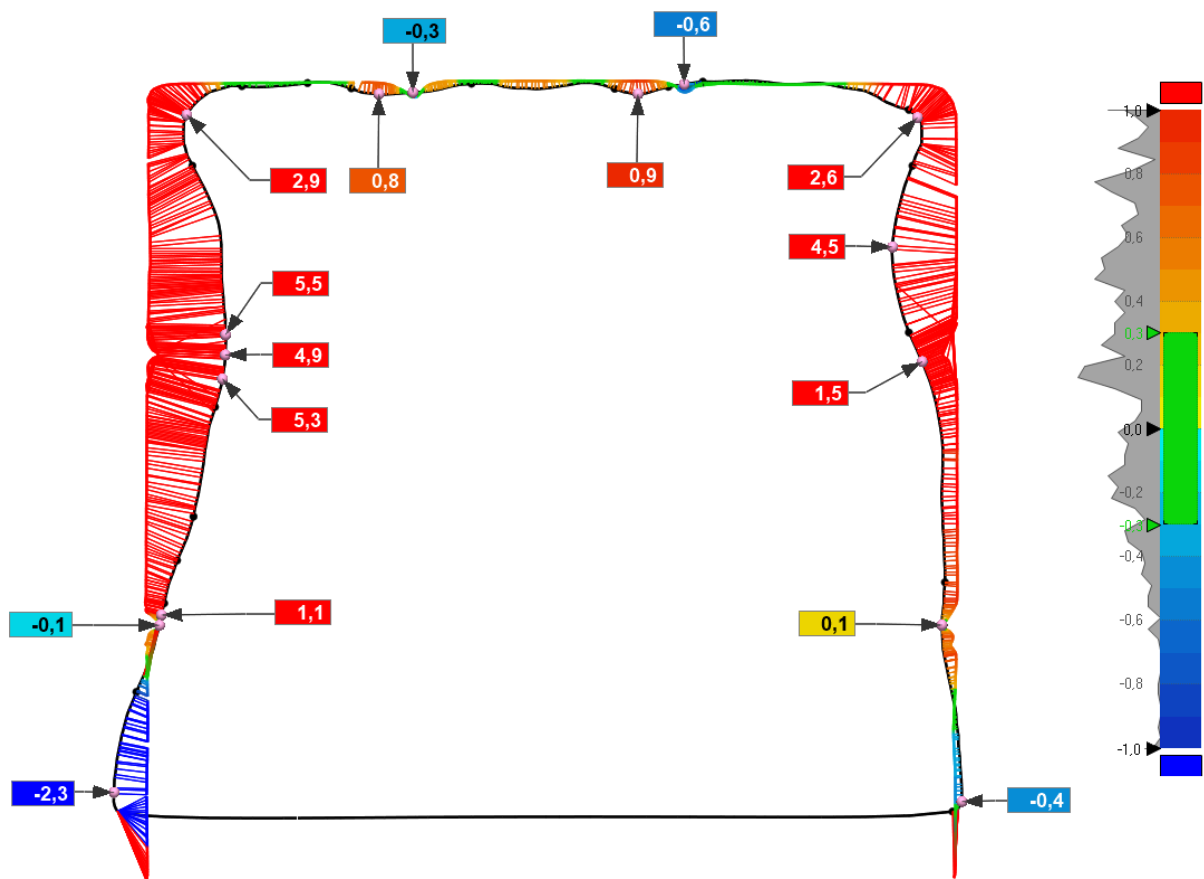
50. ábra: A Breuckmann modellen megjelenő redők az oldalsó lapokon



51. ábra: A Rubik-kockáról felvett felső Y irányú metszet

Az Y irányú metszeten (51. ábra) látszik, hogy a telefonos modell minden esetben belül volt a Breuckmann szkener modelljéhez képest. Ez az eltérés akár 5,5 mm nagyságú is lehet. Az Y irányú metszeten csak a Breuckmann szkennerral előállított modelleken látszanak az egyes kisebb kockák közötti rések, a telefonos modellen ezek nem felfedezhetők. Ahogy a 3.1. fejezetben láttuk, a telefonos modell oldalsó lapjai inkább trapéz, mint négyzet alakúak, ezáltal az Y irányú metszeten egyre feljebb haladva egyre nagyobb eltéréseket tapasztalunk pozitív irányba (a telefonos modell egyre kisebb kiterjedésű).

Az X és Z irányú metszeten láthatjuk azt a nagy mélyedést a telefonos modellen, amelyet már a CloudCompare-ben elvégzett összehasonlításnál is felfedeztünk (52. ábra).



52. ábra: A Rubik-kockán felvett X irányú középső metszet

Az 52. ábrán már tisztán látszanak a kis kockák közti rések a Breuckmann szkener modelljén, azonban a telefonos modellen nem. A nagy bemélyedés 5,3-5,5 mm nagyságú, a kettő érték közt foglal helyet egy 4,9-es, kisebb eltérés. Ez az érték a kockák közti rés miatt kisebb.

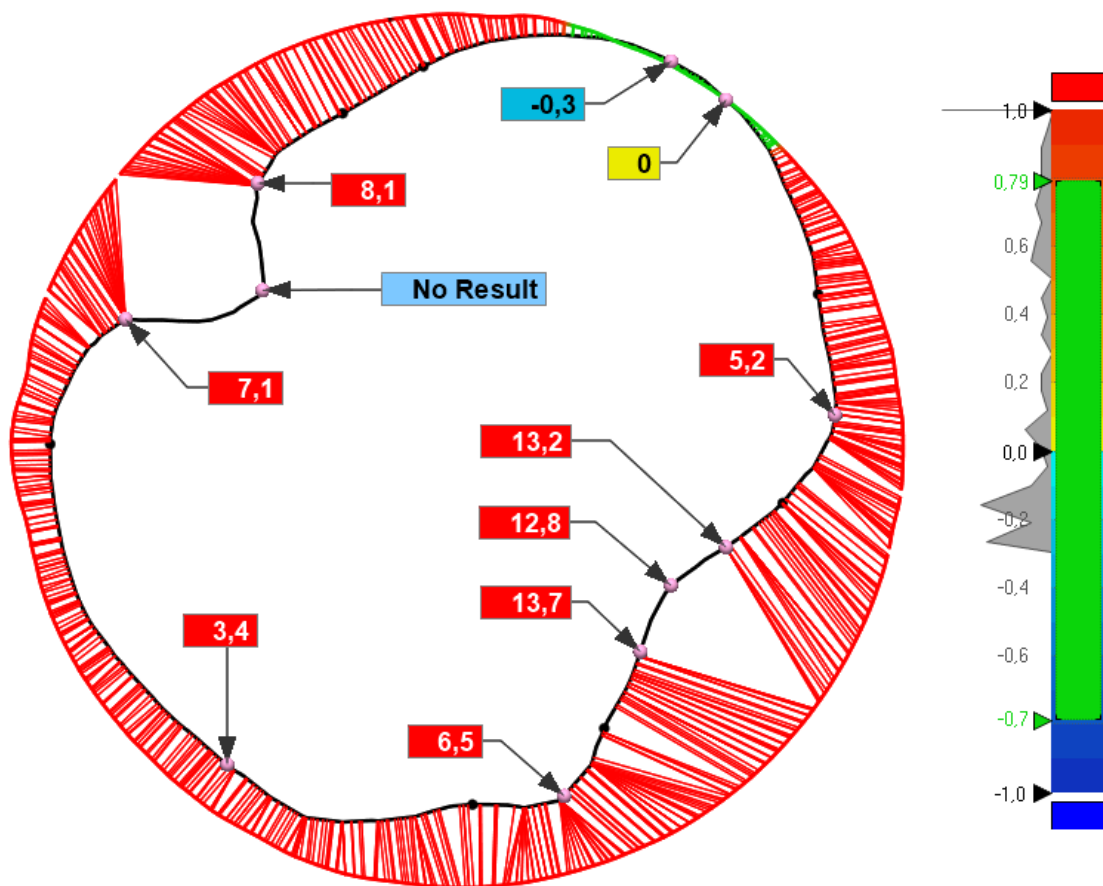
A modell szemközti oldalán alul azonban a Breuckmann szkener modelljén sem egyértelmű, hogy hol van a kis kockák közti rés, két hasonló, de eltérő mélységű görbületet figyelhetünk meg. Valószínűleg az ábrán címkével ellátott mélyedés a keresett rész, mert ezen a helyen ugyanakkora a mélyedés, mint a többi oldalon is.

5.2. Artec Eva és a telefon modelljeinek összehasonlítása

Az Artec-Samsung összehasonlításból készült összes metszet a 2. mellékletben található.

Ebben az összehasonlításban már minden modell részt vett, a metszeteket pedig ugyanott vettem fel, mint a Breuckmann-Samsung összehasonlítás esetében.

Az Arany Fácán modellek összehasonlításából szinte mindenhol nagyon nagy eltérések adódtak, a telefonos modell sehol sem emlékeztetett körre, a legnagyobb eltérések a felső karima alatt jöttek létre (53. ábra). Ezen a metszeten a legnagyobb látható eltérés 13,2 mm, ami az összes Control X szoftverben végzett összehasonlítás közül a legnagyobb. A vele szemközti részen egy szintén nagy eltérés jelent meg, ennek értéke azonban nem ismert („No Result”), és a legnagyobb megengedett eltérés 2 cm-re való állítása esetén sem kaptam eredményt.

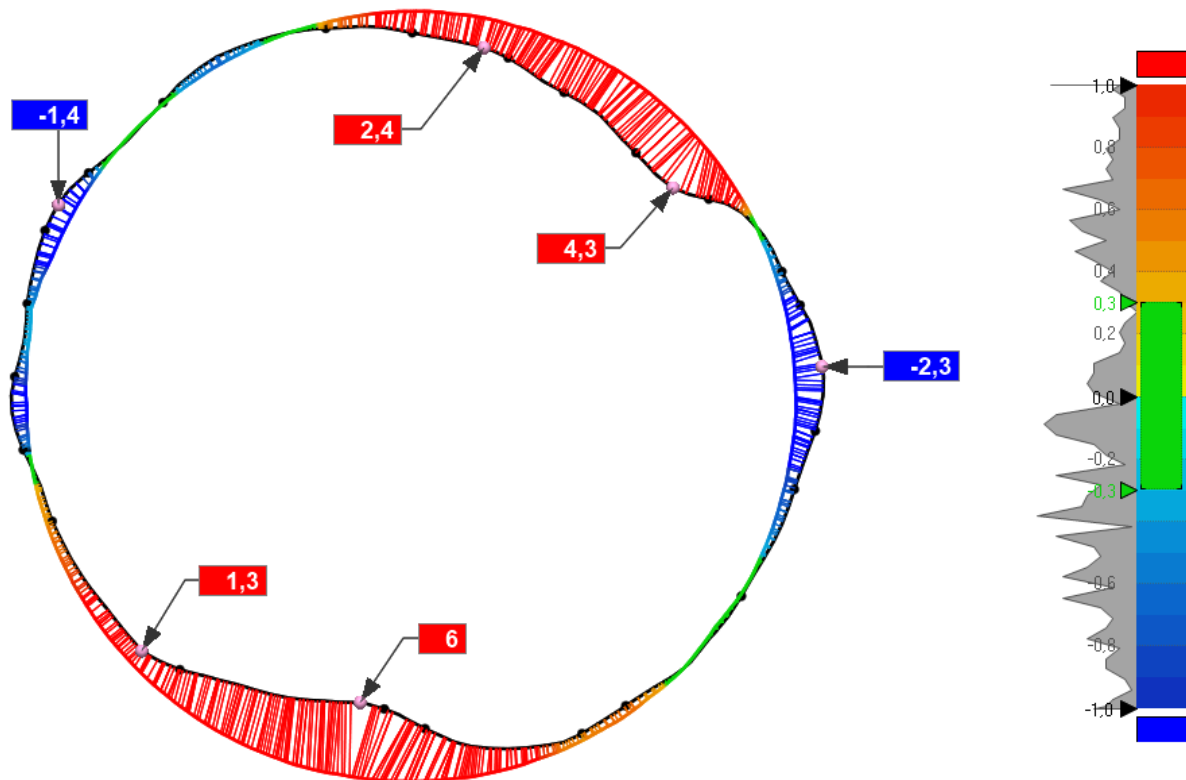


53. ábra: Az Arany Fácánról készült metszet 118 mm magasságban

Az 53. ábrán a telefonos modell egy babszem alakjára emlékeztet, azonban az Artec Eva modelljének körvonala sem teljesen kör alakú, vannak benne hullámos részek az ábra bal oldalán.

Az is látható továbbá, hogy a telefonos modell majdnem mindenhol az Artec Eva modelljén belülre esik. Ez a többi felvett metszeten is túlnyomó többségben így van, azonban egy esetben, a 77 mm magasságban felvett metszeten van kívül a telefonos modell mintegy 2,3 mm-rel.

Az IPA modellek összehasonlításánál az összes metszetben hasonló eredményt kaptam, mint a Breuckmann szkenneres vizsgálatkor. Az 54. ábrán a 112 mm magasán felvett metszetet láthatjuk, ez a felső karima alatti szelvény. Az ábrán láthatjuk, hogy a telefonos modell hol kívül, hol belül esik az Artec Evával készült modellen. Többnyire belülrre esik, és ezek az eltérések nagyobbak is, mint a másik esetben.

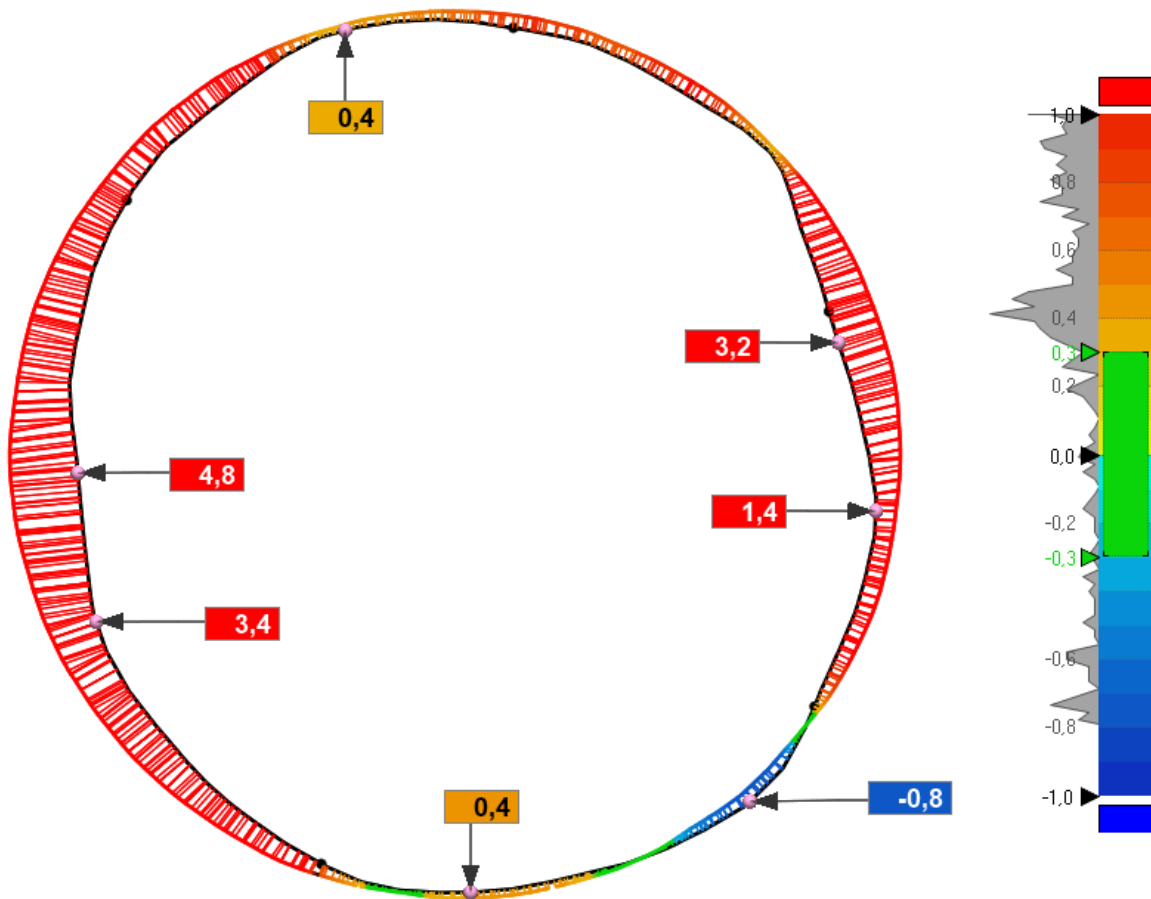


54. ábra: Az IPA modelljén 112 mm-nél felvett metszet

A többi metszetenél az eltérések mértéke átlagosan 1 mm-rel tér el az előző vizsgálat eredményeitől. Az alsó és felső karimáknál felvett metszetek eltérései is csak kis eltérést mutatnak az előző vizsgálat eredményeitől. Az 54. ábrán is látszik, hogy az Artec Eva által készített modell kissé hullámos az ábra bal oldalán, nem annyira egyenletes, mint a Breuckmann szkenneres modelljei. Ezek a hullámok azonban nem számottevők, 1-2 mm nagyságúak.

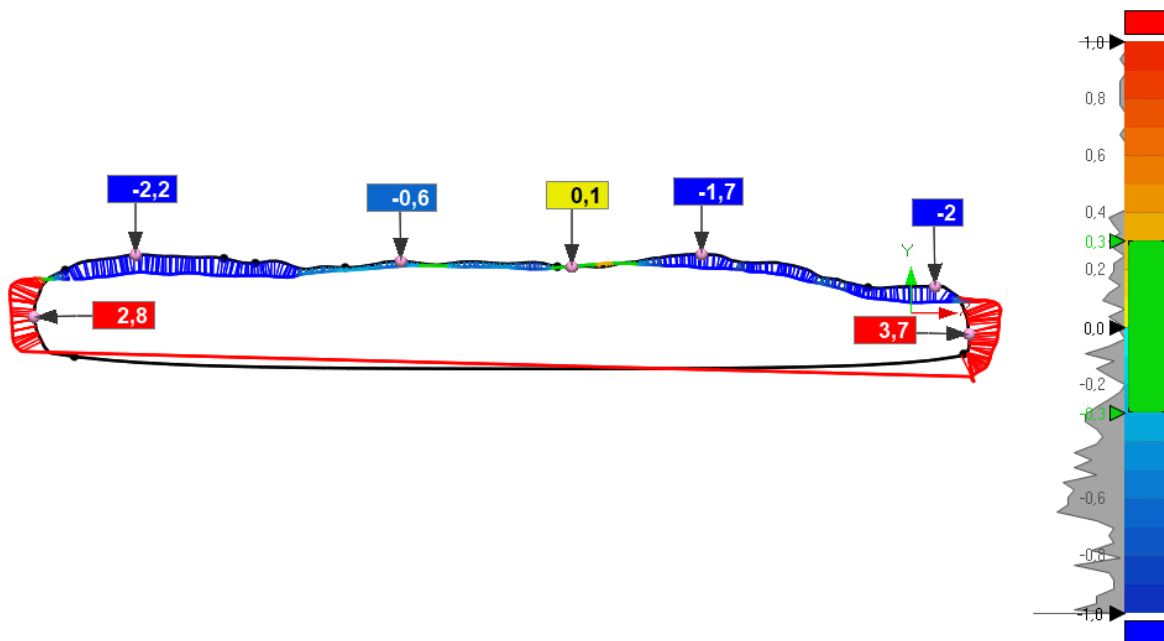
A Kozel modelljei között a legnagyobb eltérés az alsó karima mentén keletkeztek, ahogy a többi esetben is. A doboz többi részén a telefonos modell jól közelíti a kört, átlagosan 1 mm nagyságú eltéréseket tapasztalunk, ám a legnagyobb eltérés majdnem 5 mm, ami csak egy esetben (a 76 mm magasán felvett szelvényen) fordul elő. A telefonos modell többnyire az Artec Eva készítette modellen belülre esik, a nagyobb eltérések 3-4 mm értékűek.

Az előző vizsgálatnál láthattunk, hogy a Kozel dobozán az alsó karima metszetén 2-4 mm-es eltérések jelentkeztek. Jelen esetben is ugyanezen értékek jelentek meg.

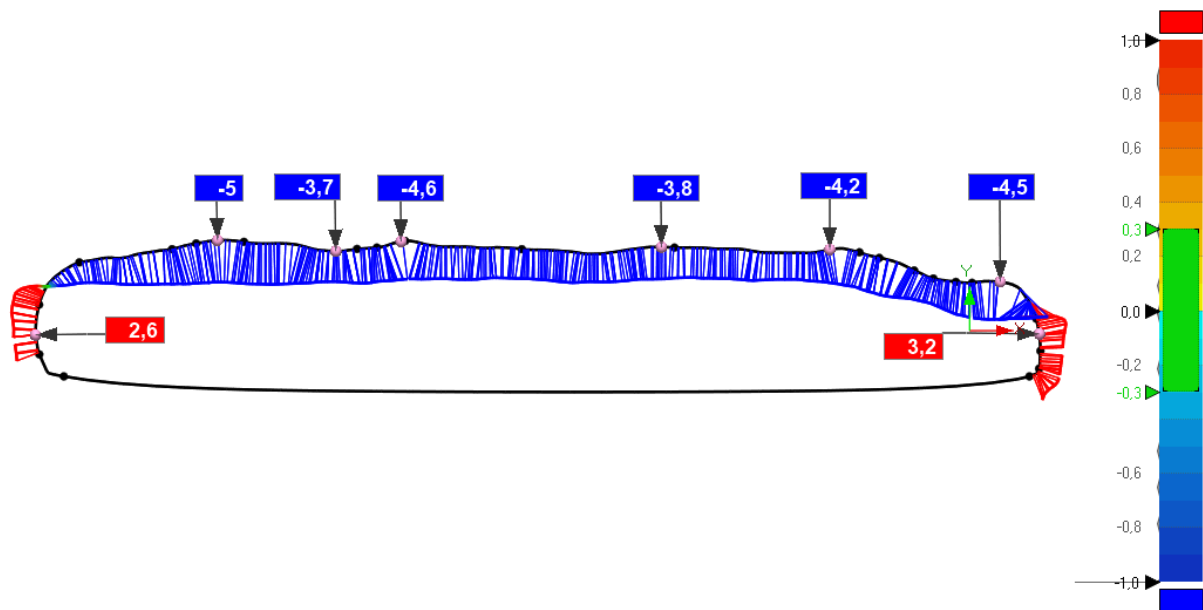


55. ábra: A Kozel dobozán készült metszet az alsó karimánál (4 mm magasságban)

A maja dombormű esetében is ugyanúgy jártam el, mint az előző összehasonlítási eljárásban; X és Z irányban 2-2 metszetet vettem fel azokon a részekben mind a két oldalon, ahol a dombormű alapja van (56. és 57. ábra).



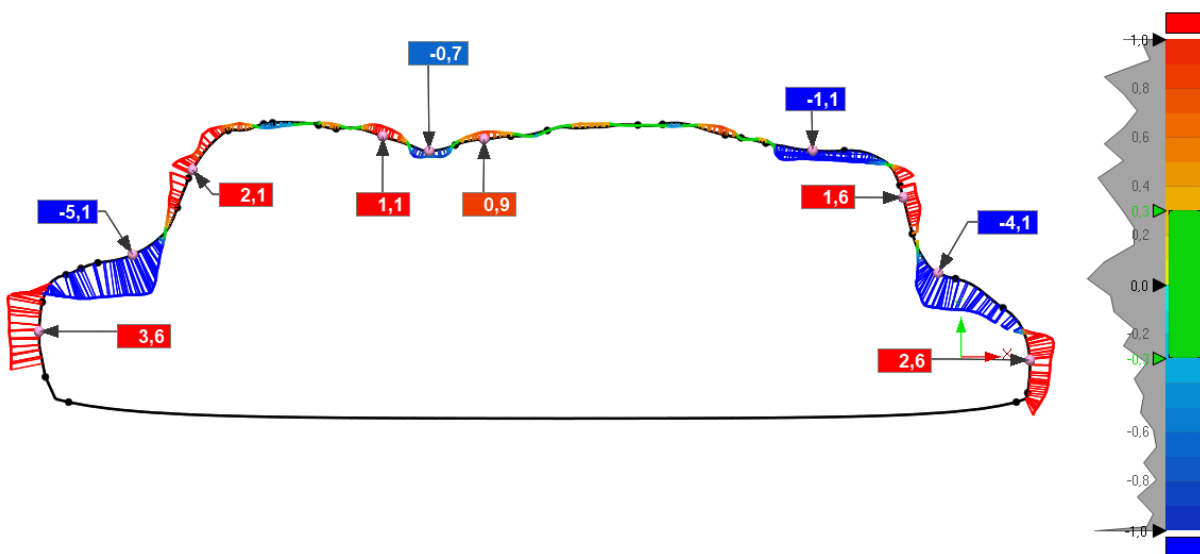
56. ábra: A maja domborművön felvett X irányú metszet az alapról 1



57. ábra: A maja domborművön felvett X irányú metszet az alapról 2

Az 56. ábrán látható metszetet a modellek széléhez közelebb vettem fel. Itt még nem látszik annyira a telefon modelljének íves lekerekítése, mint az 57. ábrán. A metszet felső részén az eltérések nem túl nagyok, egy kiemelt helyen közelítik meg a 3 mm-t. A két szélén azonban az eltérések pozitív irányúak, ezeken a pirossal jelölt részeken a telefonos modell beljebb esett, mint az Artec Evával készített modell. Az eltérések 3-5 mm nagyságúak. A modell közepe felé haladva ezen a két helyen az eltérések mértéke csökken (57. ábra), 4 mm alá esik, azonban a negatív eltérések megnőnek, egy 6 mm-nél nagyobb érték is megjelenik. Itt már érvényesül a telefonos szkanner torzítása.

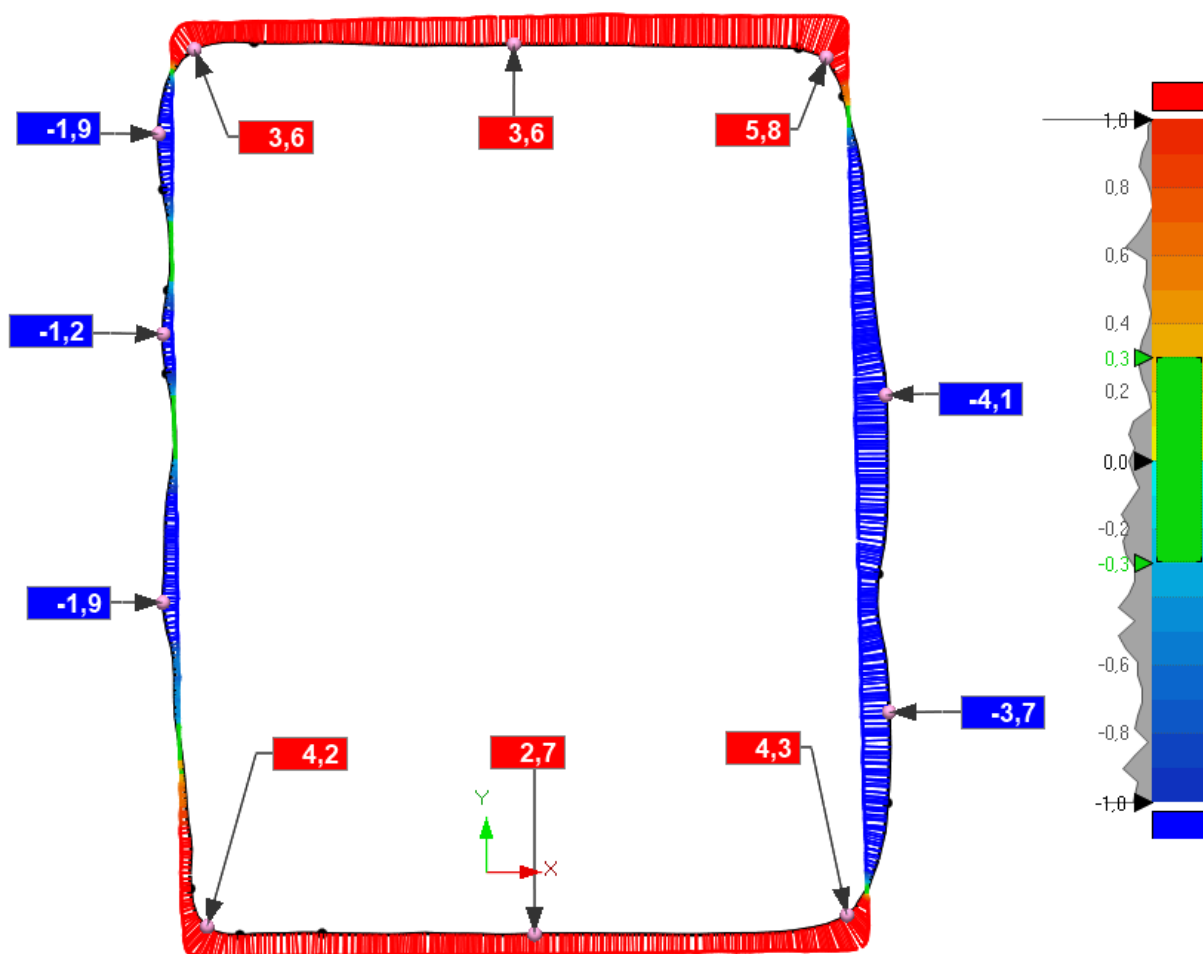
A középső, rajzoltas részen az eltérések ennél a modellpárnál is váltakozó előjelűek (58. ábra).



58. ábra: A maja domborművön felvett X irányú metszet a középső, egyedi mintájú részről

Az 58. ábrán is látszik, hogy a dombormű alapja sokkal sarkosabb az Artec Eva modellen, mint a telefonos modellen, és szélesebb is 2-3 mm-rel. Az ugrásnál maximum 5 mm az eltérés a belső sarok és a telefon által generált íves felület között, a felső részen pedig, ahol az indián figura található, csak két helyen negatív az eltérések előjele, a kiugró részeket a telefonos modell lecsapta, egy egyenetlen, de nem részletes felületet hozott létre, melynek eltérései az Artec Evával készült modelltől 1-2 mm körüli értékek.

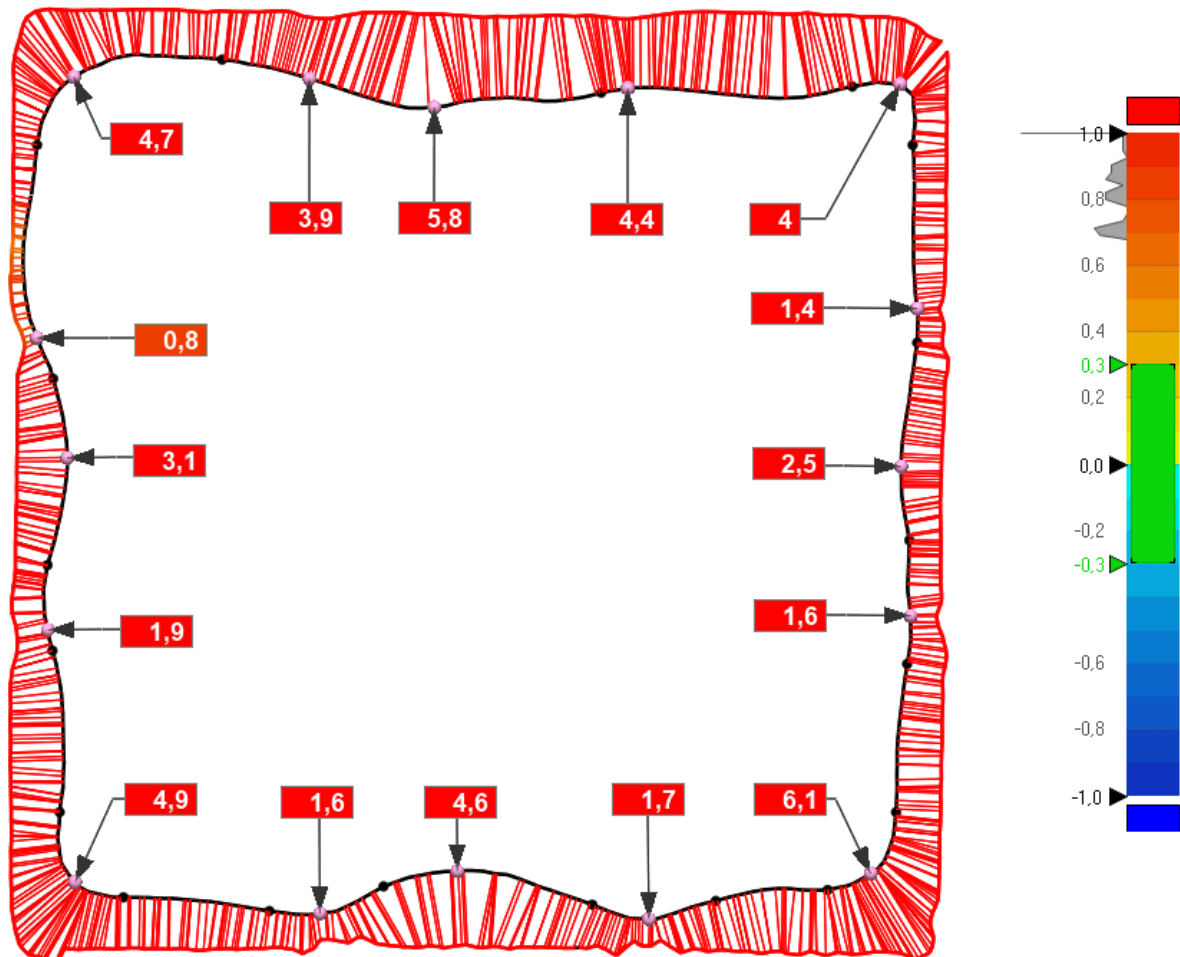
Az Y irányú metszeten (59. ábra) is megfigyelhető, hogy az Artec Eva készíttette modell sokkal sarkosabb, az oldalak egyenesebbek, mint a telefonos modellen. A sarkokban az eltérés 3-6 mm között van, az átlagos eltérés 4,5 mm. A telefonos modell hosszabb oldalai egyenetlenebbek, hullámosabbak, mint a rövidebb oldalai. A hosszabb oldalakon a hullámos részek eltérései 4 mm alatt vannak, és kisebbek, mint a rövidebb oldalon található pozitív irányú eltérések.



59. ábra: A maja dombormű alapjáról készült Y irányú metszet

Ebben az esetben is elmondható, hogy a telefon által készített modell pontatlan, a kis, egyedi részeket, vágatokat nem jól adja vissza, inkább kiegyenesíti a felületet, így az egyenetlen, göröngyös lesz. A sarkokat, lépcsőzetes részeket lekerekíti, így azok ívesek lesznek, az éleket nehéz rajtuk meghatározni.

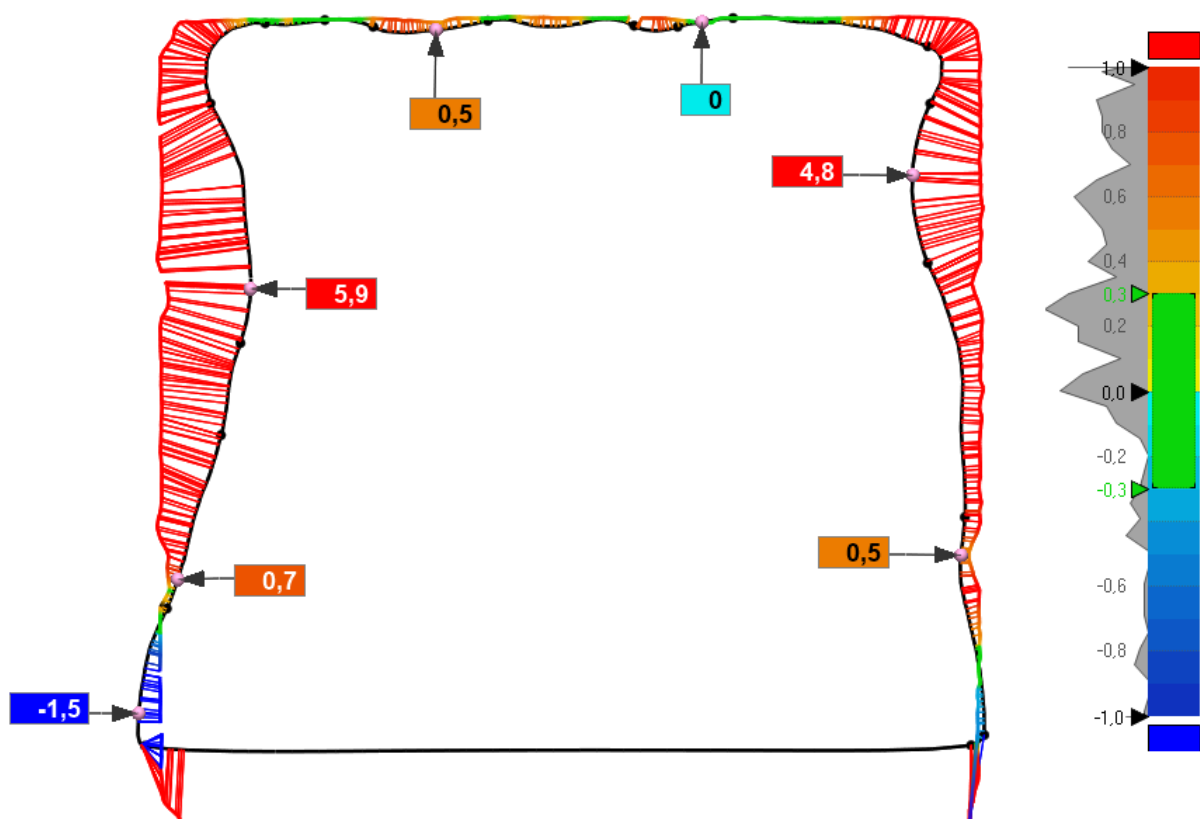
A Rubik-kockáról készült modellek összehasonlításánál is ugyanúgy vettem fel a metszeteket, mint az előző vizsgálatnál, így az eredmények is hasonlóak lettek, csak kis mértékben térnek el. Az Y irányú metszetek közül a legfelsőn (60. ábra) átlagosan kisebb eltéréseket tapasztaltam, mint az előző összehasonlítás alkalmával. A Breuckmann szkener és a telefon modelljeinek összevetésekor ebben a metszetben az eltérések 3 és 5 mm közötti nagyságúak voltak, azonban jelen esetben 1,4 és 5 mm között vannak, egyetlen kiugró értékkel (6,1 mm).



60. ábra: A Rubik-kocka modelljeiről készült felső Y irányú metszet

Ez a legnagyobb eltérés az egyik sarokban található. Ahogy az ezt megelőző vizsgálatok esetében láttuk, a telefonos modell lekerekíti a sarkokat, az oldalakat pedig nem elég részletesen hozza létre; a kis kockák közti rések itt sem jelennek meg a telefonos modellen, azonban az Artec Eva által létrejött modellen ezek is észrevehetők.

A 61. ábrán látható a középső X irányú metszet, melyen megfigyelhetjük a telefonos modell legnagyobb horpadását. A Breuckmann- és Samsung modellek összehasonlítása esetén ennek az értéke 4,9 mm volt, és a szemközti oldalon is jelentkezett egy 4,5 mm értékű, ugyancsak pozitív irányú eltérés. Jelen esetben a legnagyobb eltérés 5,9 mm, és a jobb oldalon található 4,8 mm-es eltérés megközelíti az előző összehasonlításban kapott legnagyobb eltérést. Így mind a két oldalon nőttek az eltérések, a jobb oldal eltérése itt már olyan mértékű, mint az előző összehasonlításban a bal oldalon létrejött, lokálisan legnagyobb eltérés.



61. ábra: A Rubik-kocka modelljeiről készült középső X irányú metszet

A modellek tetején található eltérések ebben az esetben is kicsik, 1 mm alattiak, a kockák közti rések helyei pedig nem egyértelműek. Az Artec Eva készítette modell szélein már jobban kirajzolódnak, de nem olyan pontosan, mint a Breuckmann szkennertől készült modelljén.

Jelen összehasonlítás is azt mutatja, hogy a telefonos modell nem egyenletes, nem minden oldalt ugyanúgy képez le, és a felsőbb részeken egyre kisebb a modell átmérője. Az oldalakon található vonalas mélyedéseket elmossa, nem jelennek meg a modellen egyértelműen.

6. Összefoglalás

A telefonba épített szkennert vizsgálata során kiderült, hogy a telefon mélységadatokat és képeket segítségével állítja elő a modelleket. A szkennert a fényes felületeket nehezen kezeli, a létrejövő modellen horpadások, mélyedések keletkeznek; ez történt az Arany Fácán esetében. A matt felületű modellek készítésekor is keletkeztek kisebb torzulások, benyomódások a hengeres felületeken, ezek azonban lényegesen kisebbek, mint fényes, tükröződő felület esetén. A telefon szkennerte a sörösdobozok felső karimáját egyik alkalommal sem tudta helyesen megalkotni, a karima nem rajzolódott ki, egy síkba került a doboz tetejével, akárcsak a nyitófül. A telefon által létrehozott modellek kissé alul skálázottnak tűnnek, pl a Rubik-kocka esetében a létrejött modell kisebb lett, mint az összes, vele összehasonlított referencia modell.

A modelleket a telefonos szkennert textúrával is ellátja, ezt a szoftver egy külön fájlban tárolja, azonban néhol kisebb átlapolások láthatók a mintákon. Ezen kívül a minták elég élesek, csak

elvértve homályosak. A mintákon megjelenő színeket nagymértékben befolyásolja a szkennelés közben alkalmazott megvilágítás.

Az összehasonlításokból kiderült, hogy a telefonnal készített modellek a horpadások ellenére jól közelítik a valóságot, a referenciamodelleket (mind az AutoCAD-ben, mind pedig az Artec Evával készült modelleket), nagyobb eltérés csak a fényes felületeknél tapasztalható. A szkennelés pontossága ezek alapján 3-5 mm-re tehető. A sarkos, éles részeket a szkennelés nem kezeli jól, még akkor sem, ha jól látja őket. Ilyen esetben elkerülni a részleteket, ívekkel közelít azokat a modellek létrehozásakor.

A Control X szoftverben végzett metszet-szintű (2D) összehasonlításokból kiderült, hogy az egyes professzionális szkennerek által készített modellek között is van különbség. Ez abból látszik, hogy a két vizsgálat alkalmával a szelvények azonos helyen való felvételénél is jelentkeznek mm-es eltérések a vizsgálati eredmények közt. A két referenciaként vizsgált szkennelés készített modellek között az eltérés mindössze 1-2 mm.

Összességében a Samsung Galaxy Note10+ modellalkotó képessége jónak mondható, viszont mérnöki alkalmazásokra még a jelenlegi verzió sem alkalmas. A szoftver folyamatos fejlesztésével és a jelenlegi hibák javításával a jövőben javulhat annyira ez a technika, hogy elég pontos lehet bizonyos ipari alkalmazásokra. Durva modellezésre, kiterjesztett valóság alkalmazások támogatására, esetleg ortofotók előállításának támogatására már a jelenlegi technológia is alkalmas. Az alkalmazás fejlesztésével a feldolgozás, modellalkotás minősége folyamatosan javul, az újabb telefonok piacra dobásával pedig a szenzorok teljesítménye, minősége is várhatóan nő.

Források

[1] <https://www.samsung.com/au/support/mobile-devices/3d-scanner/> (2020)

[2] Larry Li. Time-of-Flight Camera – An Introduction. Technical Report SLOA190B, Texas Instruments, 2014. www.ti.com/lit/wp/sloa190b/sloa190b.pdf.

[3] <https://gepilatas.wordpress.com/2016/10/03/time-of-flight-az-ipari-3d-jovoje/>

[4] <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/how-do-time-of-flight-sensors-work-pmdtechnologies-tof-3D-camera/> (2019)

[5] P. Fechteler, P. Eisert and J. Rurainsky, "Fast and High Resolution 3D Face Scanning," *2007 IEEE International Conference on Image Processing*, San Antonio, TX, 2007, pp. III - 81-III - 84, doi: 10.1109/ICIP.2007.4379251.

[6] Rehany, N., Barsi, A., and Lovas, T.: CAPTURING FINE DETAILS INVOLVING LOW-COST SENSORS –A COMPARATIVE STUDY, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W8, 213–220, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W8-213-2017>, 2017.

[7] Dr. Somogyi József Árpád – Mérnöki feladatok megoldásának hatékony támogatása pontfelhő alapú eljárásokkal (2017), PhD disszertáció

[8] <https://www.sammobile.com/news/galaxy-note-10-plus-3d-scanner-app-now-available-on-galaxy-store/> (2020)

[9] https://www.phonearena.com/phones/Samsung-Galaxy-Note10+_id11190 (2020)

[10] Joó Péter - Gépjármű karosszéria felmérése és modellezése lézerszkennelés és tárgyszkenelés segítségével (2014)

[11] <https://www.freedee.hu/3d-szkennerek/artec-3d-szkennerek/artec-eva/>

Mellékletek

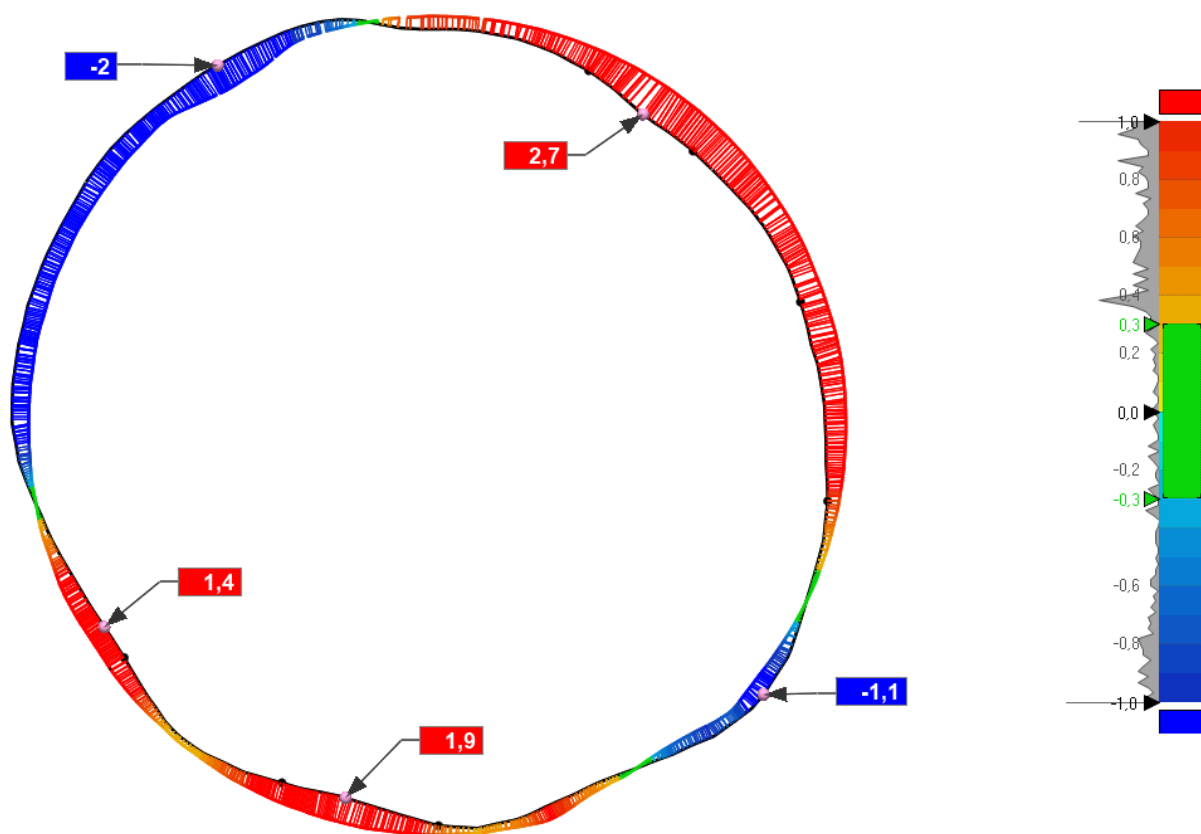
1. melléklet: Breuckmann smartSCAN és Samsung modellek összehasonlítása Geomagic Control X szoftverben - metszetek
2. melléklet: Artec Eva és Samsung modellek összehasonlítása Geomagic Control X szoftverben - metszetek

Tárgyszkenelési technológiák összehasonlító elemzése

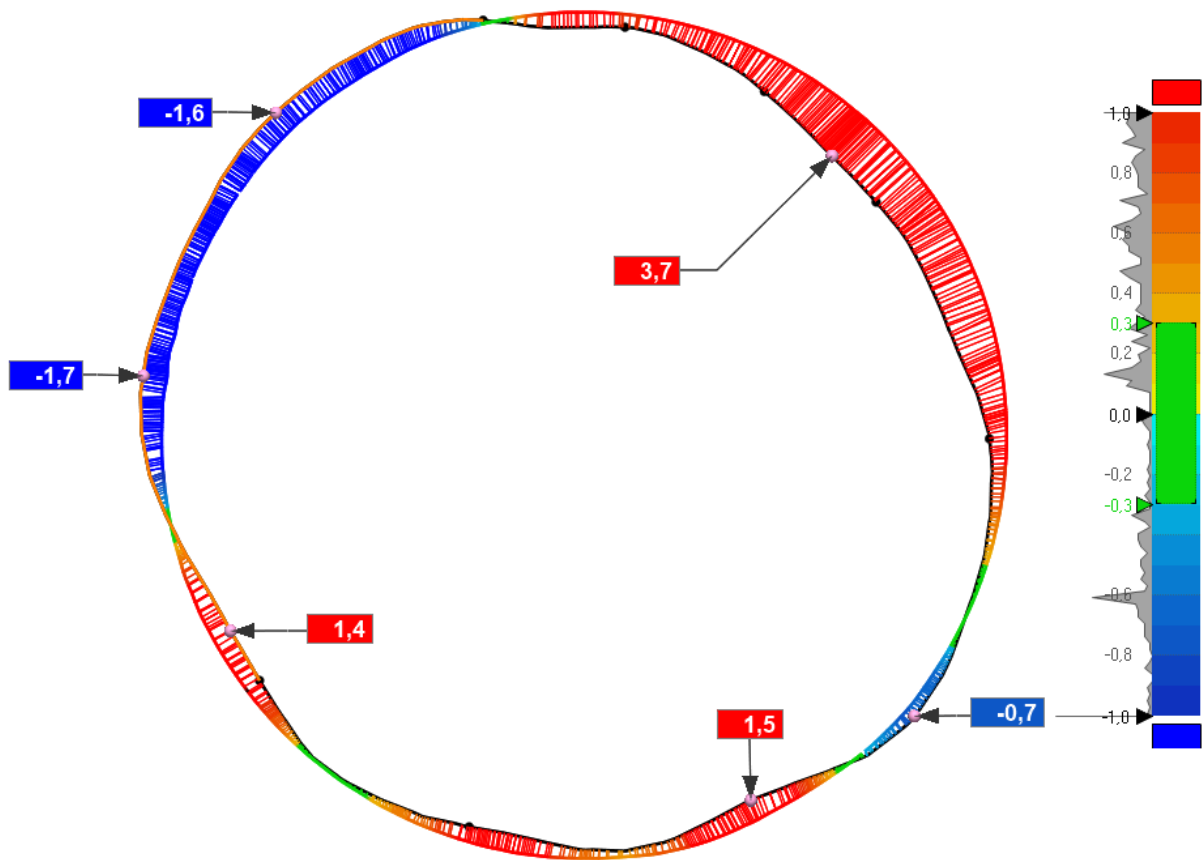
1. melléklet: Breuckmann smartSCAN és Samsung modellek összehasonlítása Geomagic Control X szoftverben – metszetek

Az ábrák címében a számérték (pl 5 mm) azt jelenti, hogy a Control X szoftverben a tengely 0 pontjától mennyi mm-re helyezkedett el a szelvény. A maja dombormű és a Rubik-kocka esetében az A és B oldalak a pozitív és negatív irányokat jelölik, ezekben az esetekben a tengely 0 pontja a modellen belül helyezkedett el.

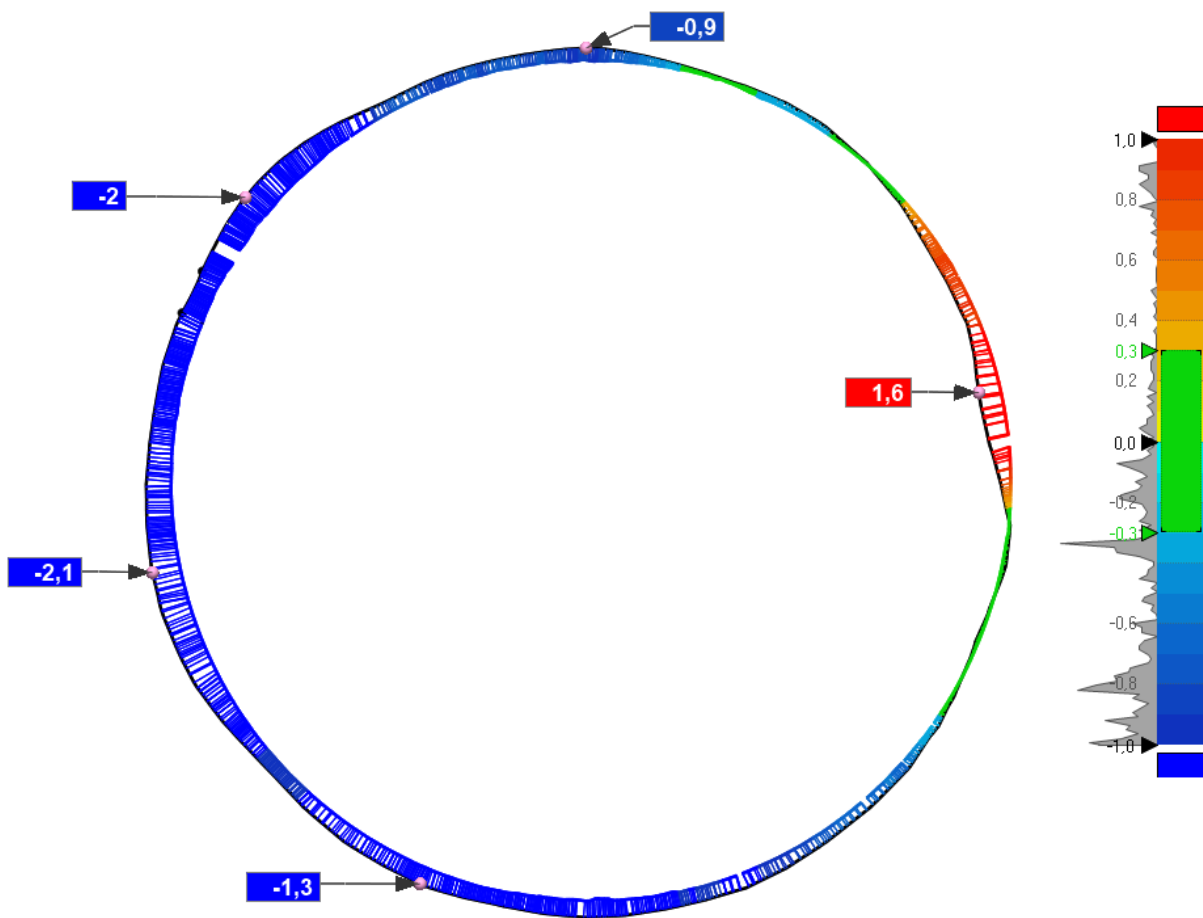
IPA modelljeinek összehasonlítása:



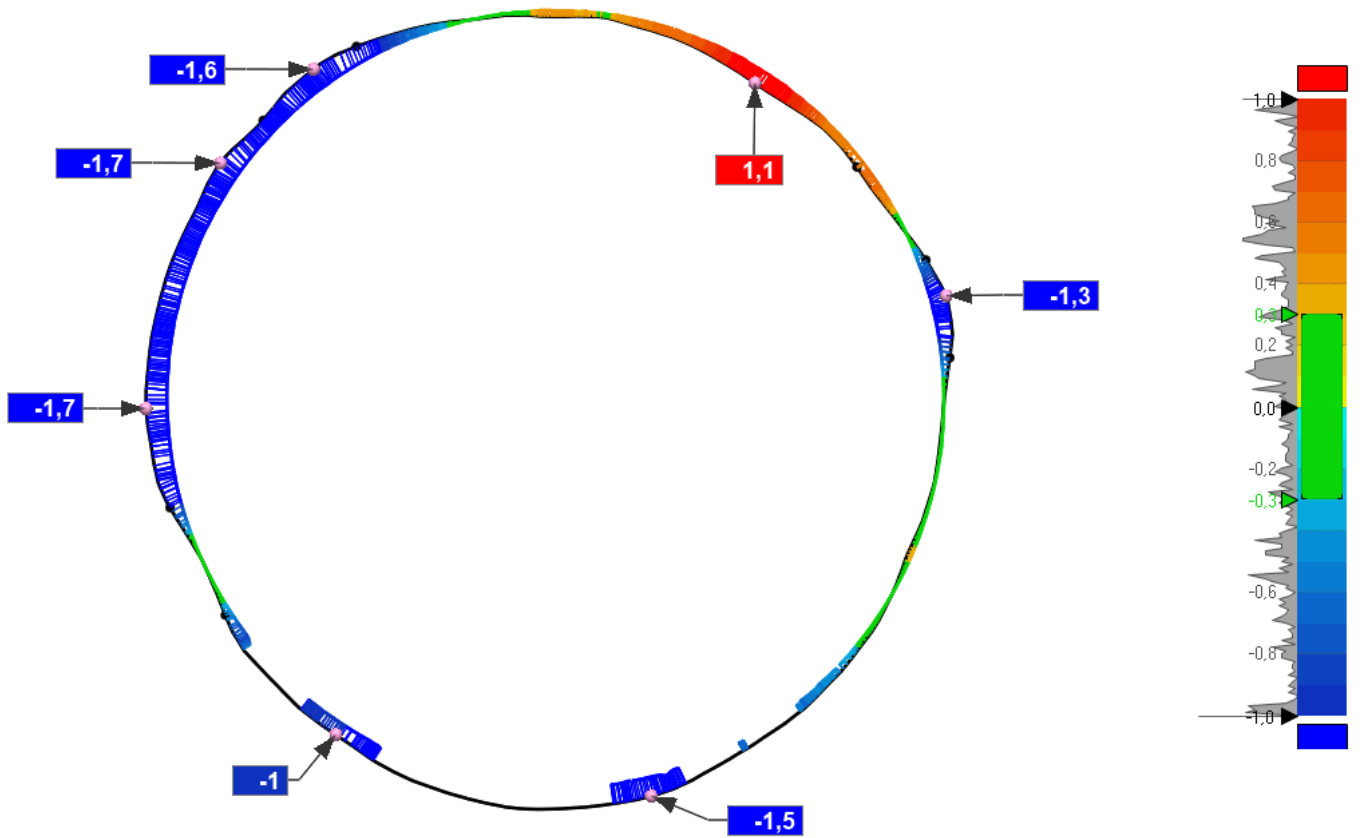
1. ábra: IPA modellek összehasonlítása, 5 mm – alsó karima



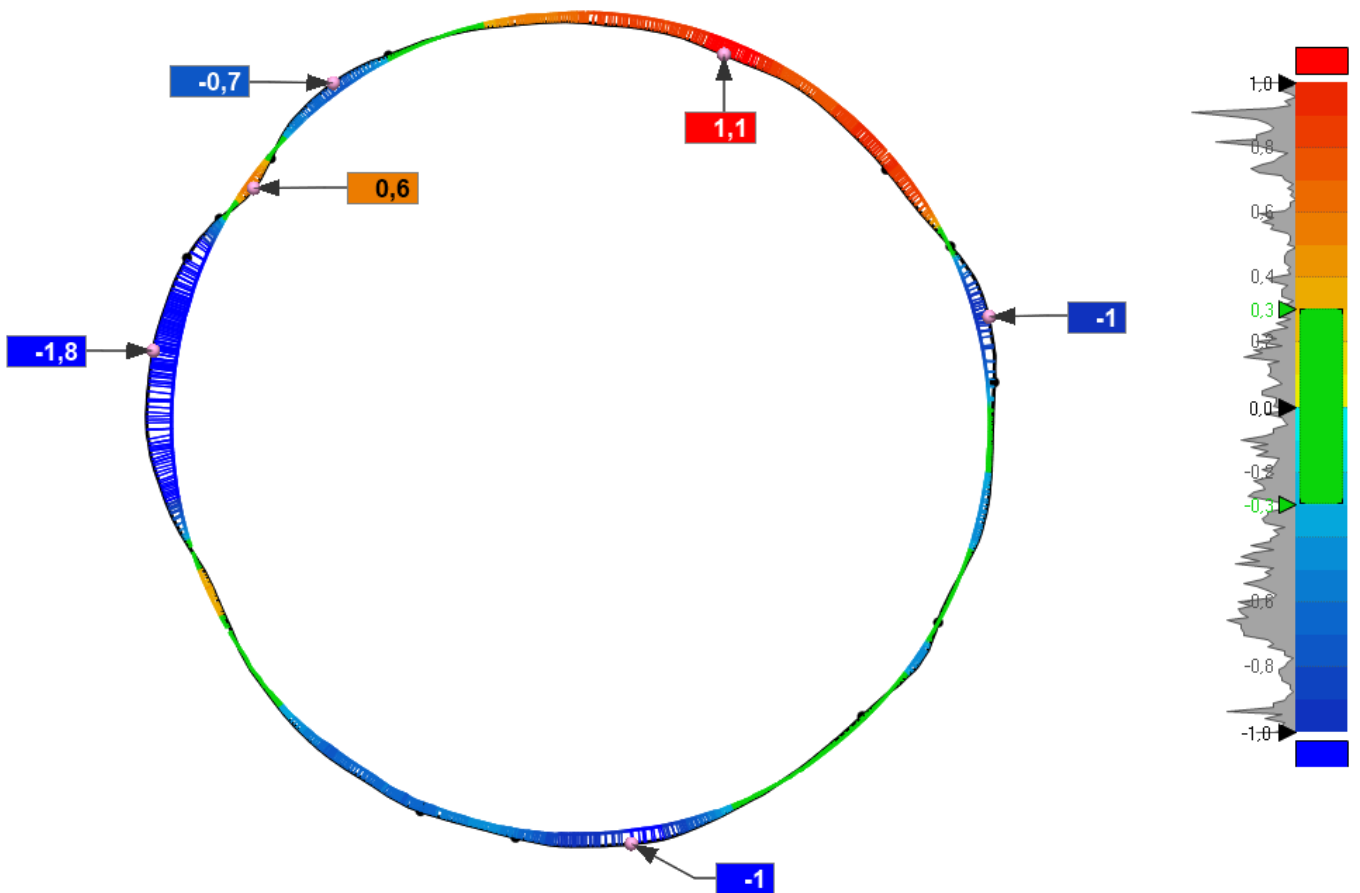
2. ábra: IPA modellek összehasonlítása, 10 mm



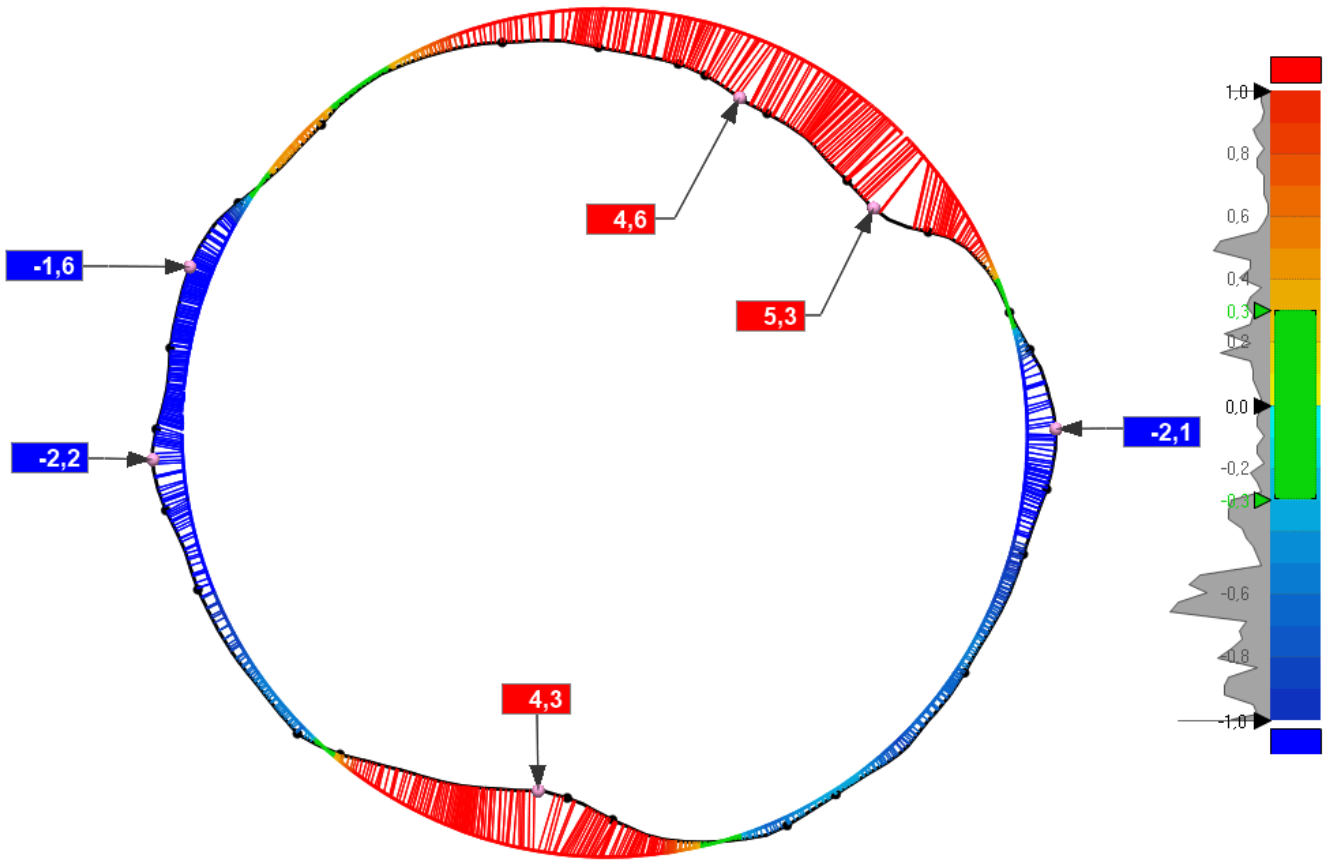
3. ábra: IPA modellek összehasonlítása, 40 mm



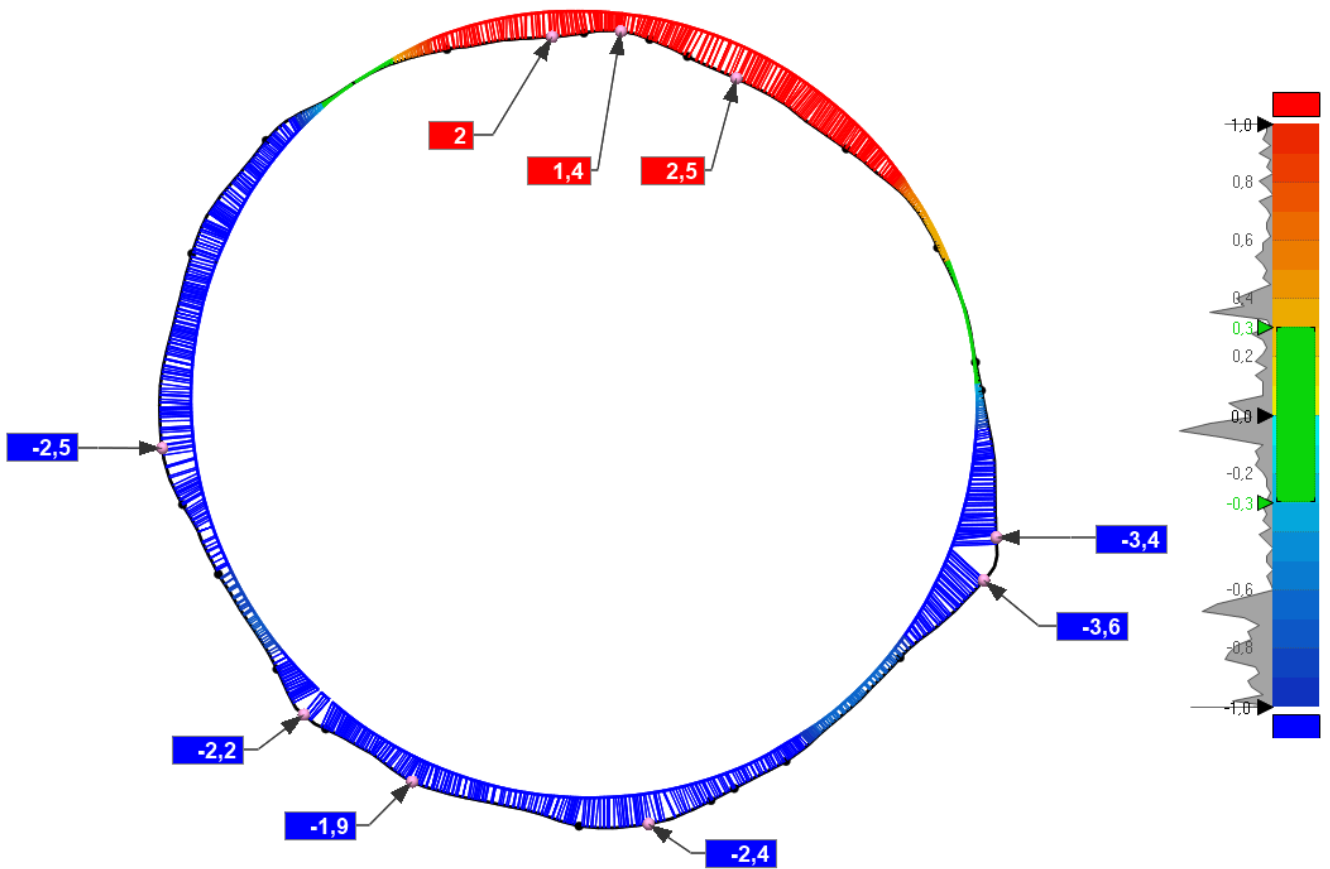
4. ábra: IPA modellek összehasonlítása, 76 mm



5. ábra: IPA modellek összehasonlítása, 86 mm

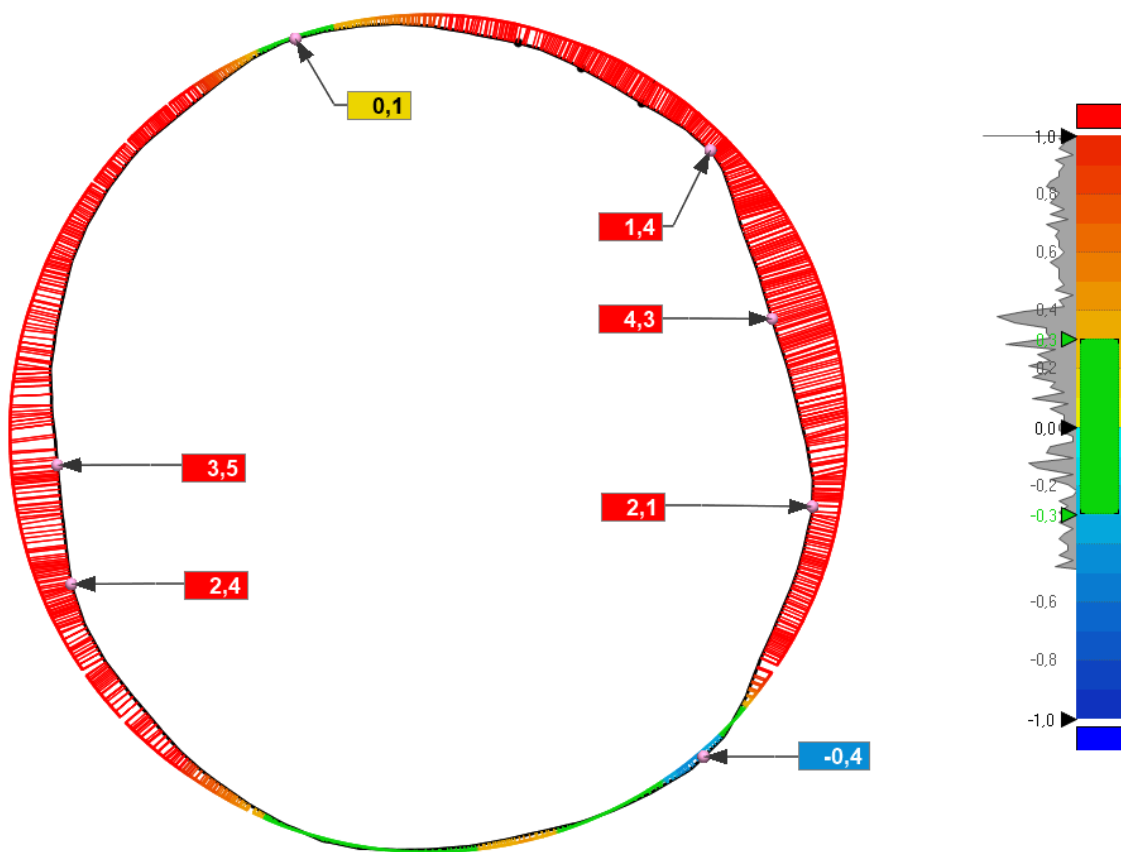


6. ábra: IPA modellek összehasonlítása, 112 mm

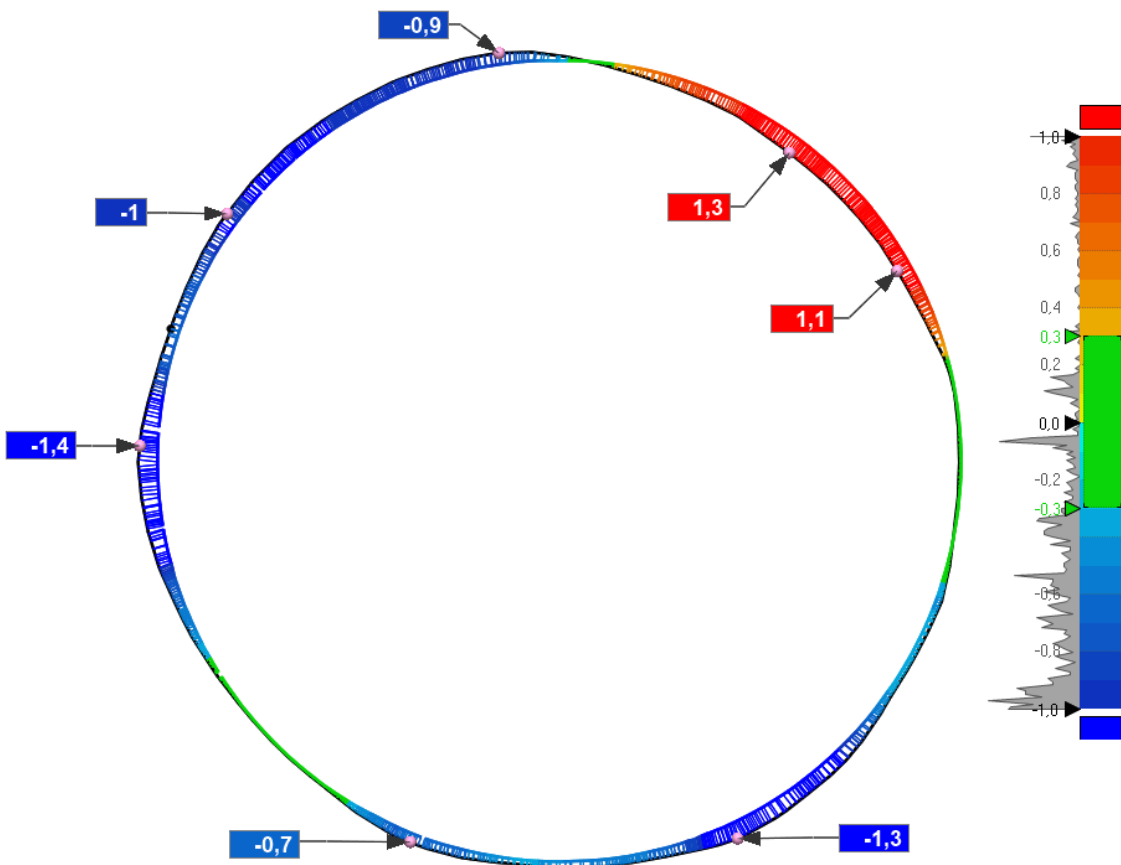


7. ábra: IPA modellek összehasonlítása, 137 mm – felső karima

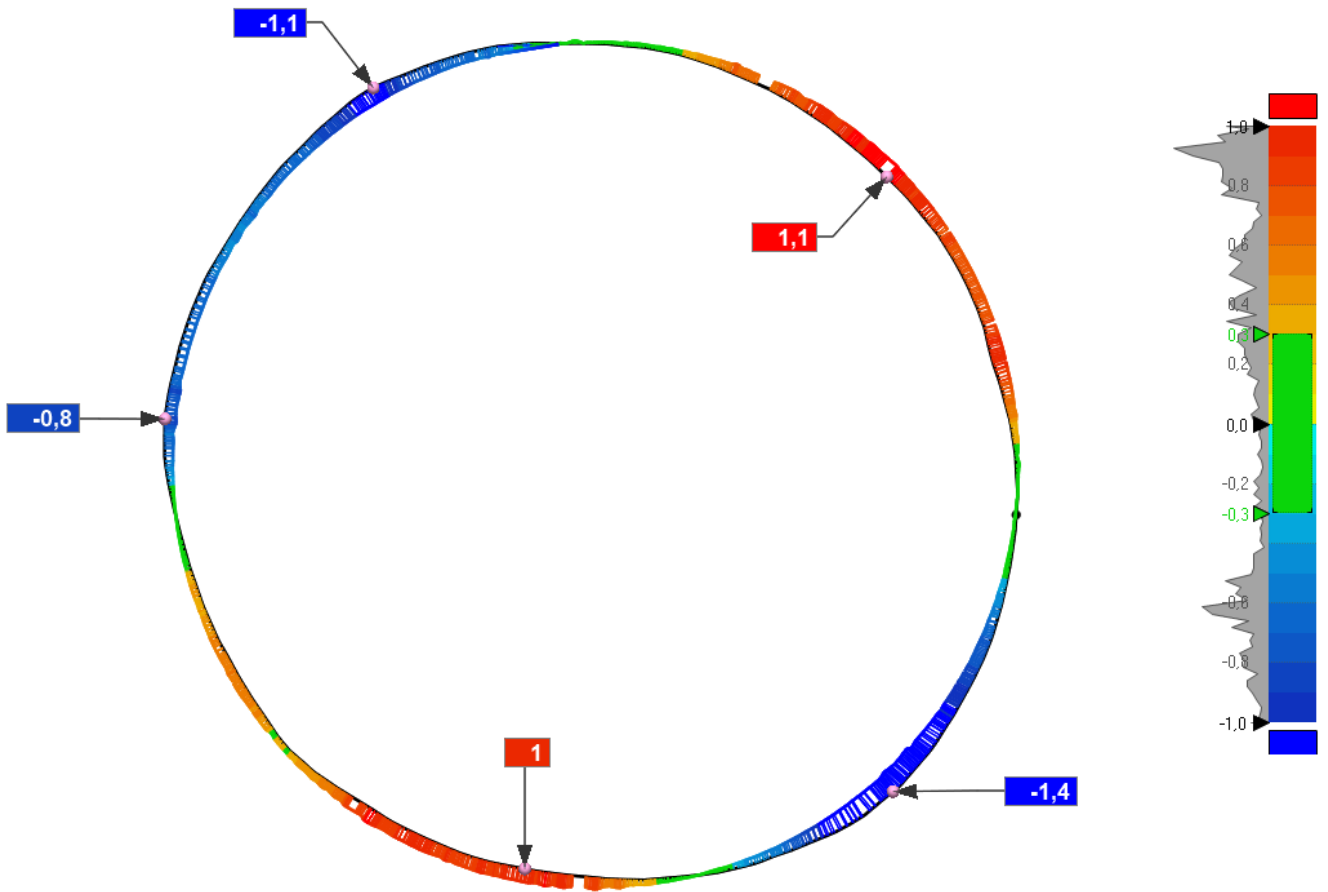
Kozel modelljeinek összehasonlítása:



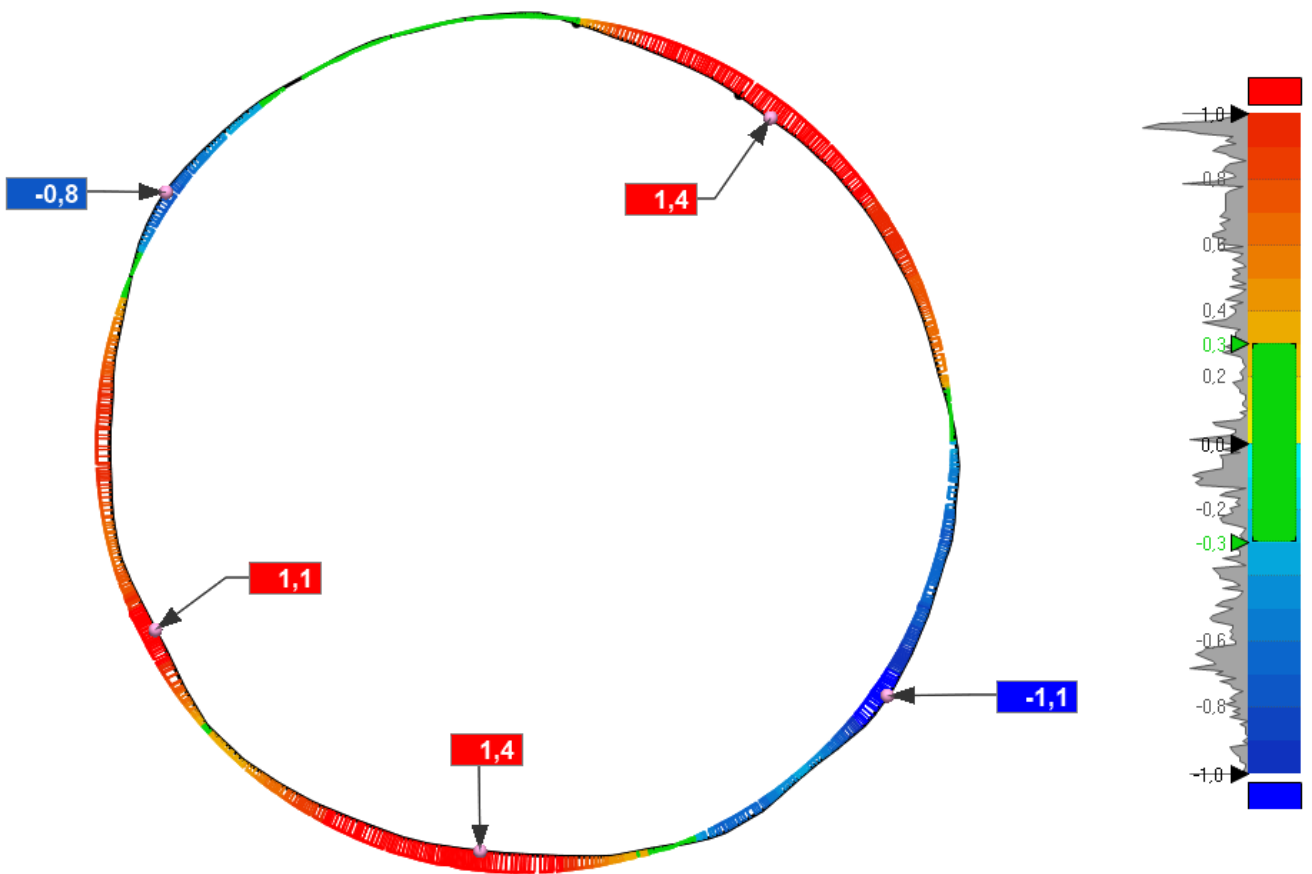
8. ábra: Kozel modellek összehasonlítása, 5 mm – alsó karima



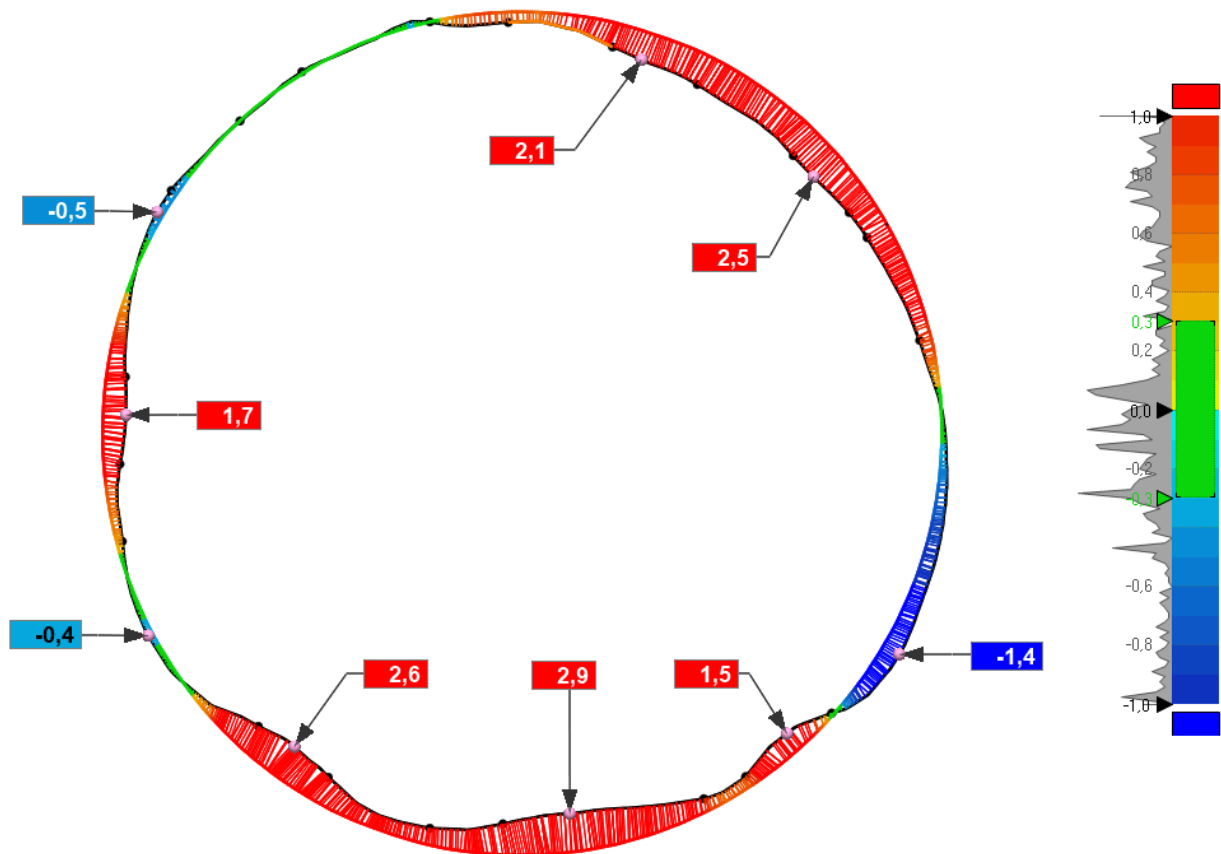
9. ábra: Kozel modellek összehasonlítása, 37 mm



10. ábra: Kozel modellek összehasonlítása, 80 mm

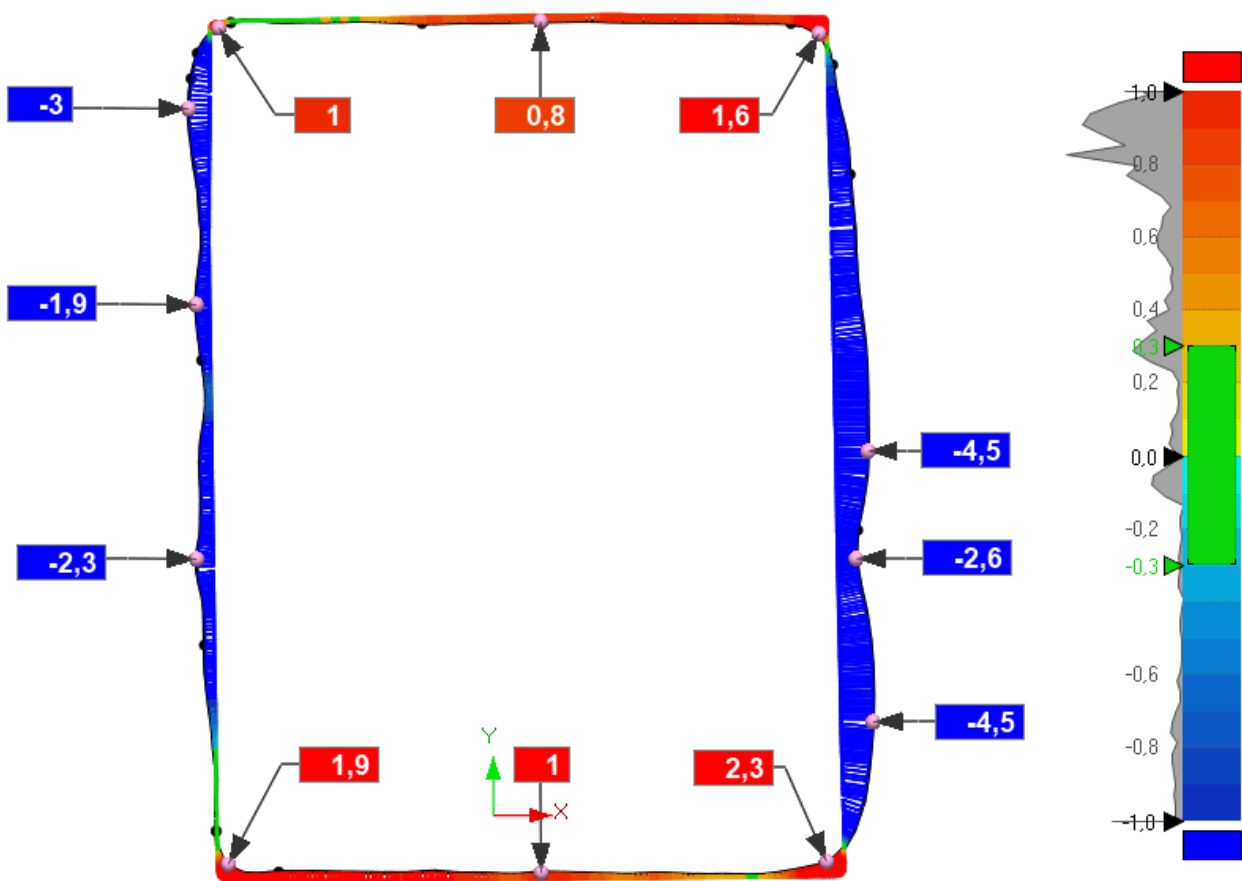


11. ábra: Kozel modellek összehasonlítása, 112 mm

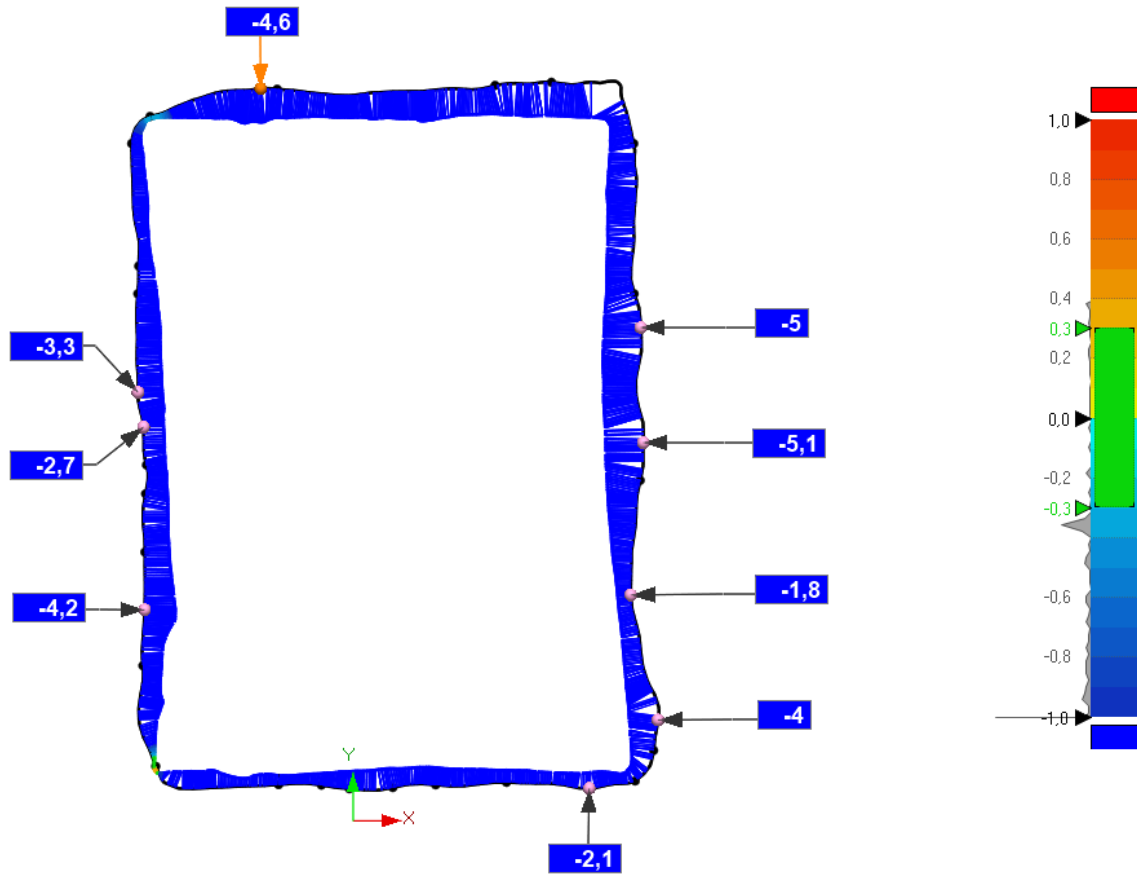


12. ábra: Kozel modellek összehasonlítása, 139 mm – felső karima

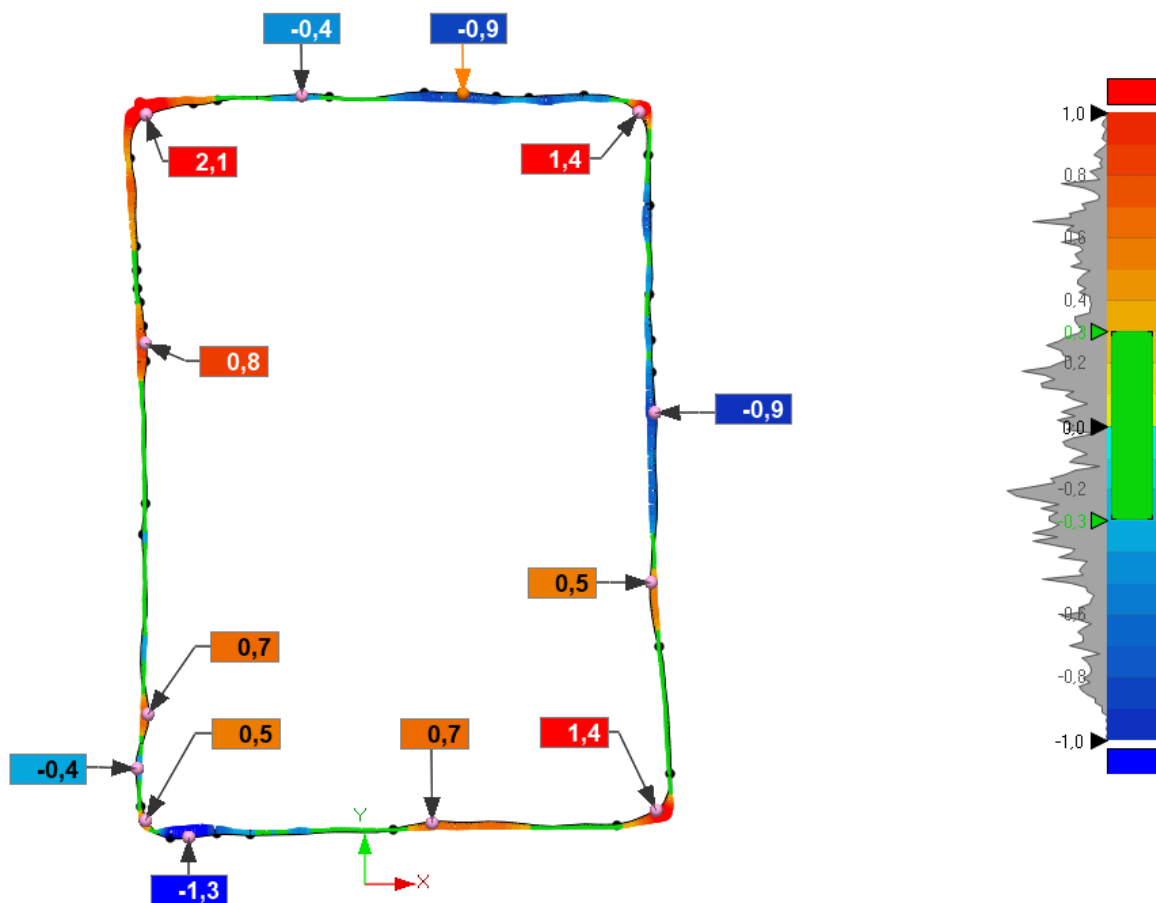
Maja dombormű modelljeinek összehasonlítása:



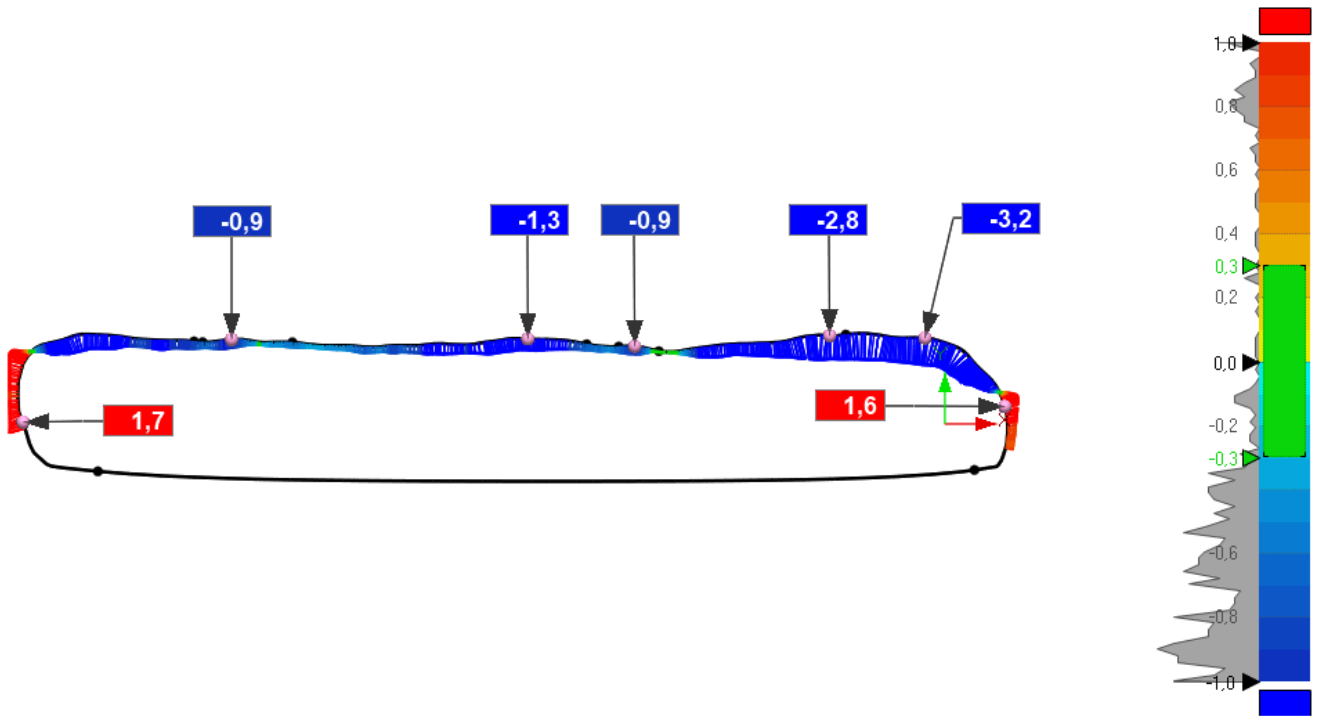
13. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Y tengely, 1 mm



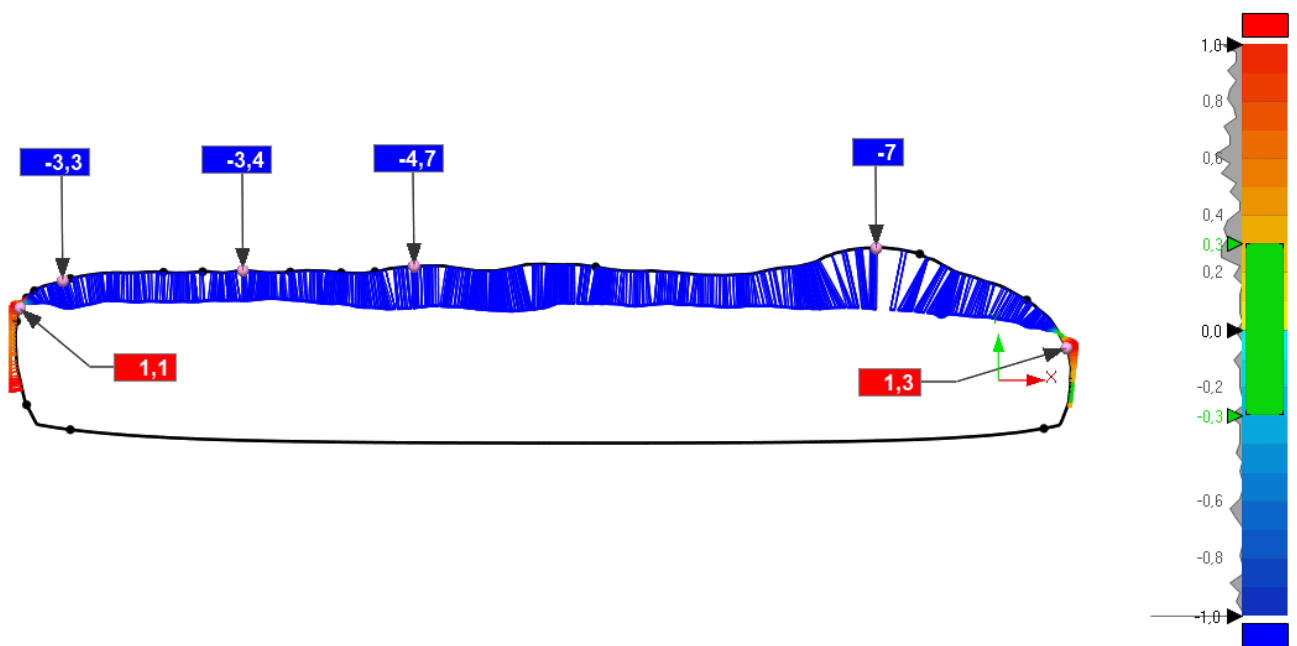
14. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Y tengely, 13 mm



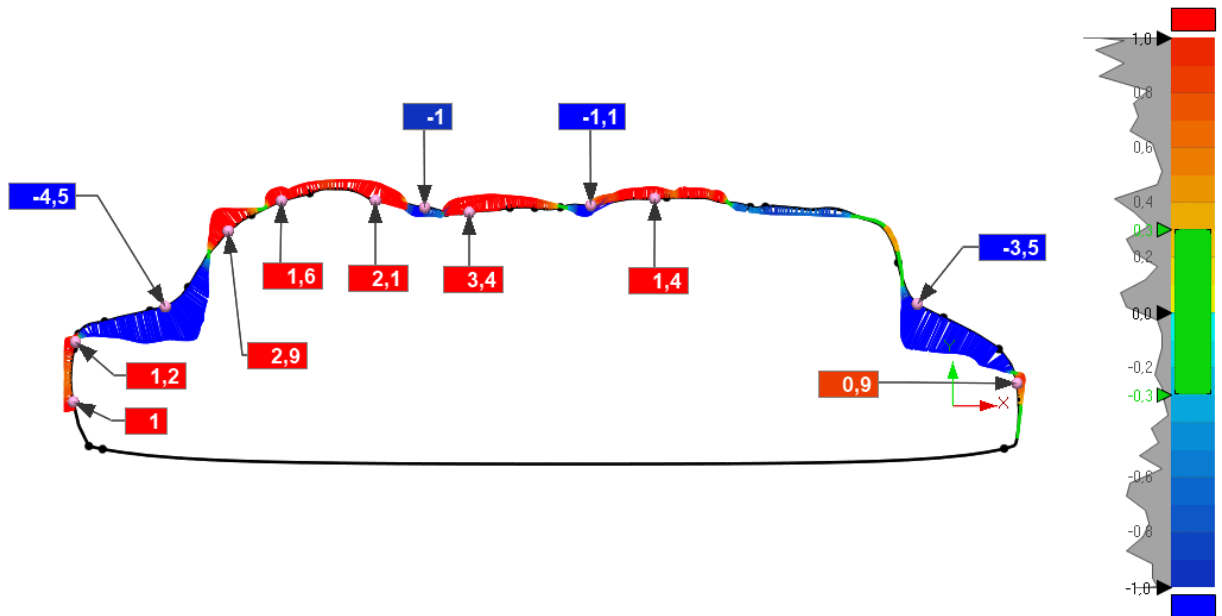
15. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Y tengely, 19 mm



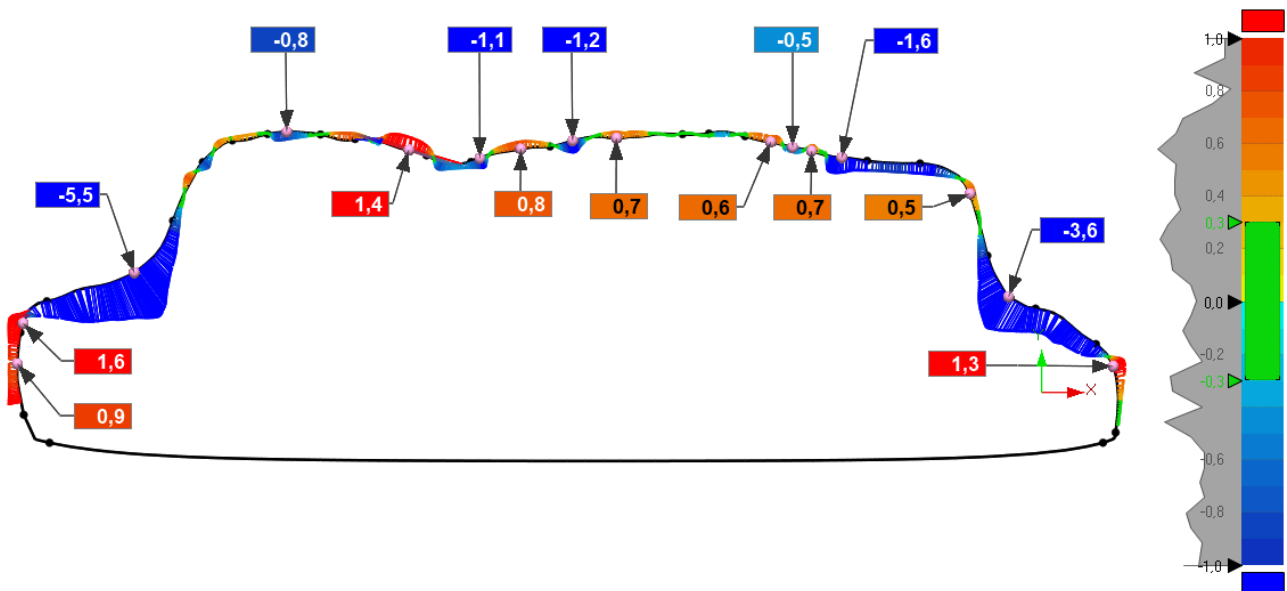
16. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, X tengely, A oldal, 44 mm



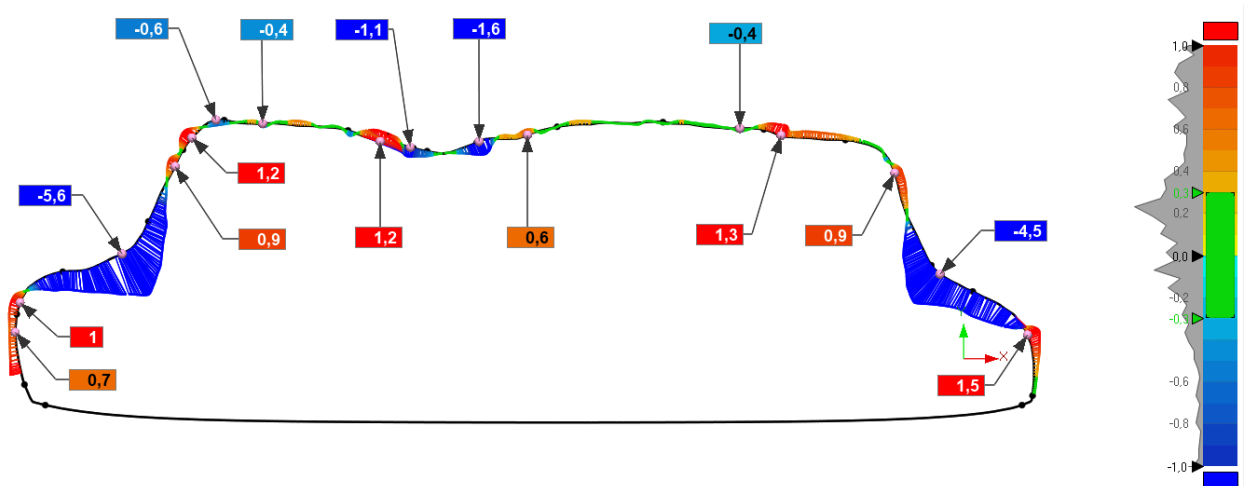
17. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, X tengely, A oldal, 39 mm



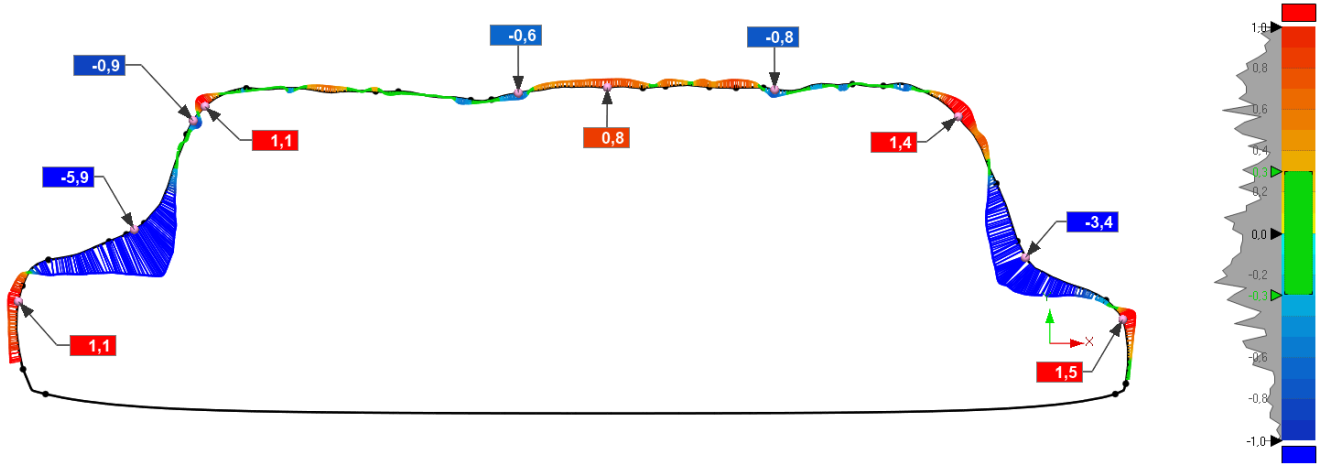
18. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, X tengely, A oldal, 30 mm



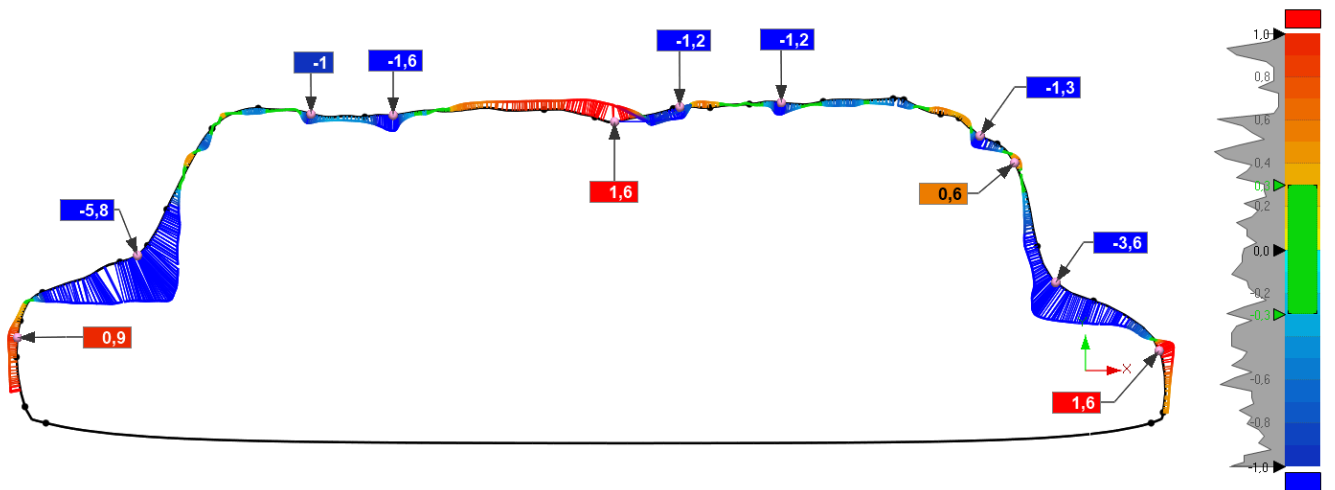
19. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, X tengely, A oldal, 21 mm



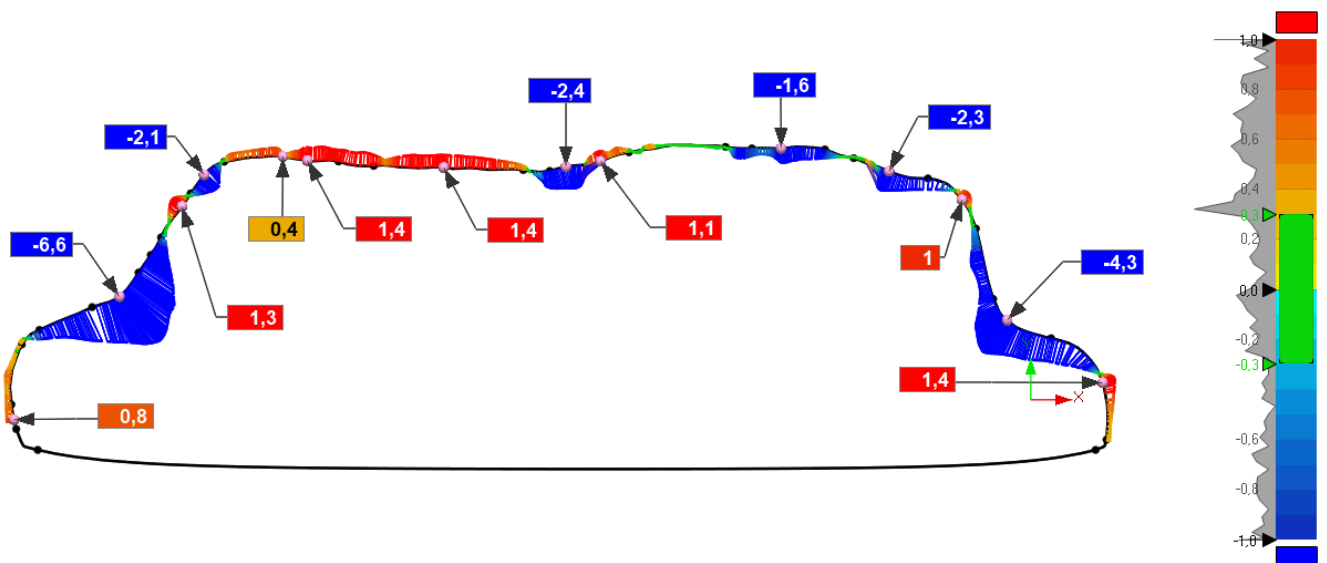
20. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, X tengely, A oldal, 12 mm



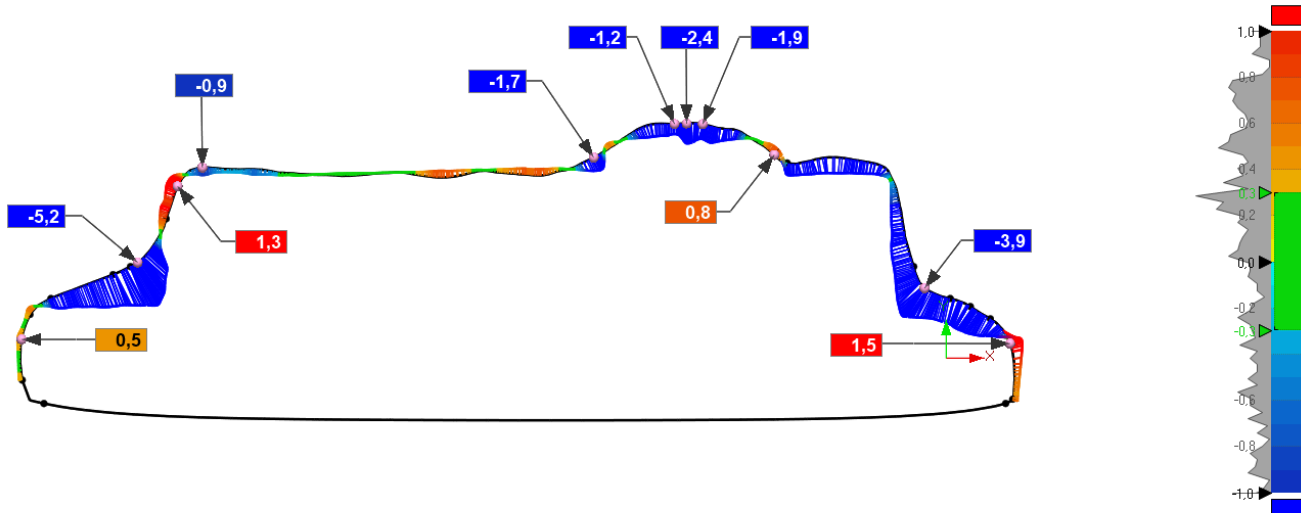
21. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, X tengely, A oldal, 3 mm



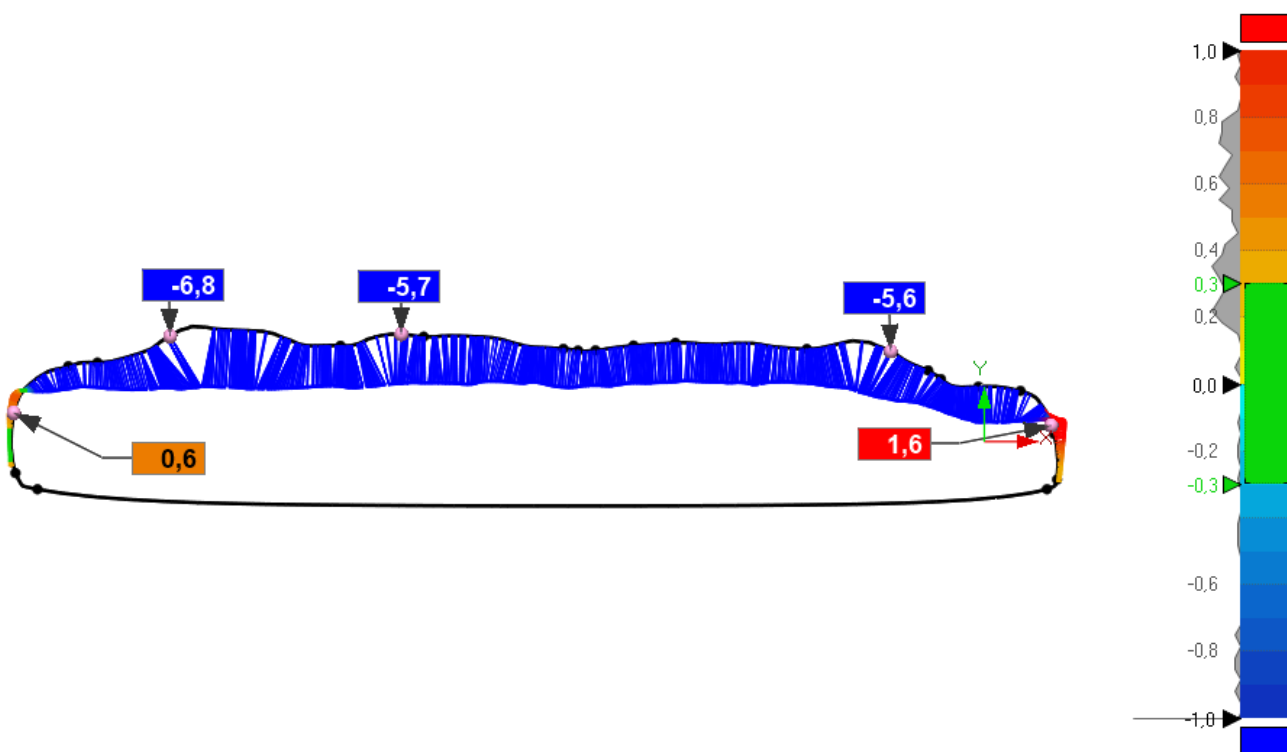
22. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, X tengely, B oldal, 6 mm



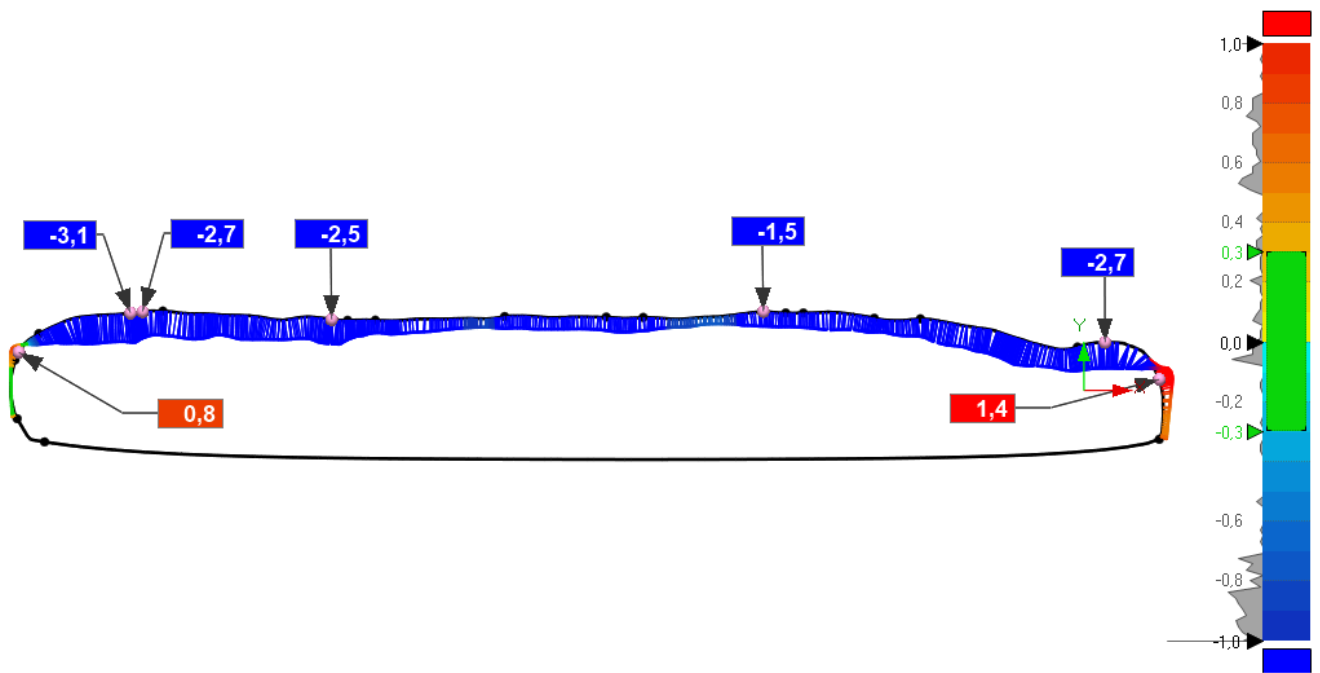
23. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, X tengely, B oldal, 15 mm



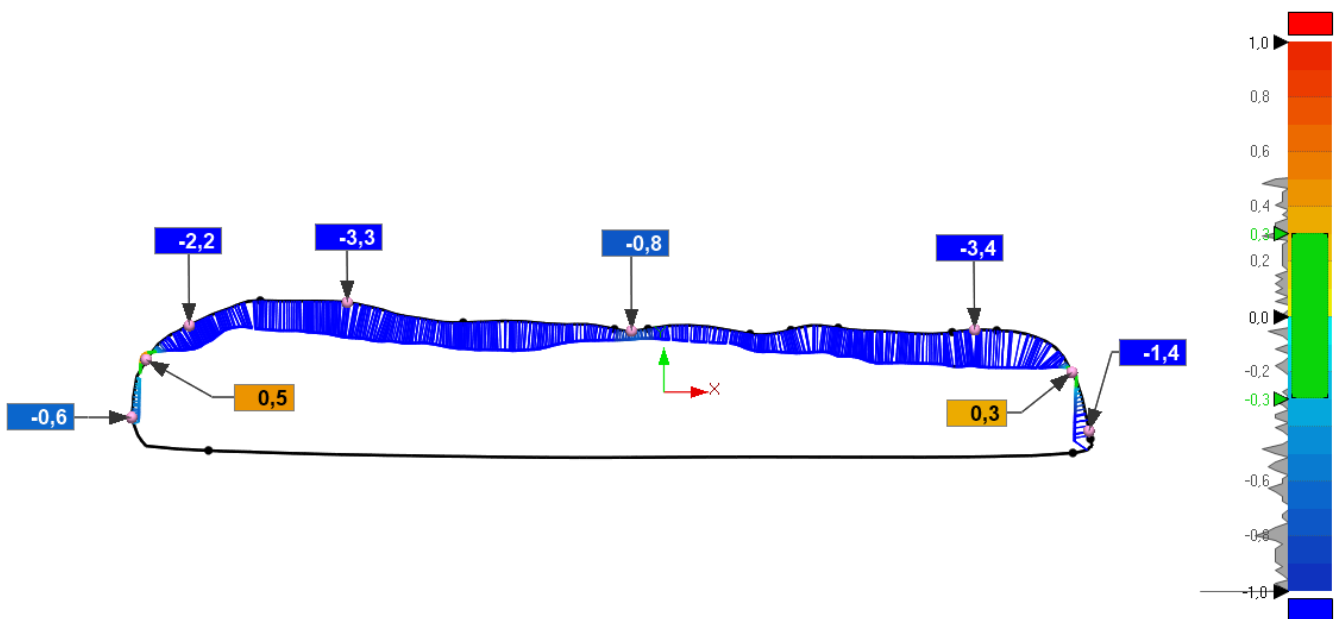
24. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, X tengely, B oldal, 24 mm



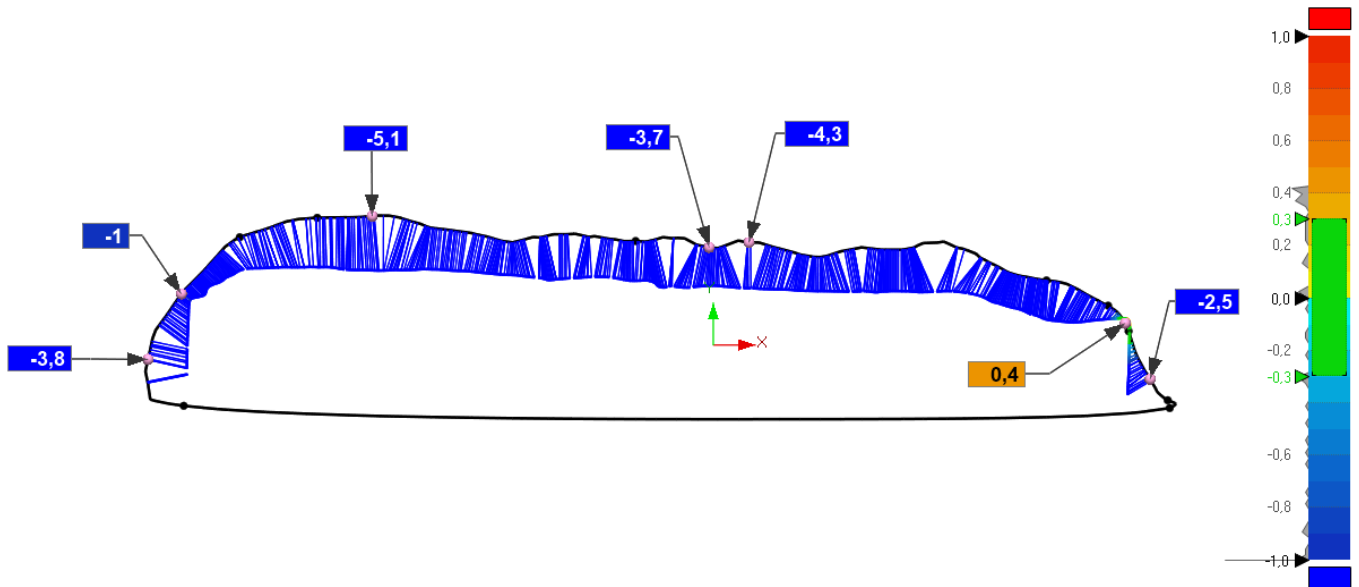
25. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, X tengely, B oldal, 30 mm



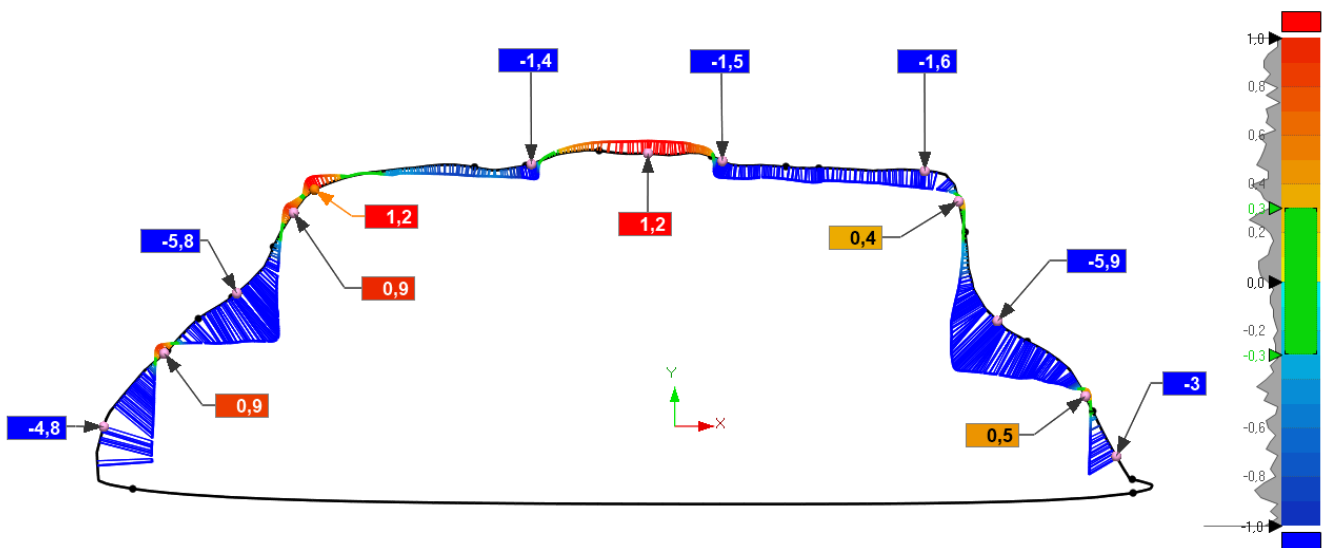
26. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, X tengely, B oldal, 36 mm



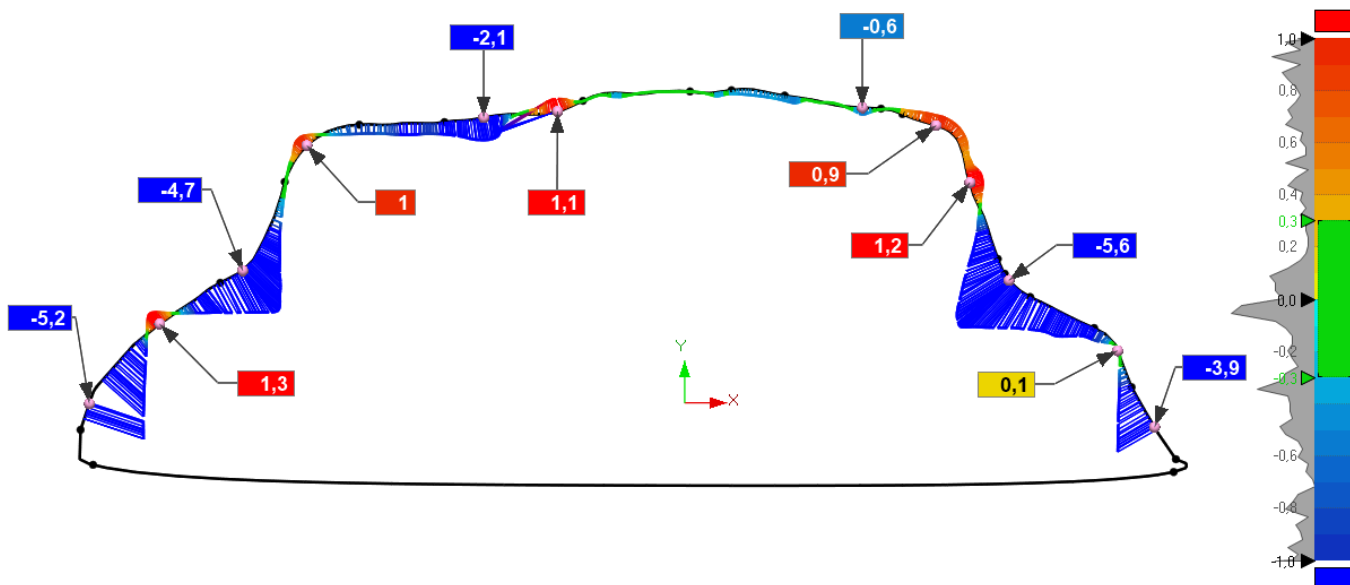
27. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, -4 mm



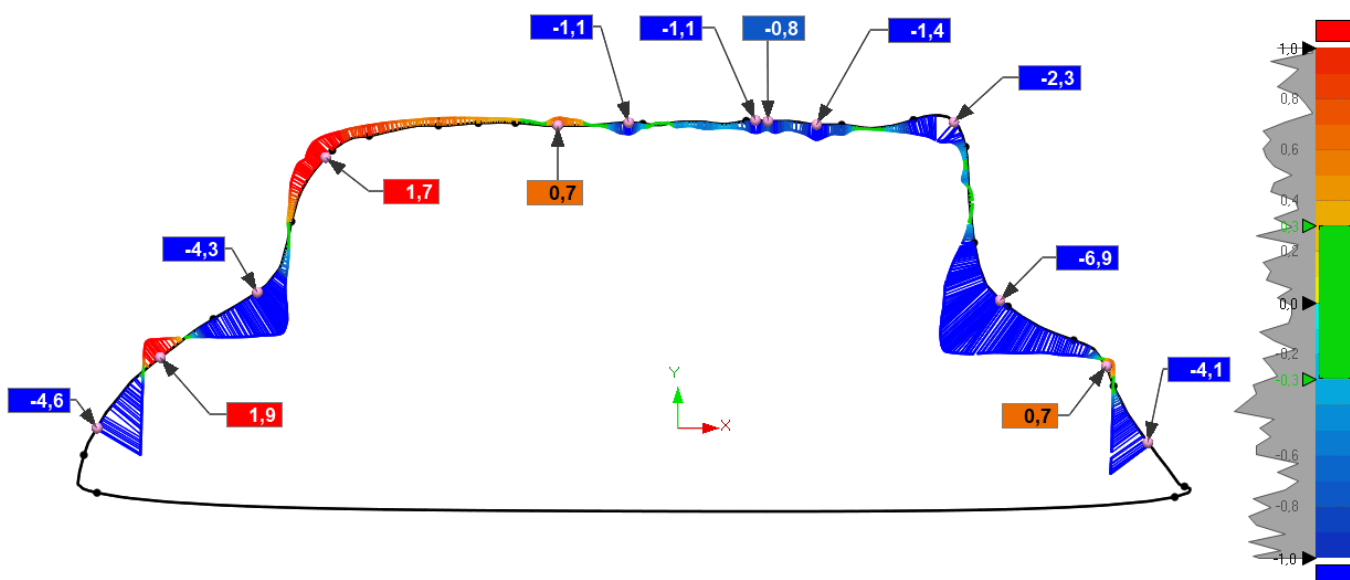
28. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 3 mm



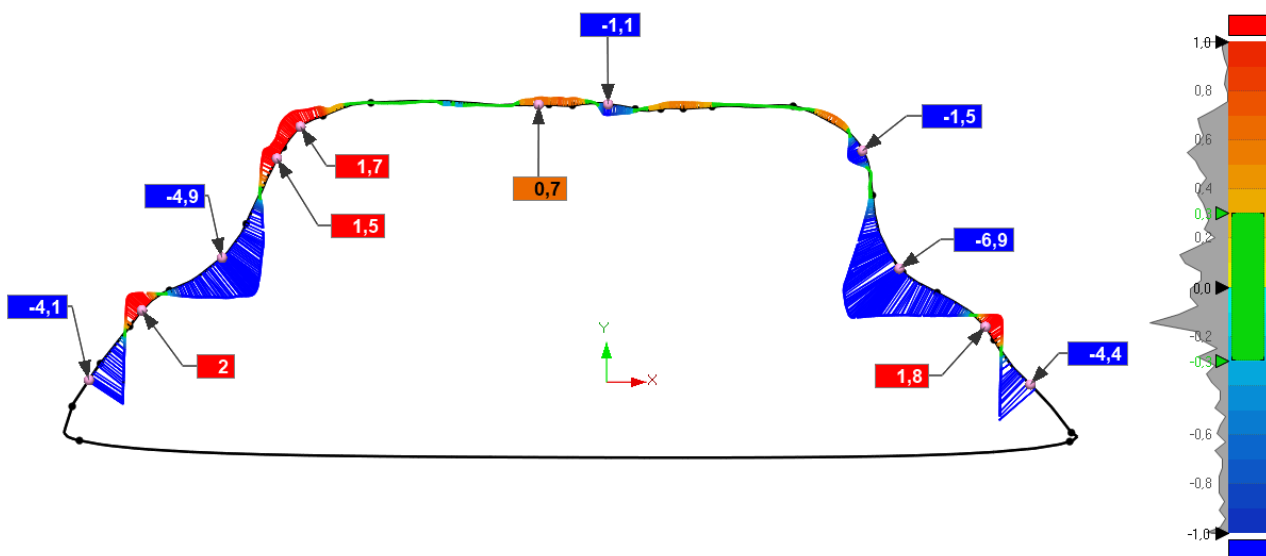
29. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 11 mm



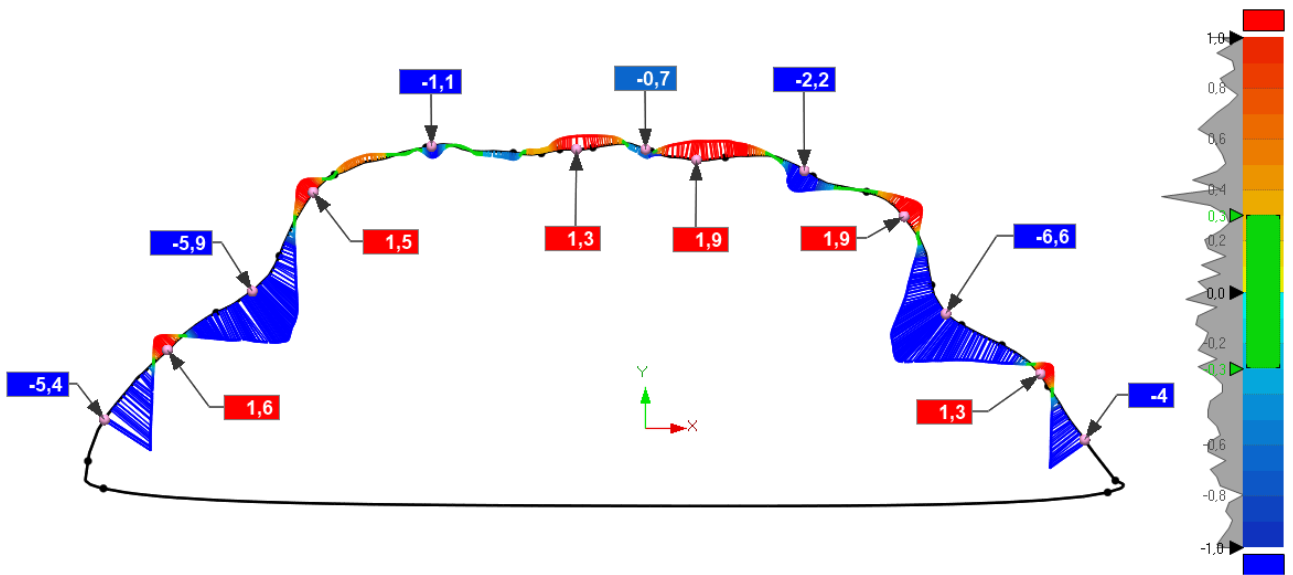
30. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 21 mm



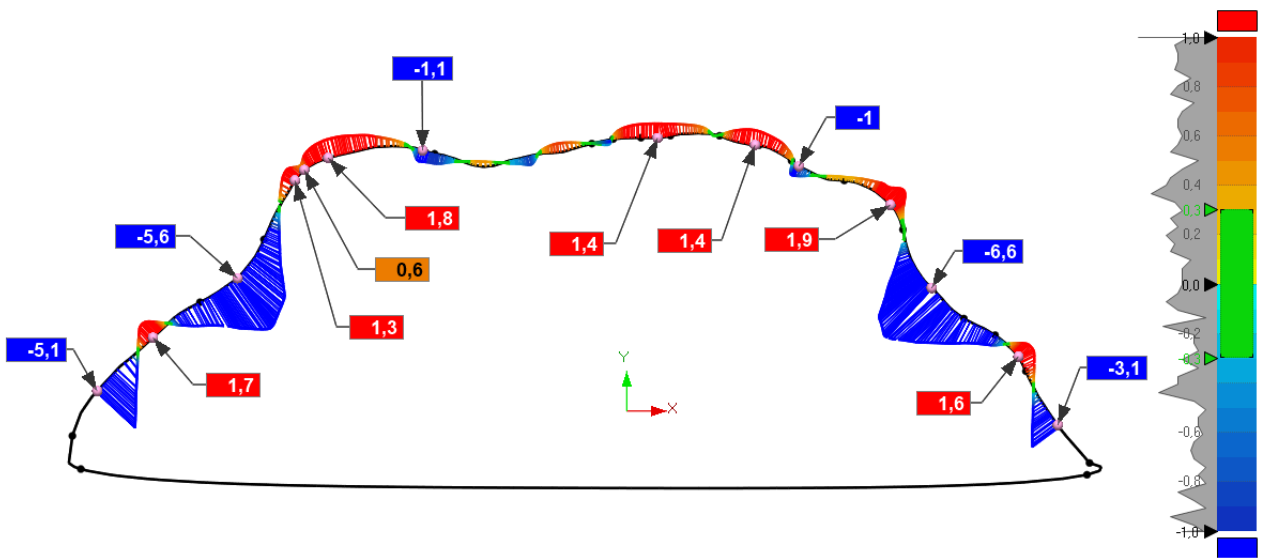
31. ábra Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 31 mm



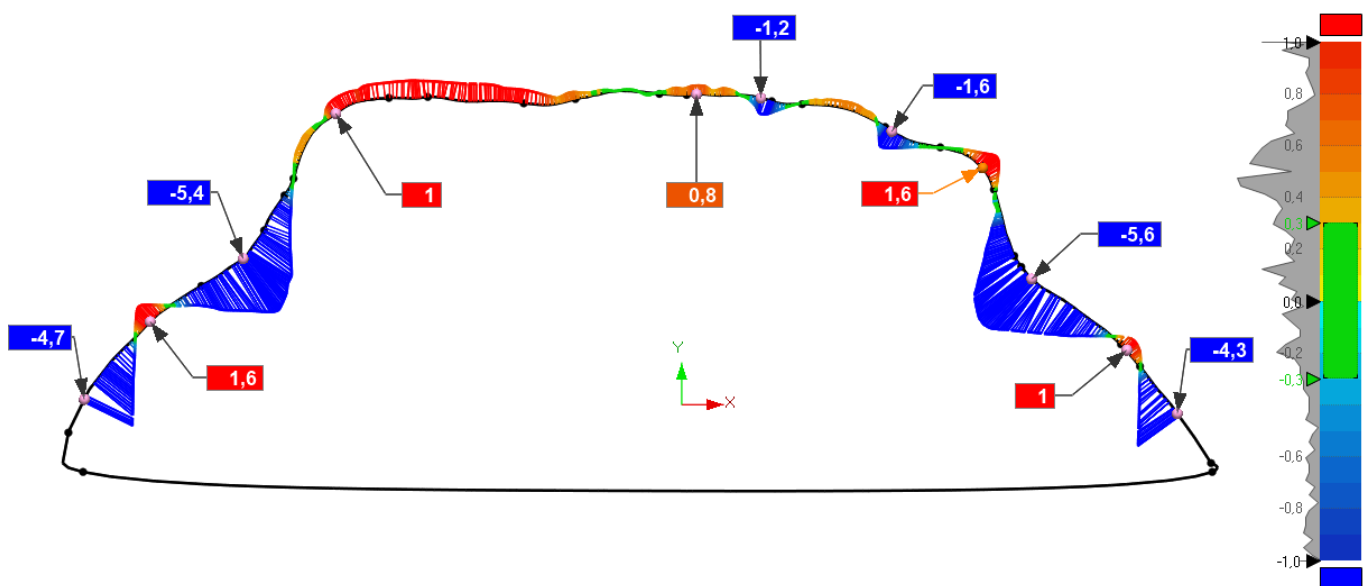
32. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 41 mm



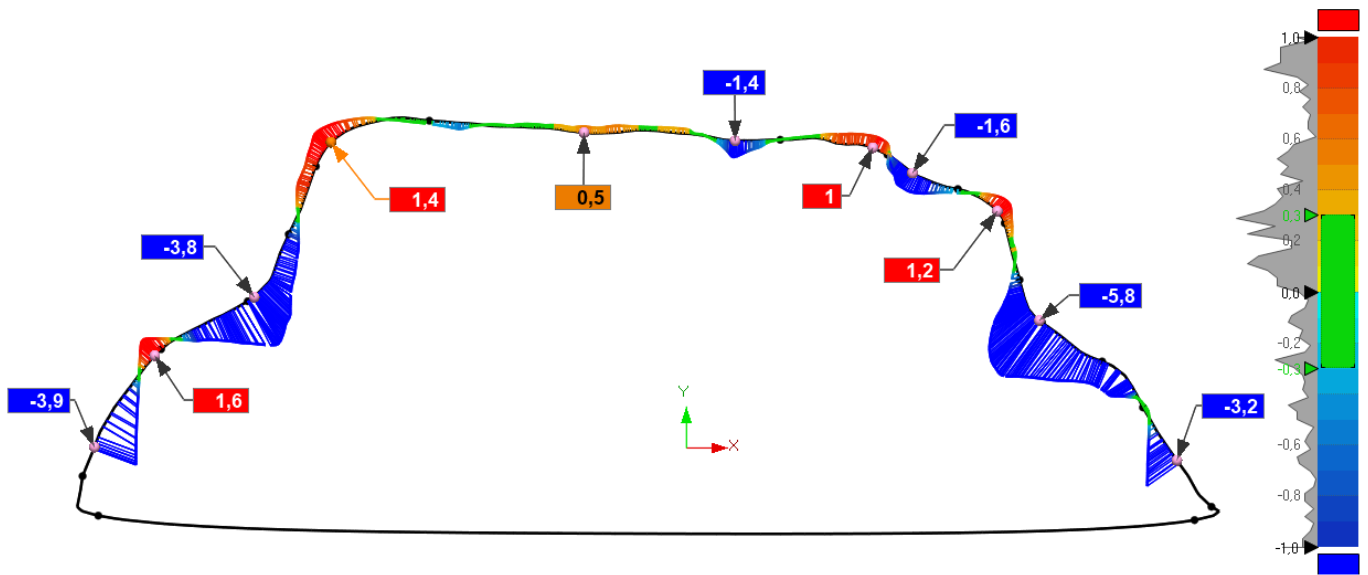
33. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 51 mm



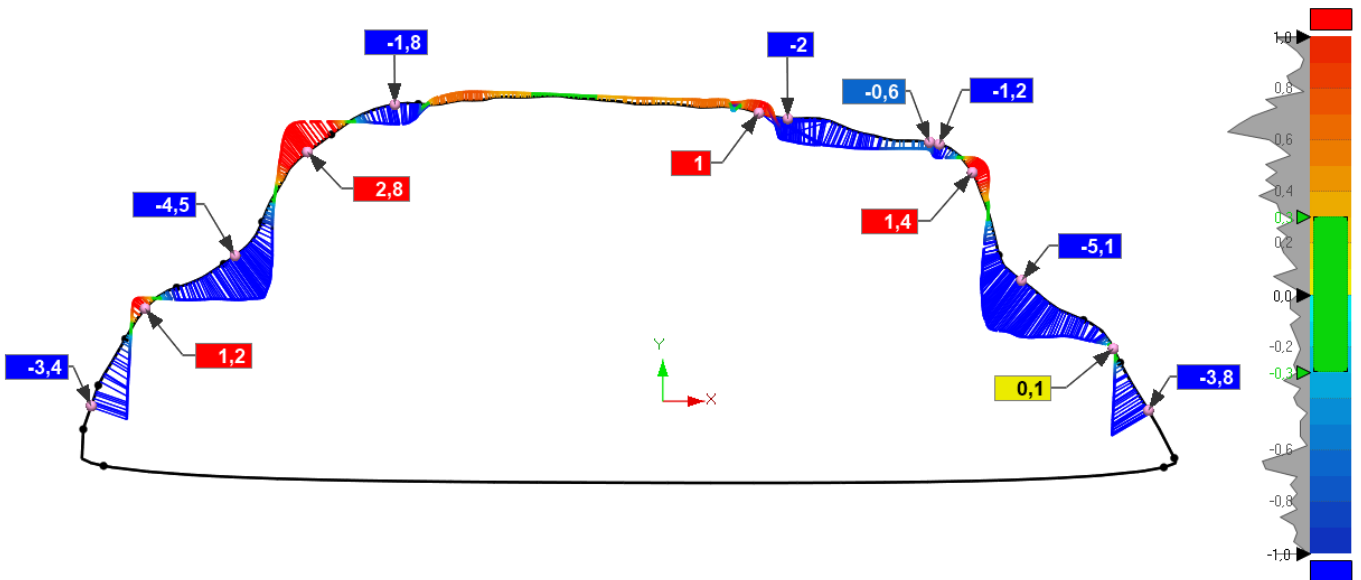
34. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 61 mm



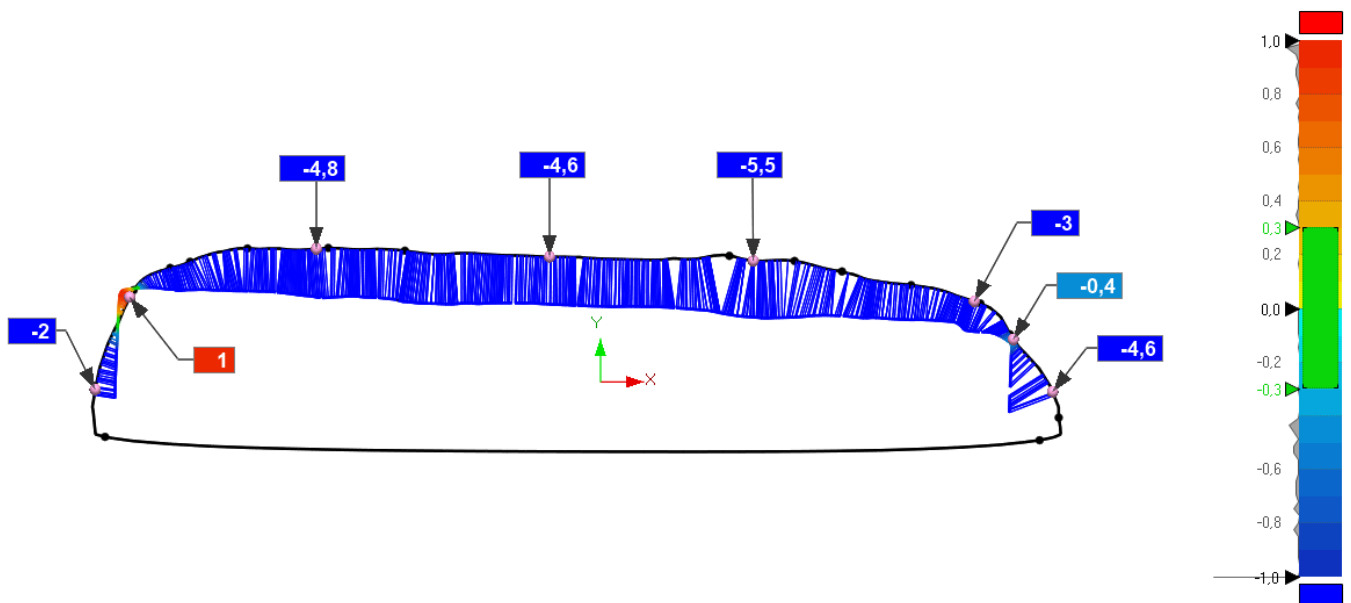
35. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 71 mm



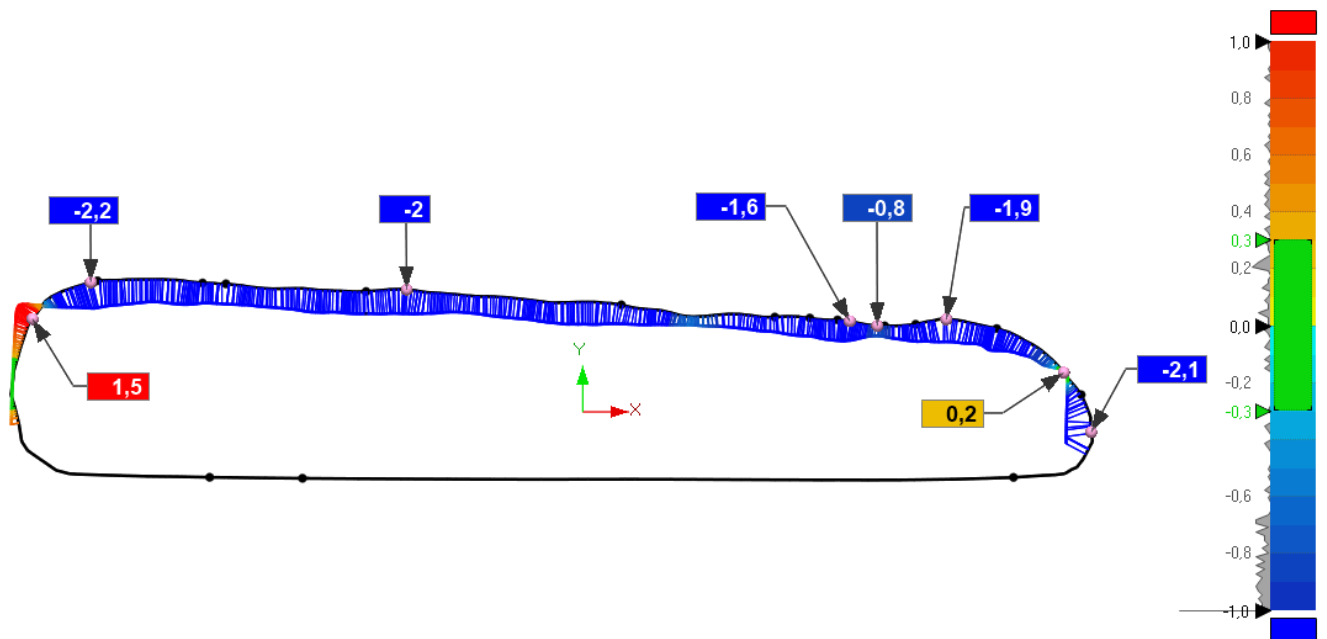
36. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 81 mm



37. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 91 mm

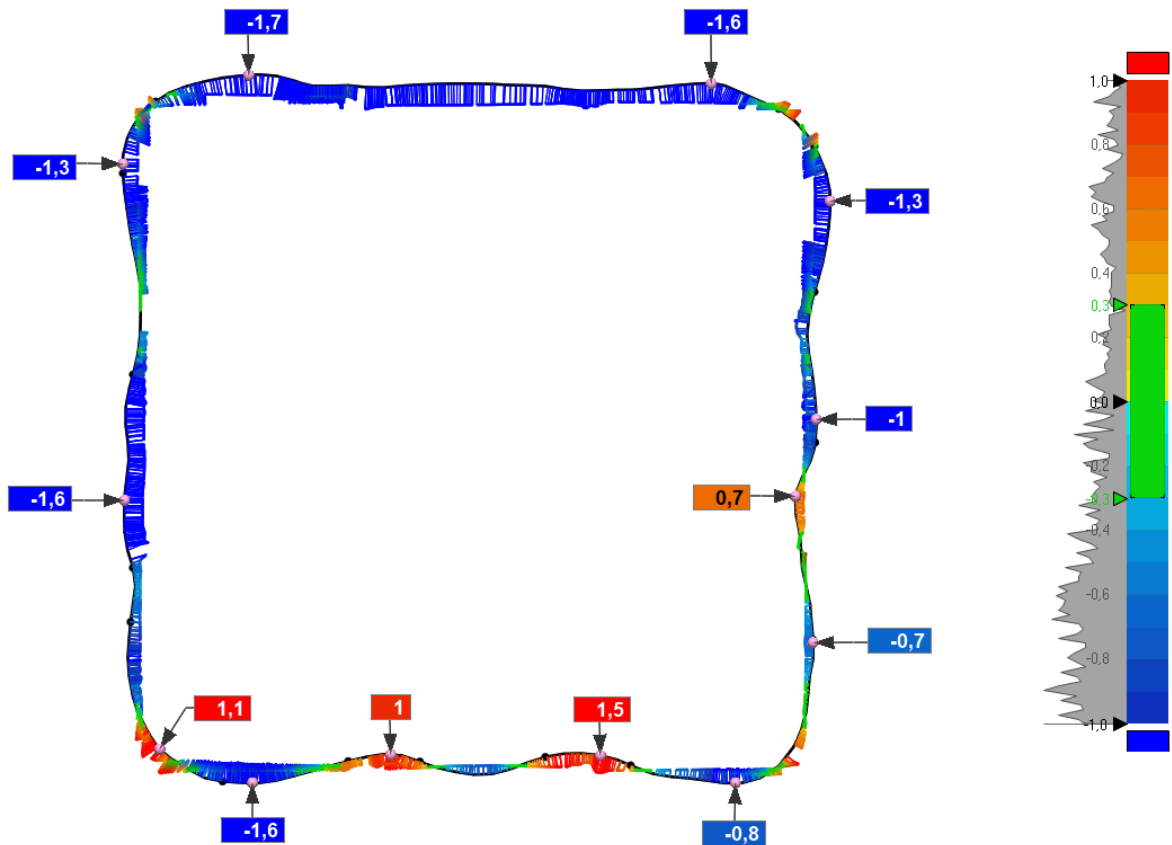


38. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 100 mm

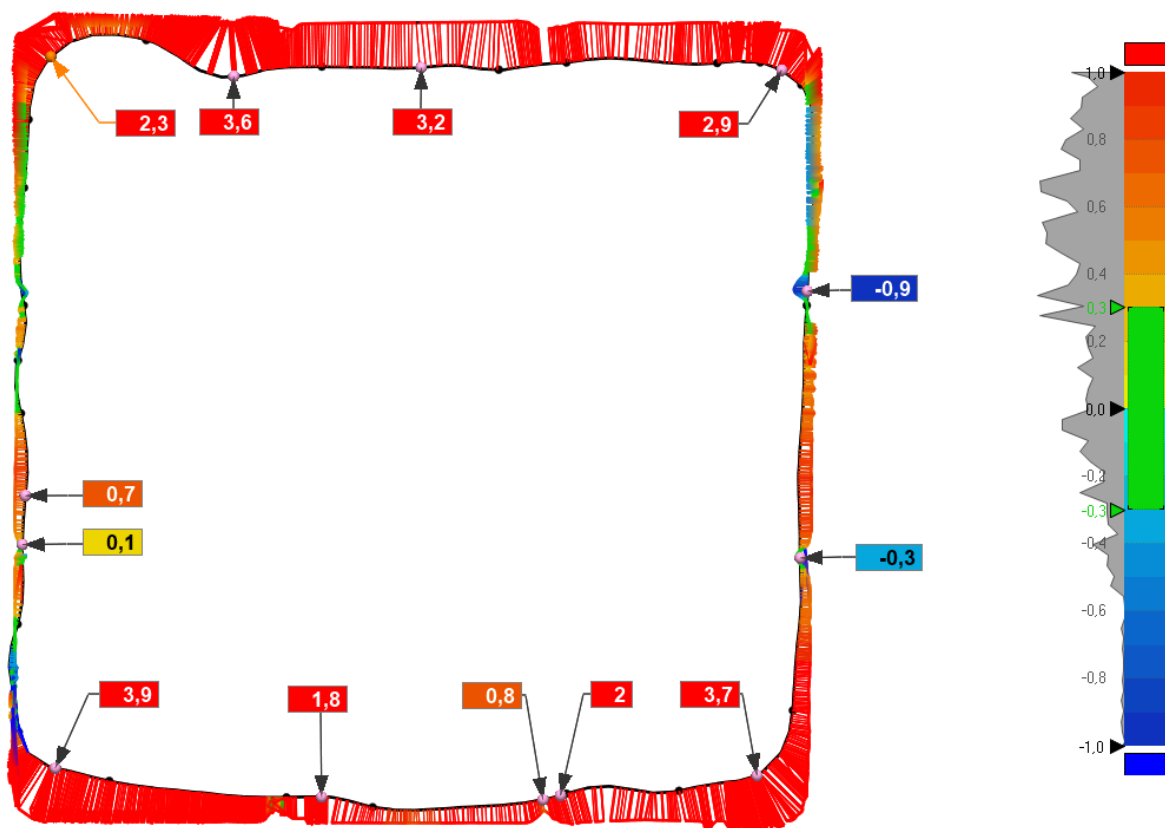


39. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 109 mm

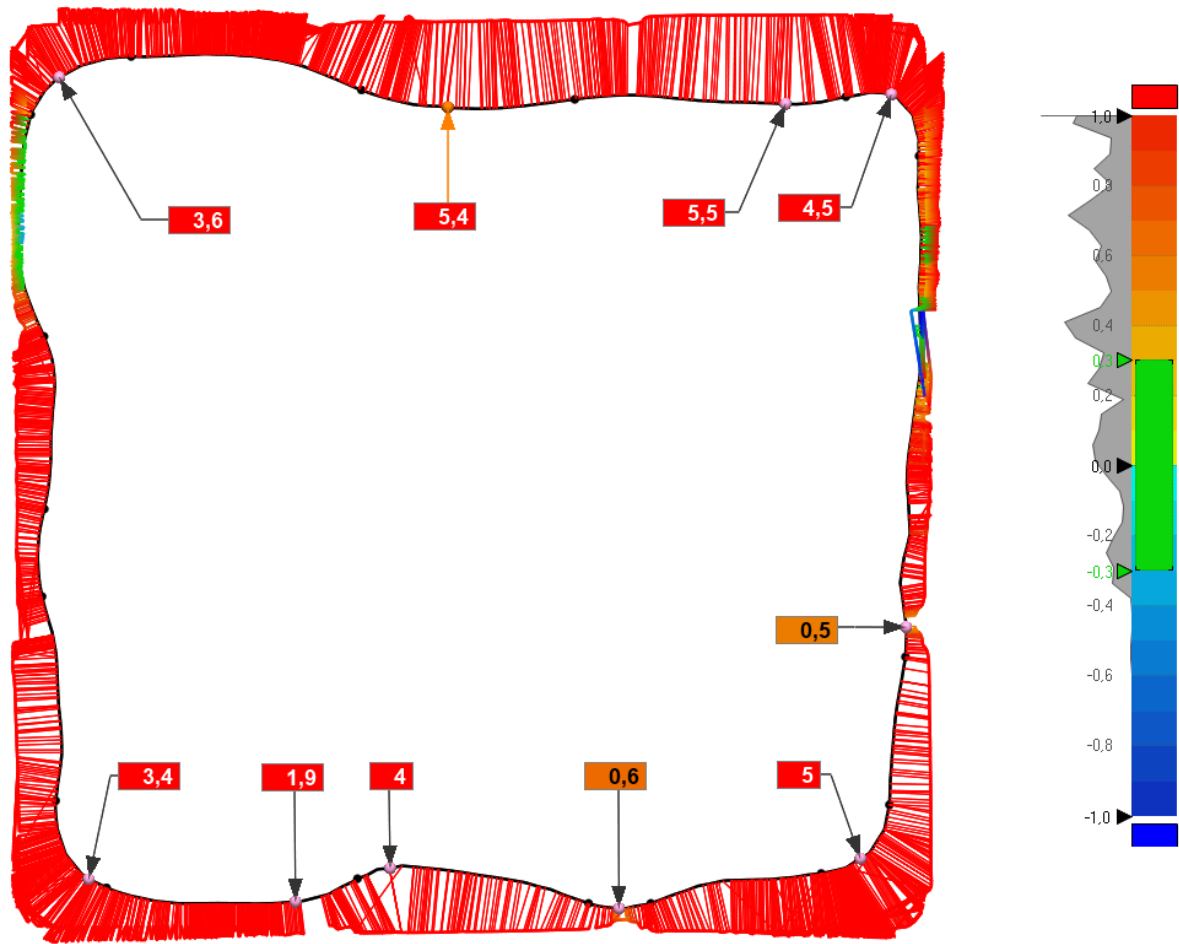
Rubik-kocka modelljeinek összehasonlítása:



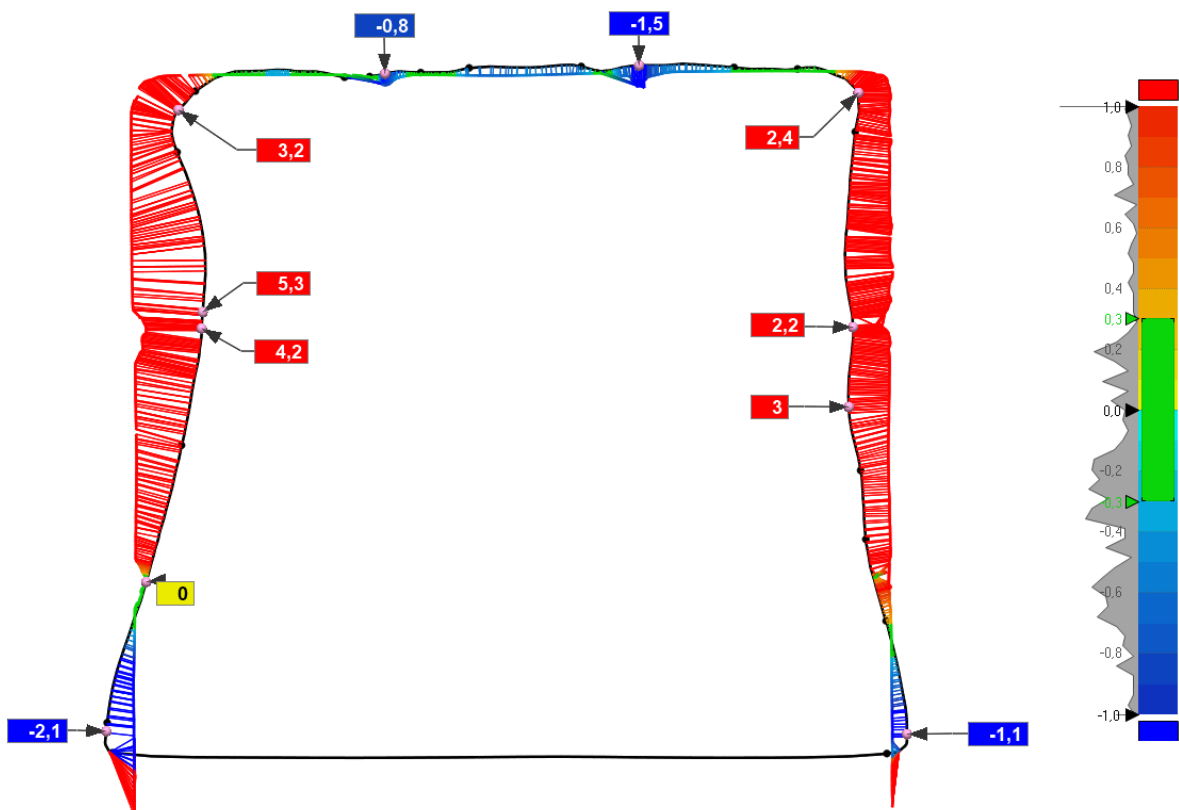
40. ábra: Rubik-kocka modellek összehasonlítása, Y tengely, 0 mm



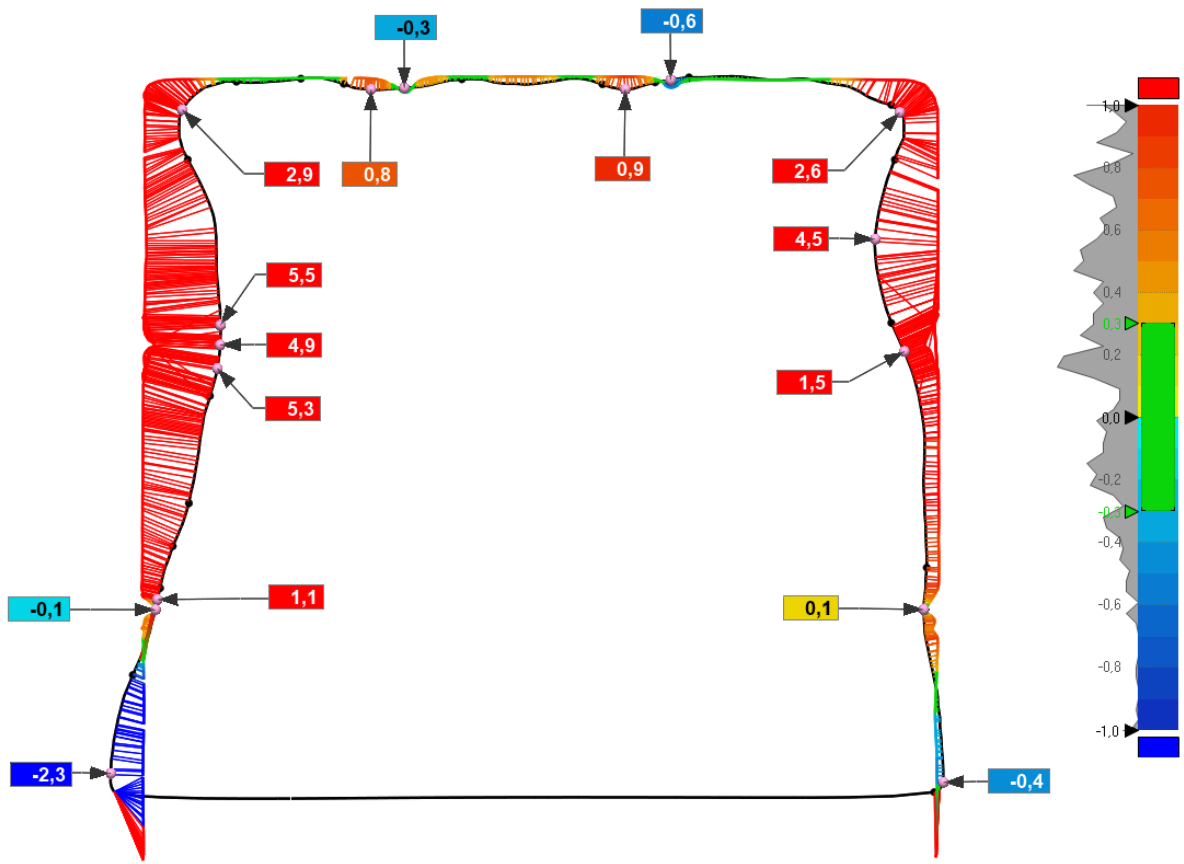
41. ábra: Rubik-kocka modellek összehasonlítása, Y tengely, 15 mm



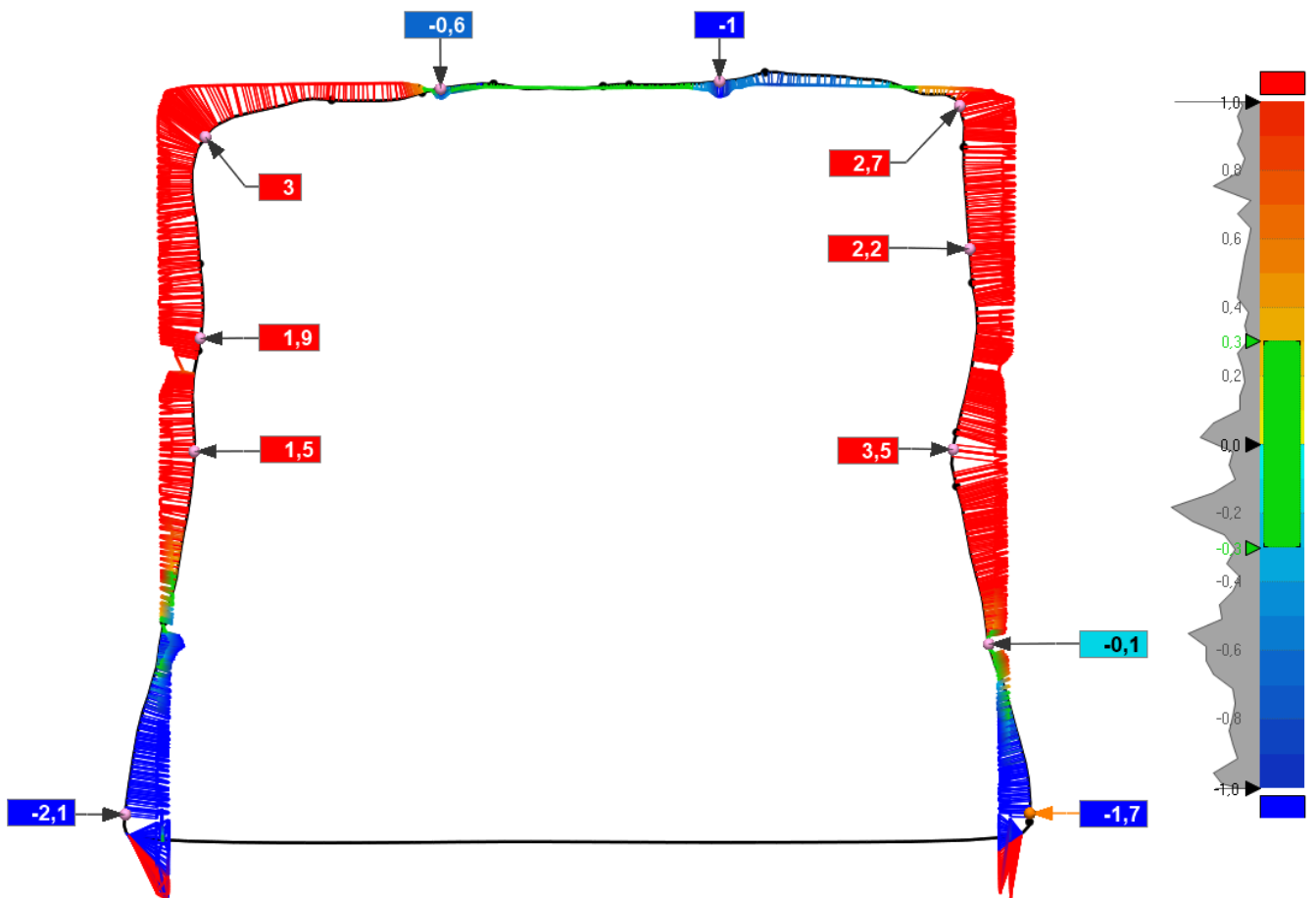
42. ábra: Rubik-kocka modellek összehasonlítása, Y tengely, 30 mm



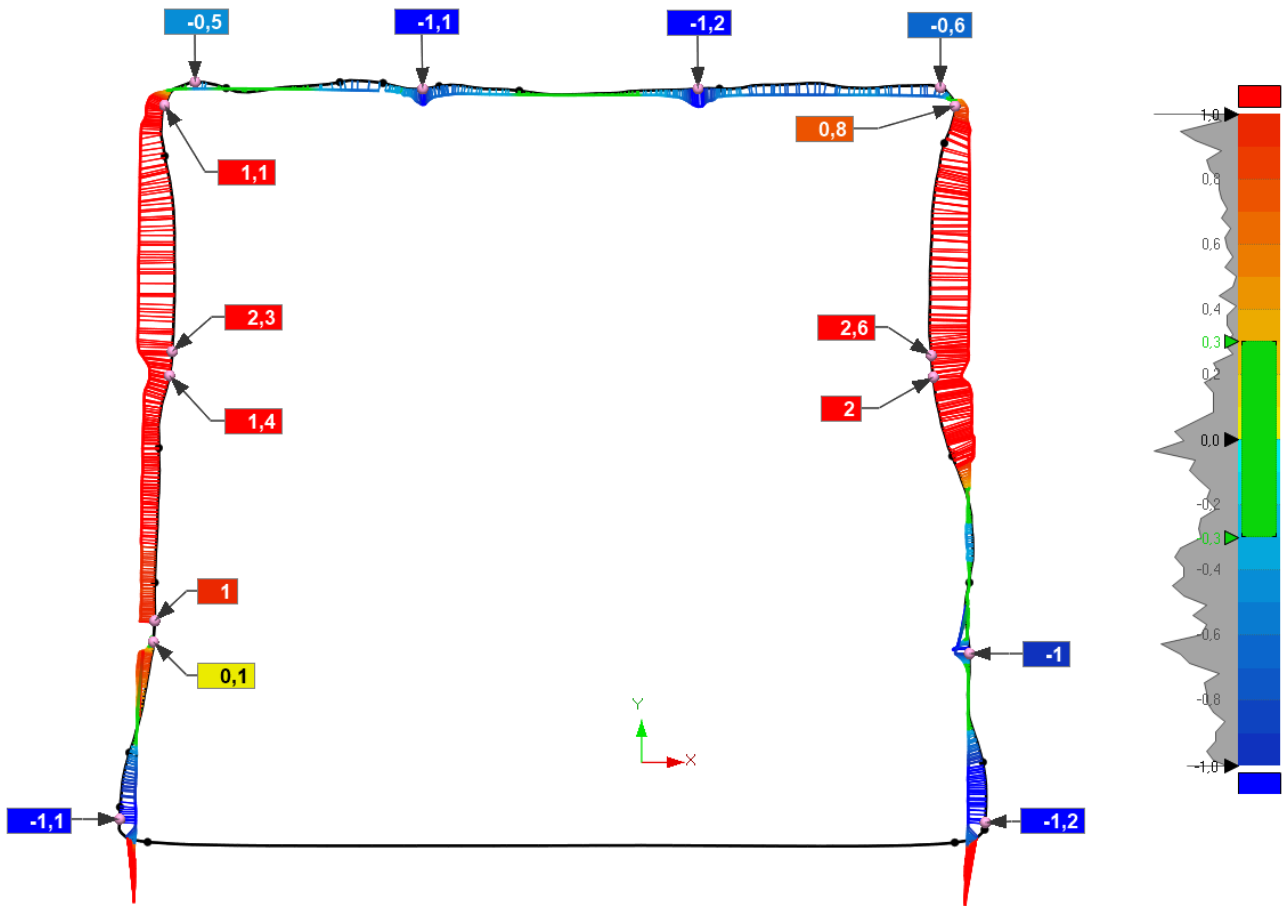
43. ábra: Rubik-kocka modellek összehasonlítása, X tengely, -24 mm



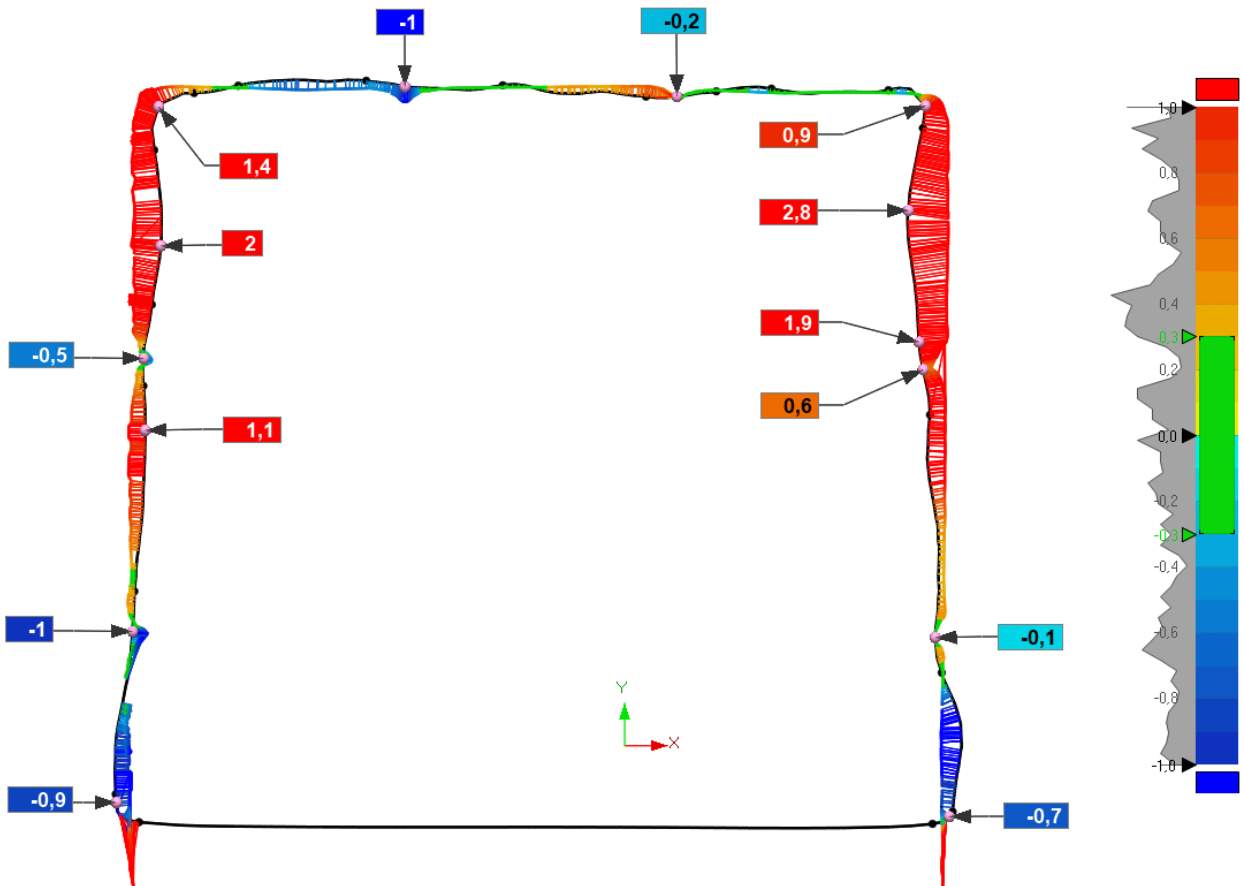
44. ábra: Rubik-kocka modellek összehasonlítása, X tengely, -4 mm



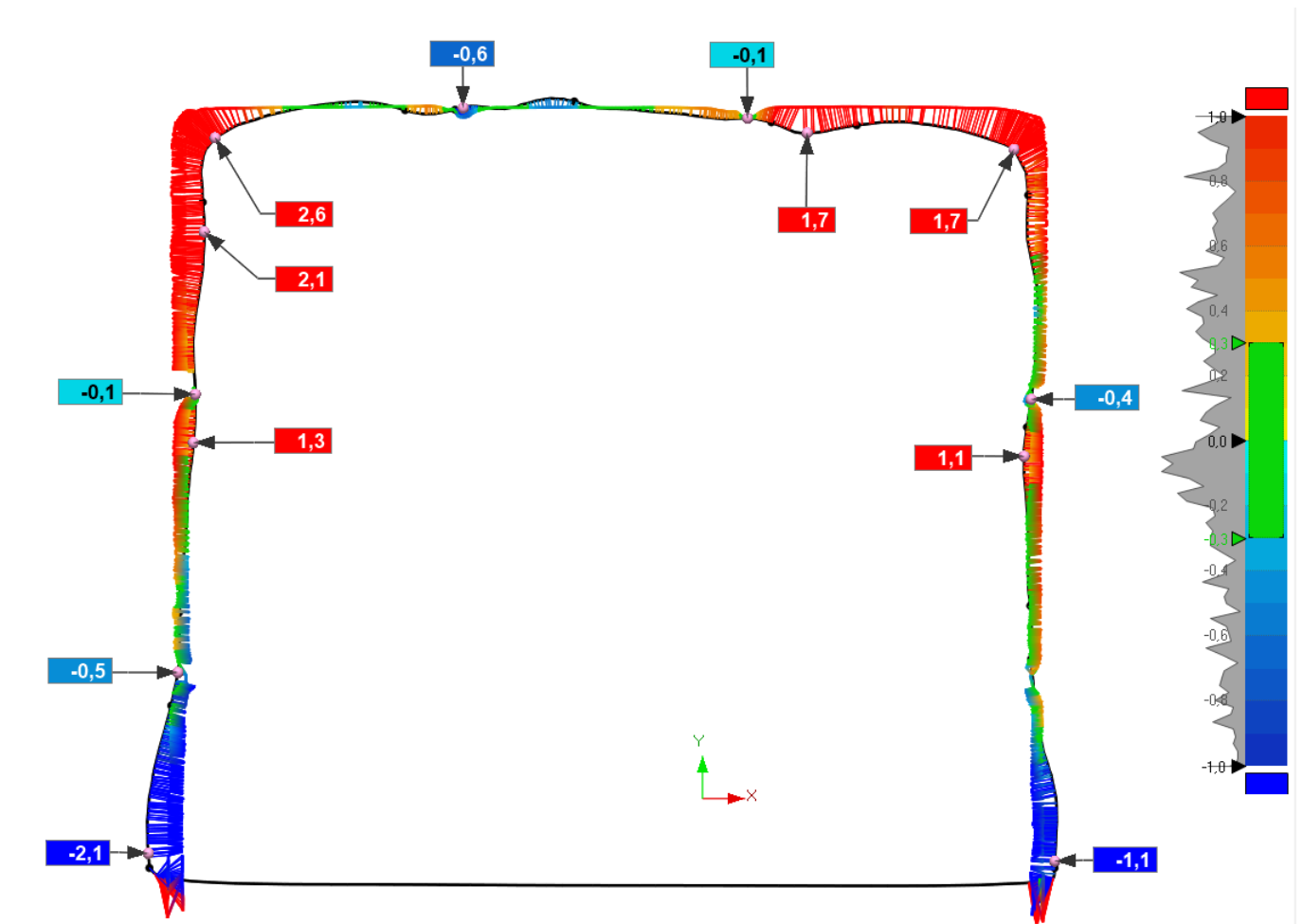
45. ábra: Rubik-kocka modellek összehasonlítása, X tengely, 14 mm



46. ábra: Rubik-kocka modellek összehasonlítása, Z tengely, 35 mm



47. ábra: Rubik-kocka modellek összehasonlítása, Z tengely, 53 mm



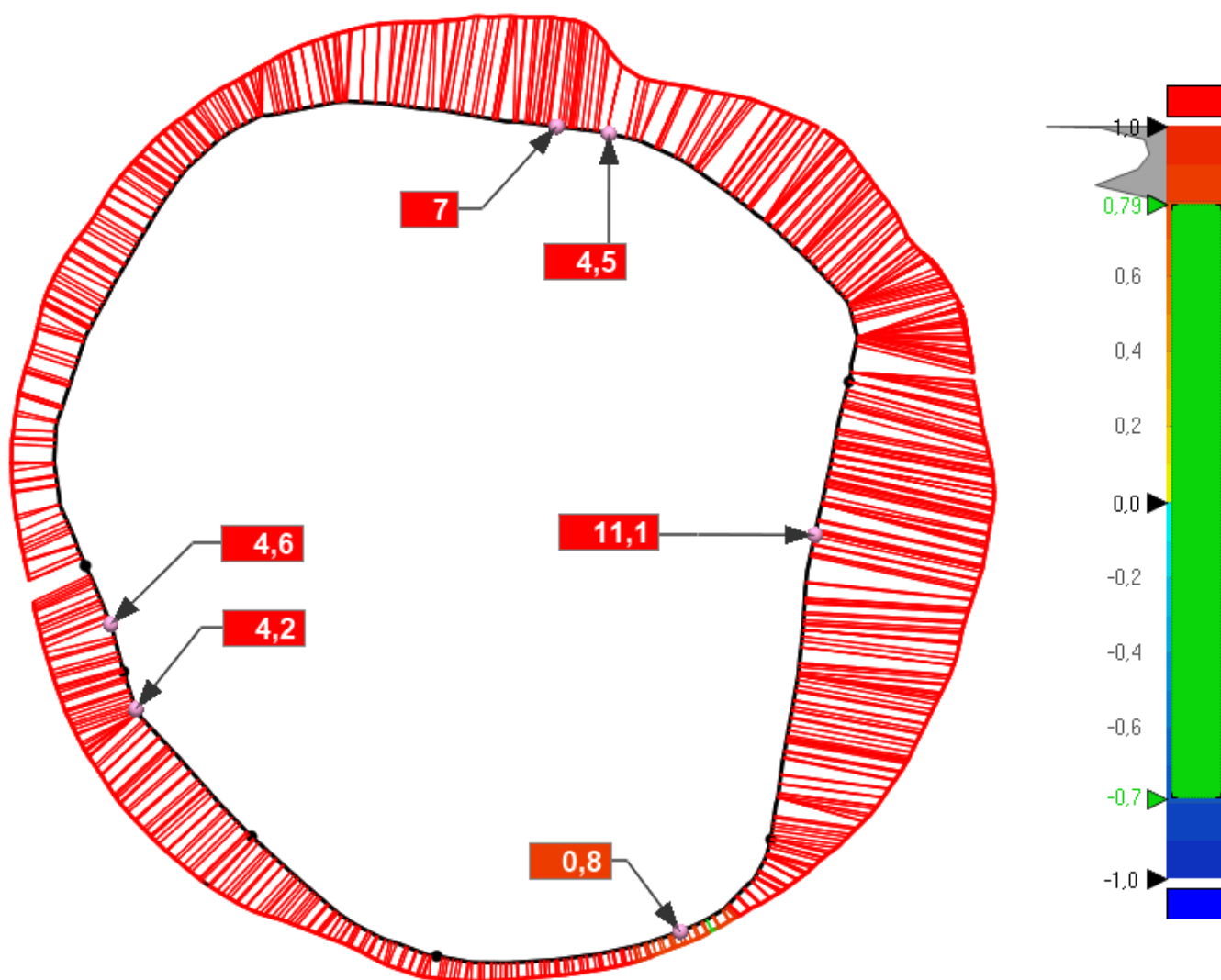
48. ábra: Rubik-kocka modellek összehasonlítása, Z tengely, 72 mm

Tárgyszkenelési technológiák összehasonlító elemzése

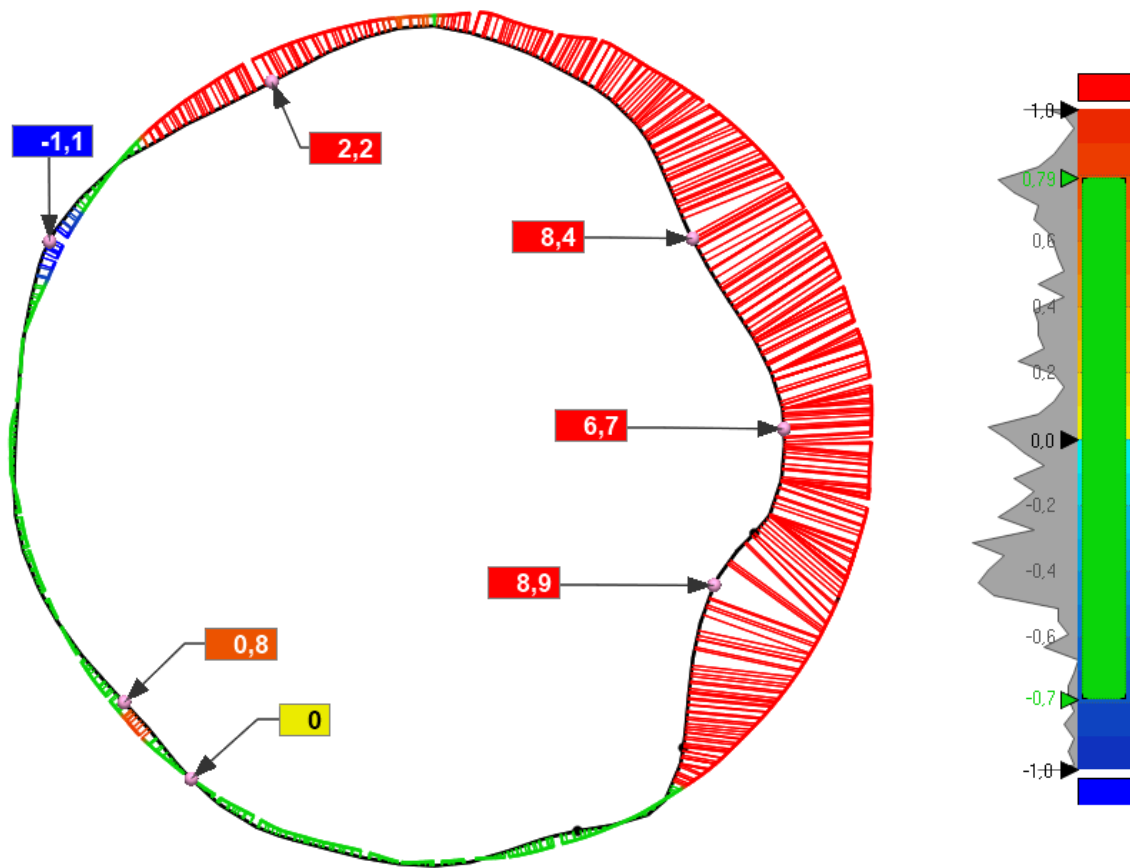
2. melléklet: Artec Eva és Samsung modellek összehasonlítása Geomagic Control X szoftverben – metszetek

Az ábrák címében a számérték (pl 5 mm) azt jelenti, hogy a Control X szoftverben a tengely 0 pontjától mennyi mm-re helyezkedett el a szelvény. A maja dombormű és a Rubik-kocka esetében az A és B oldalak a pozitív és negatív irányokat jelölik, ezekben az esetekben a tengely 0 pontja a modellen belül helyezkedett el.

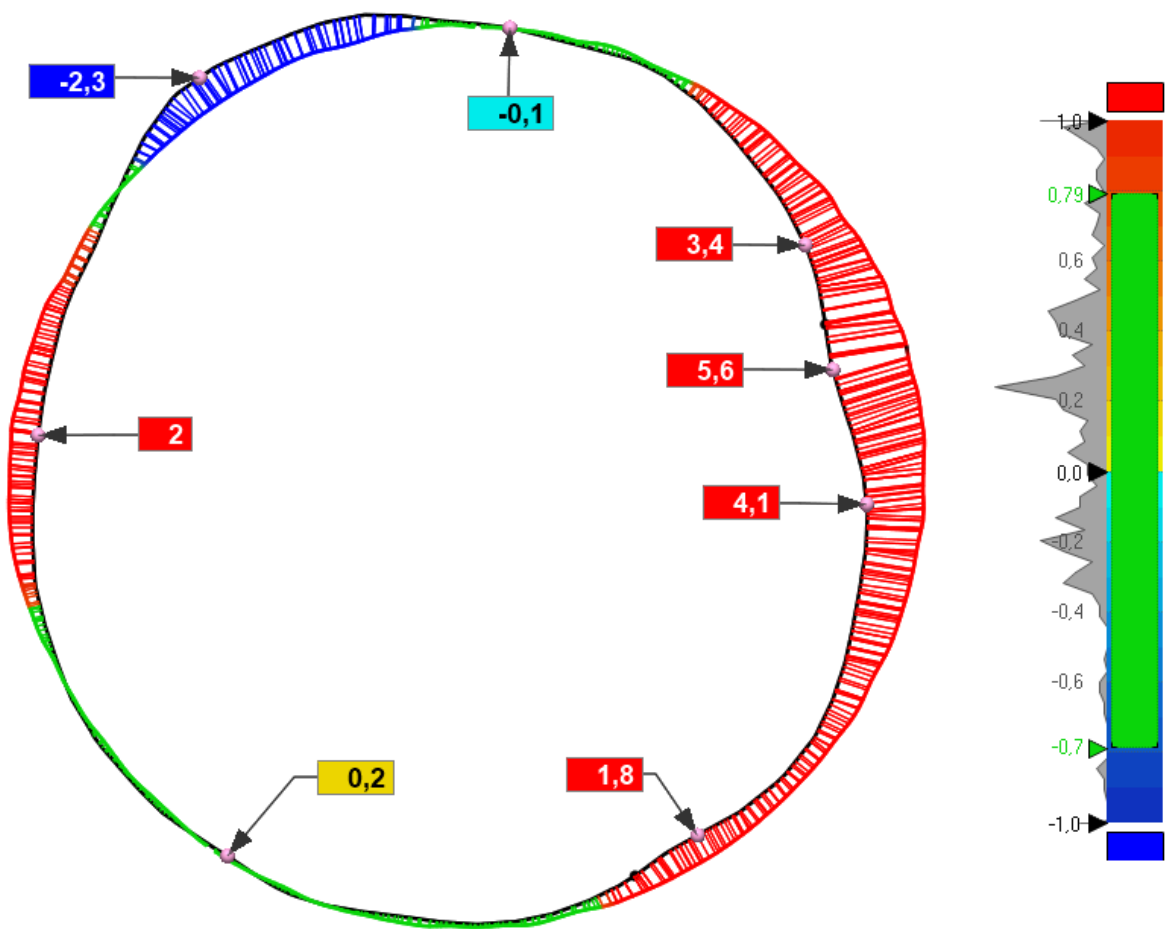
Arany Fácán modelljeinek összehasonlítása:



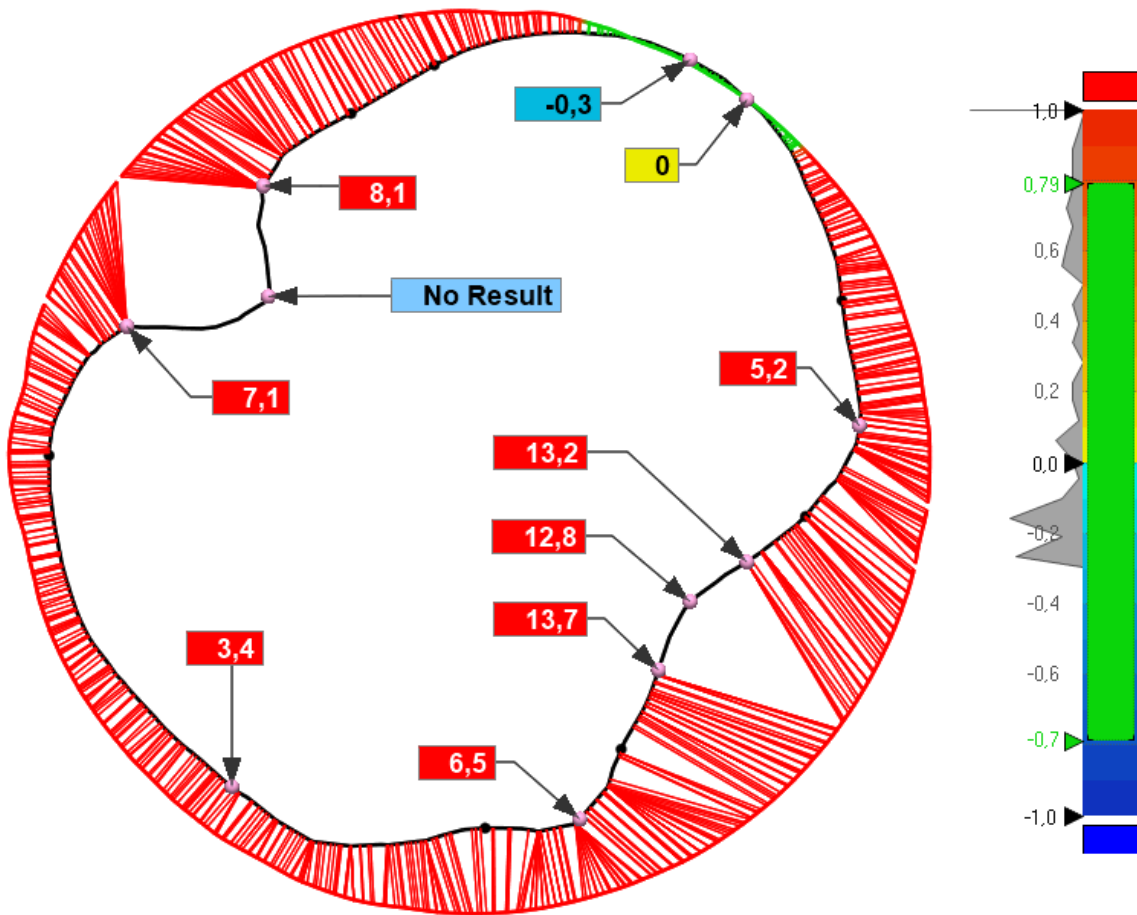
1. ábra: Arany Fácán modellek összehasonlítása, 5 mm – alsó karima



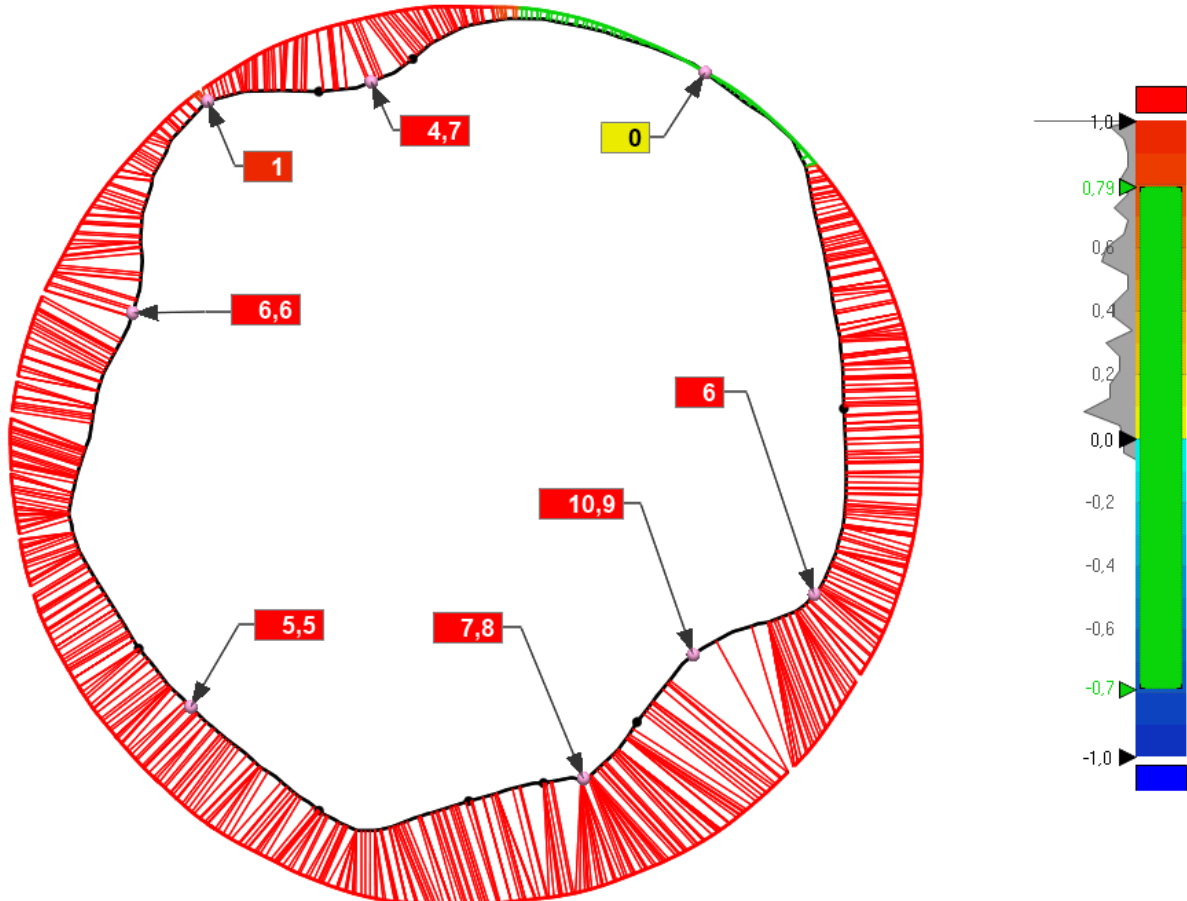
2. ábra: Arany Fácán modellek összehasonlítása, 41 mm



3. ábra: Arany Fácán modellek összehasonlítása, 77 mm

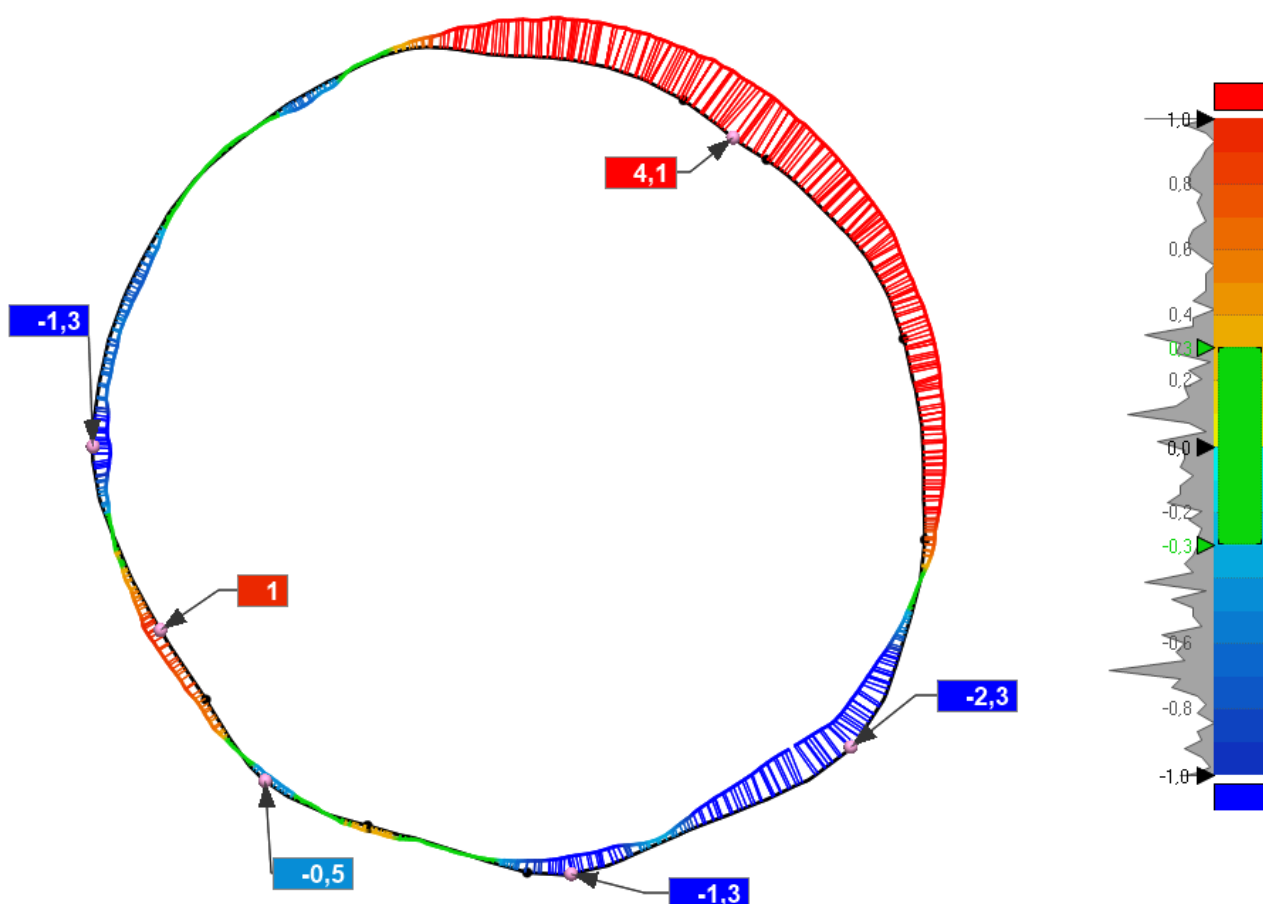


4. ábra: Arany Fácán modellek összehasonlítása, 118 mm

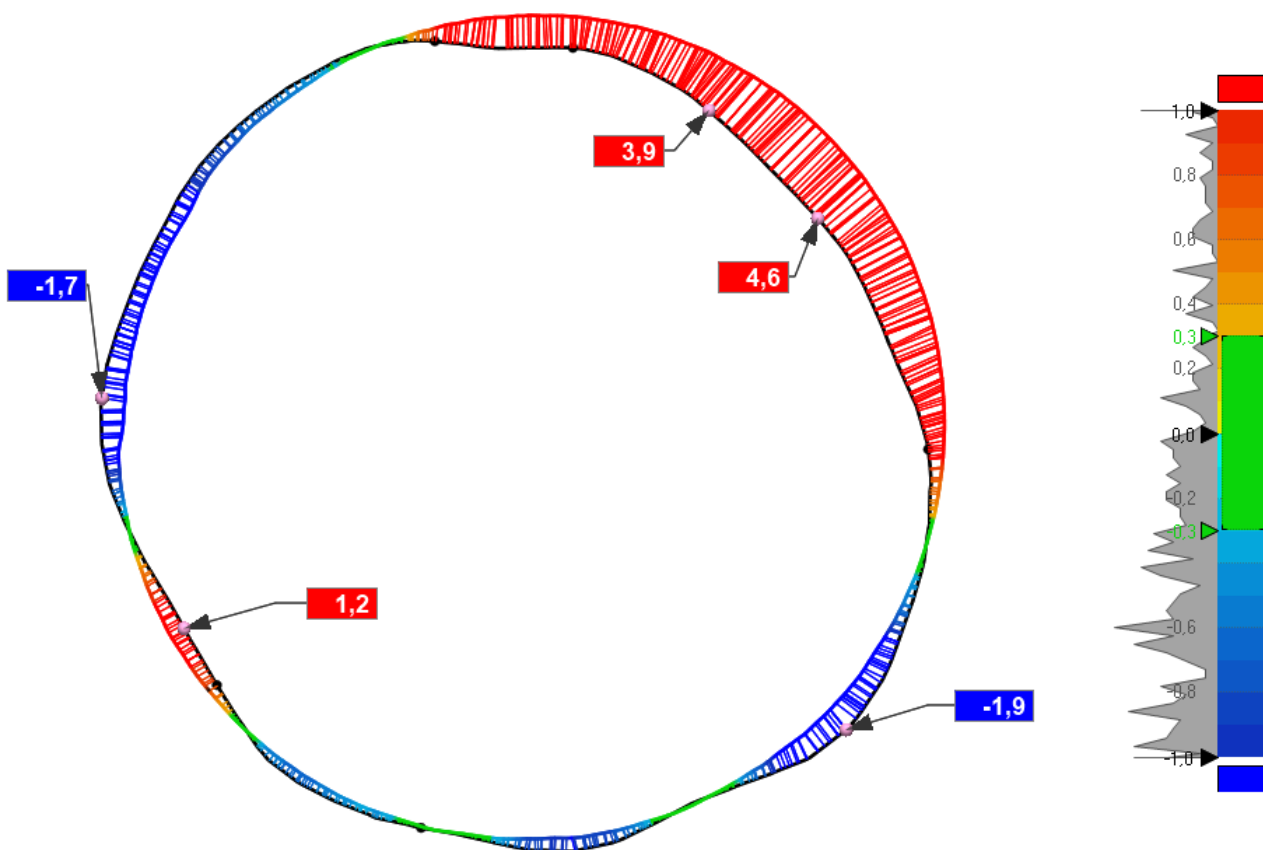


5. ábra: Arany Fácán modellek összehasonlítása, 144 mm – felső karima

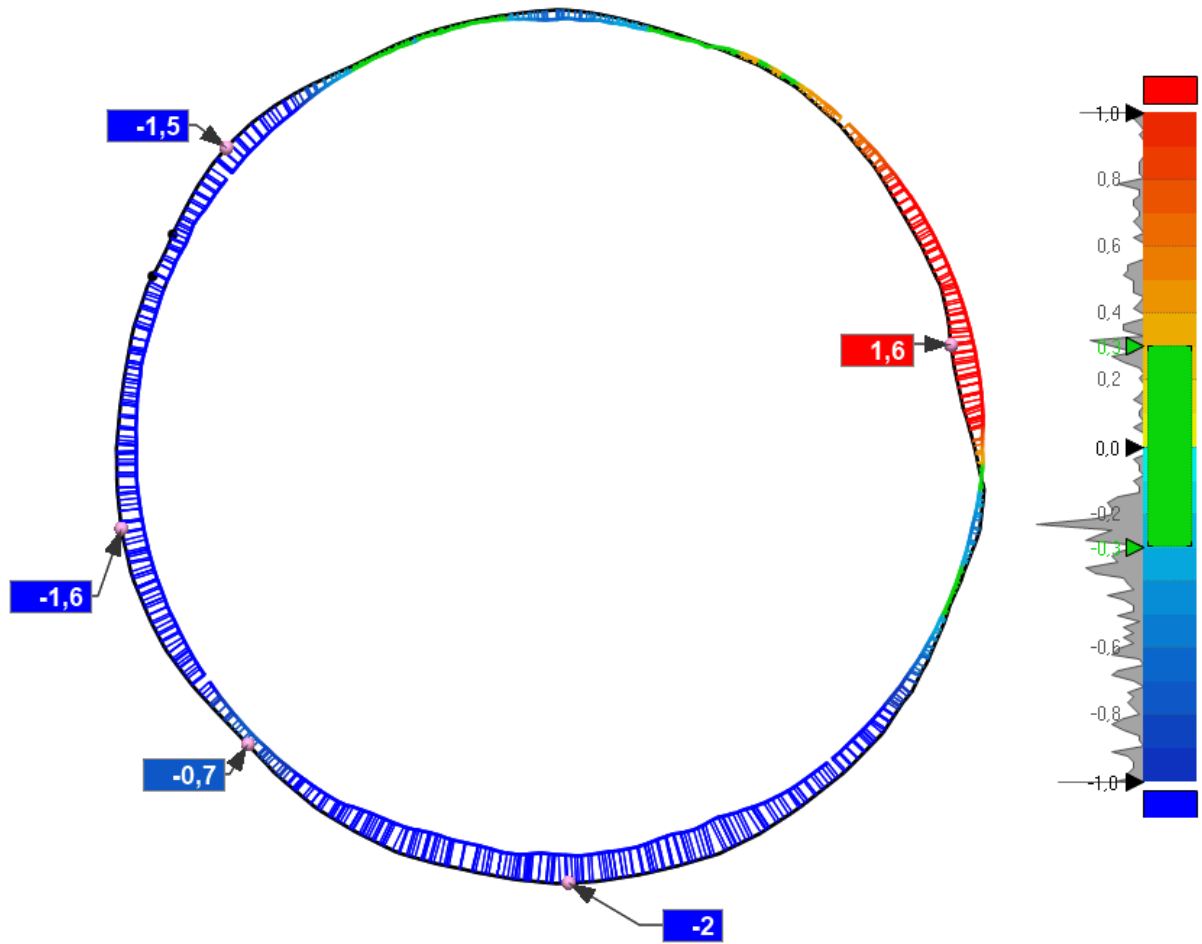
IPA modelljeinek összehasonlítása:



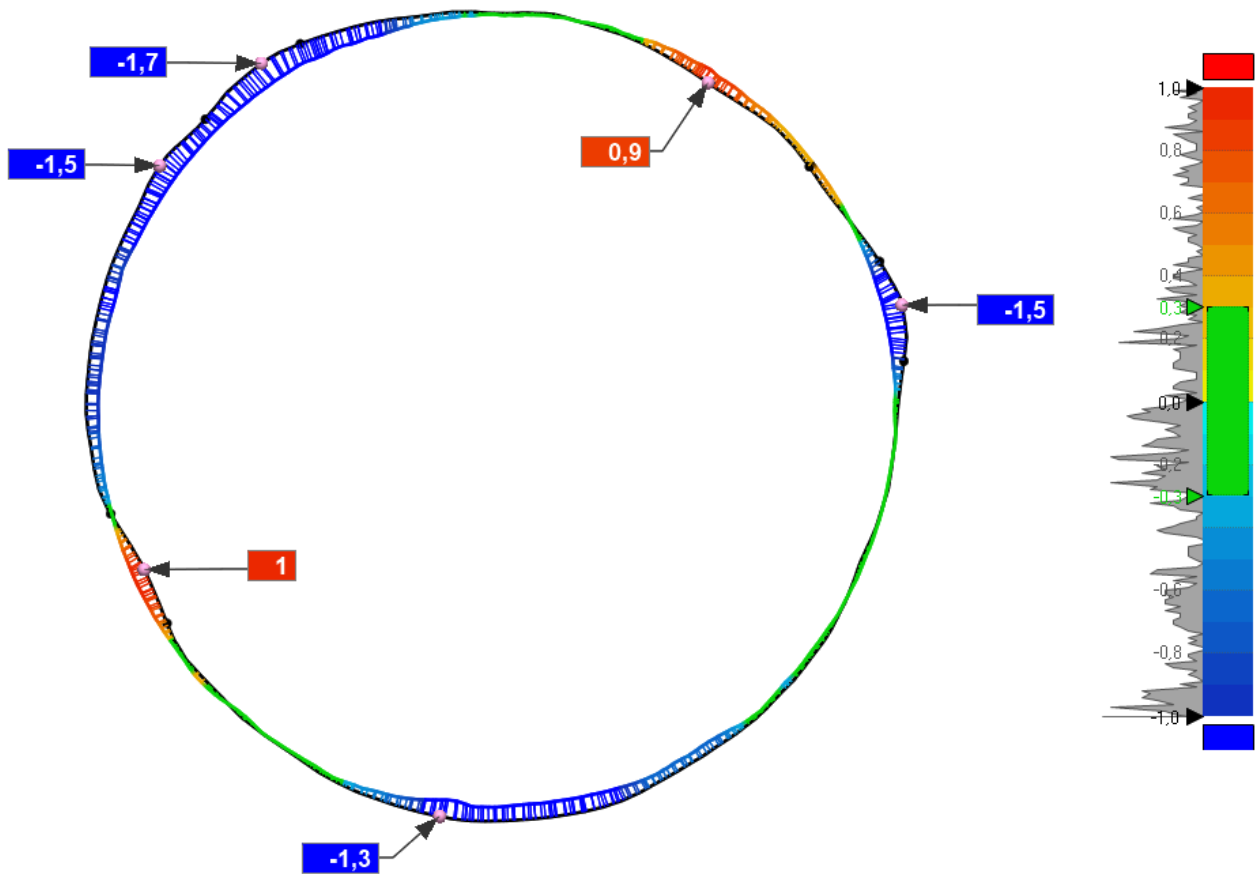
6. ábra: IPA modellek összehasonlítása, 4 mm – alsó karima



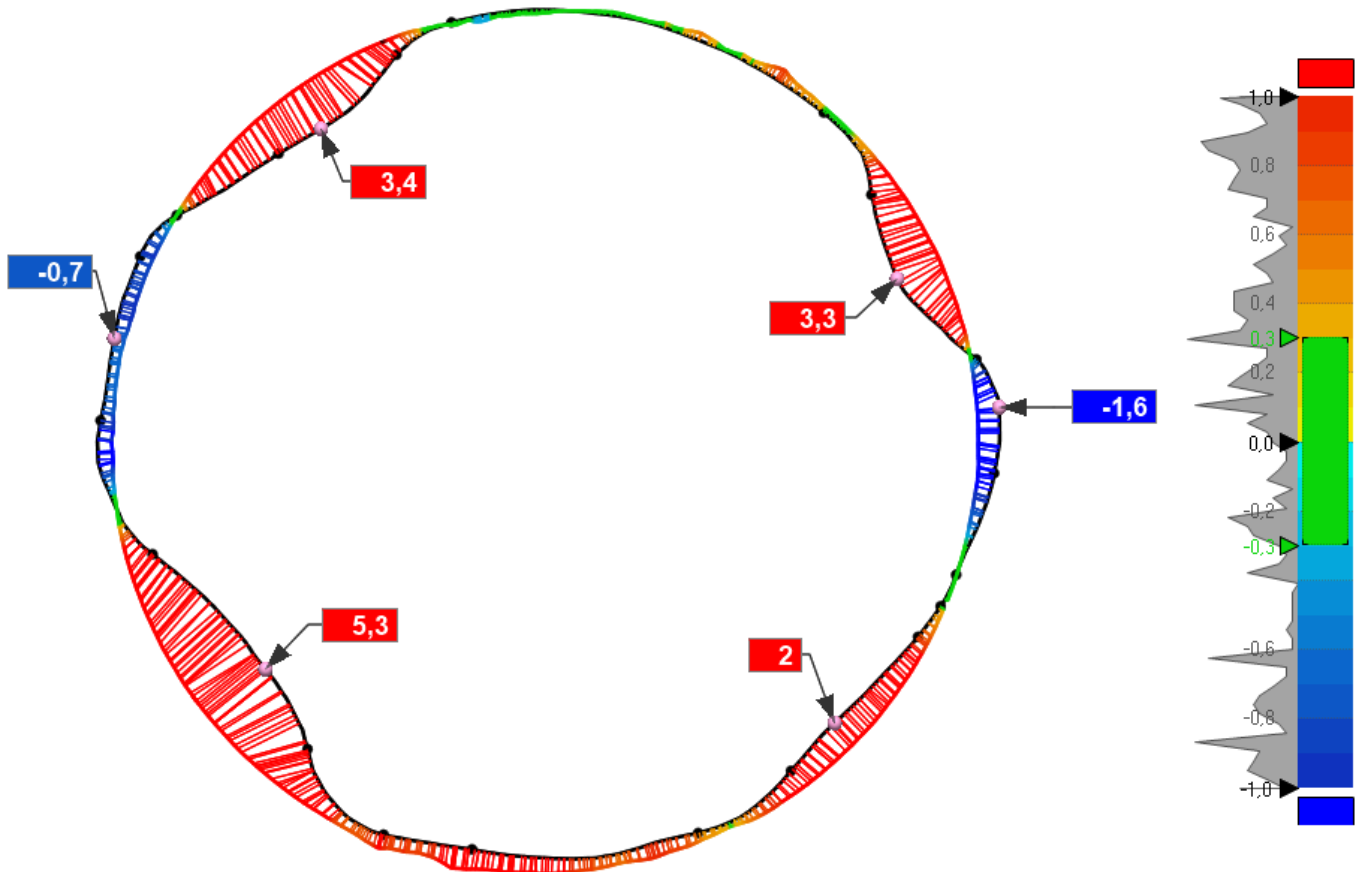
7. ábra: IPA modellek összehasonlítása, 10 mm



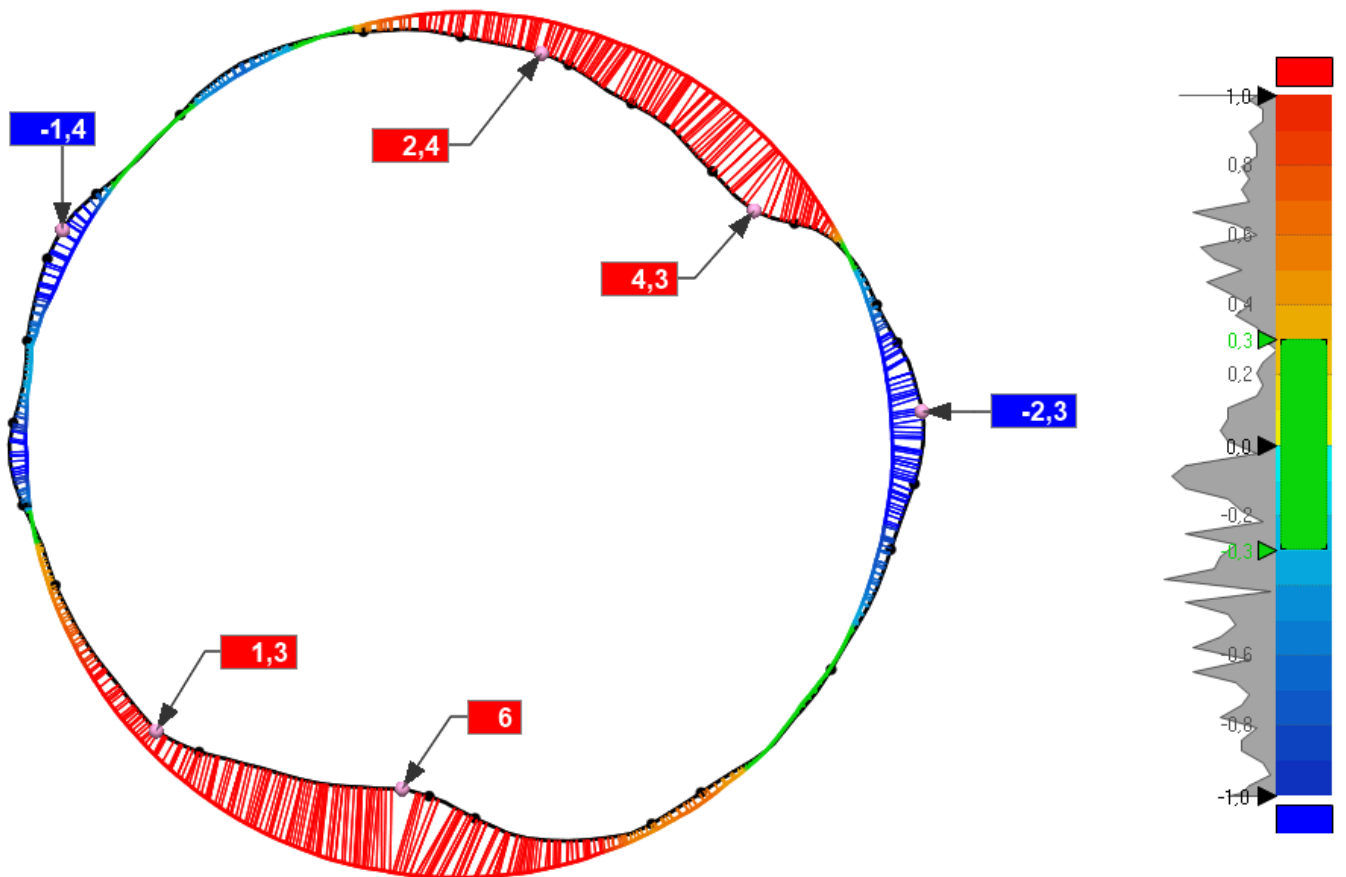
8. ábra: IPA modellek összehasonlítása, 40 mm



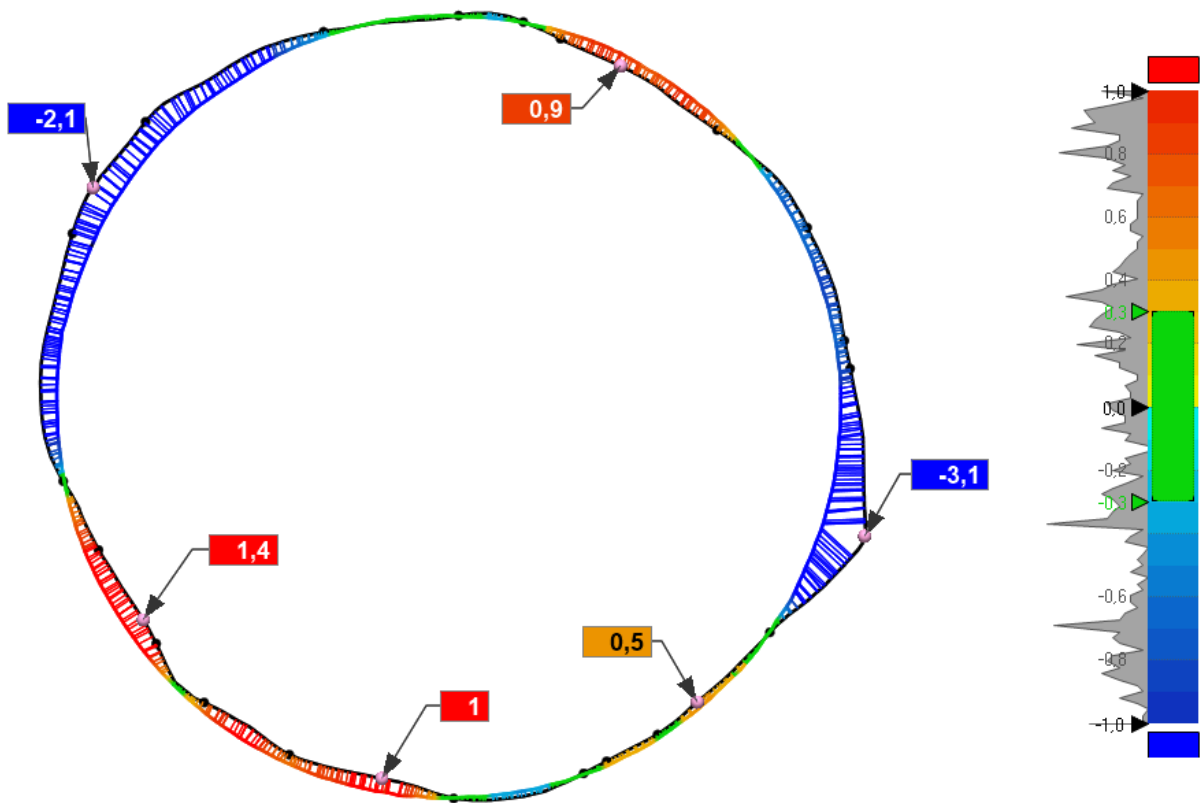
9. ábra: IPA modellek összehasonlítása, 76 mm



10. ábra: IPA modellek összehasonlítása, 98 mm

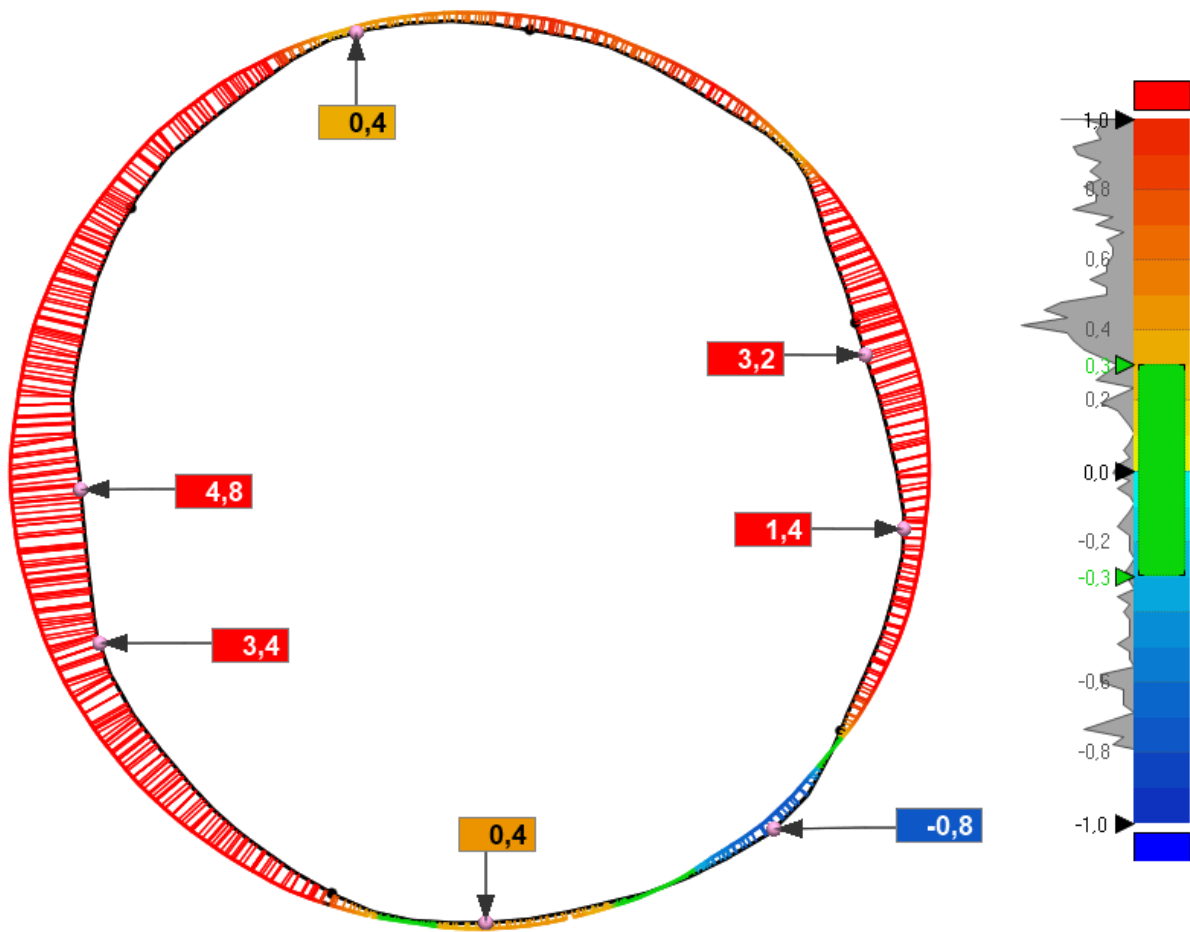


11. ábra: IPA modellek összehasonlítása, 112 mm

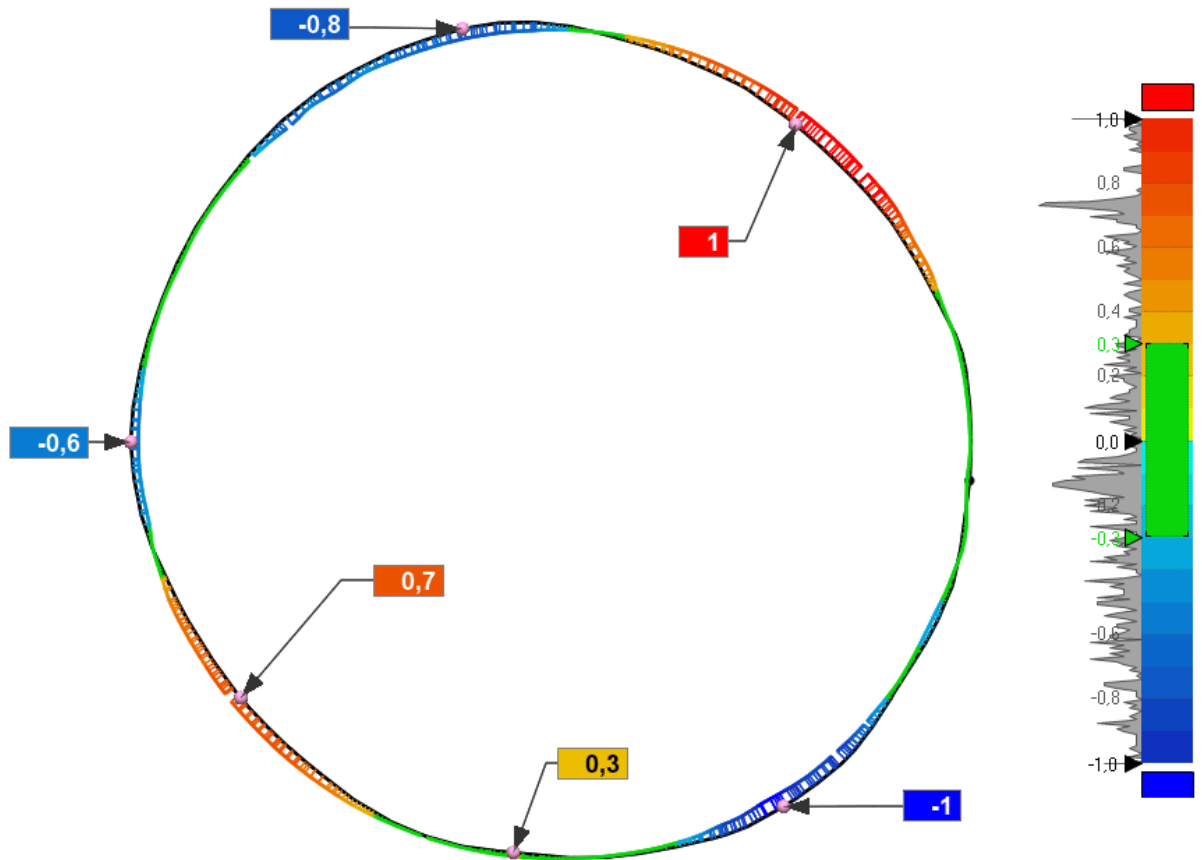


12. ábra: IPA modellek összehasonlítása, 137 mm – felső karima

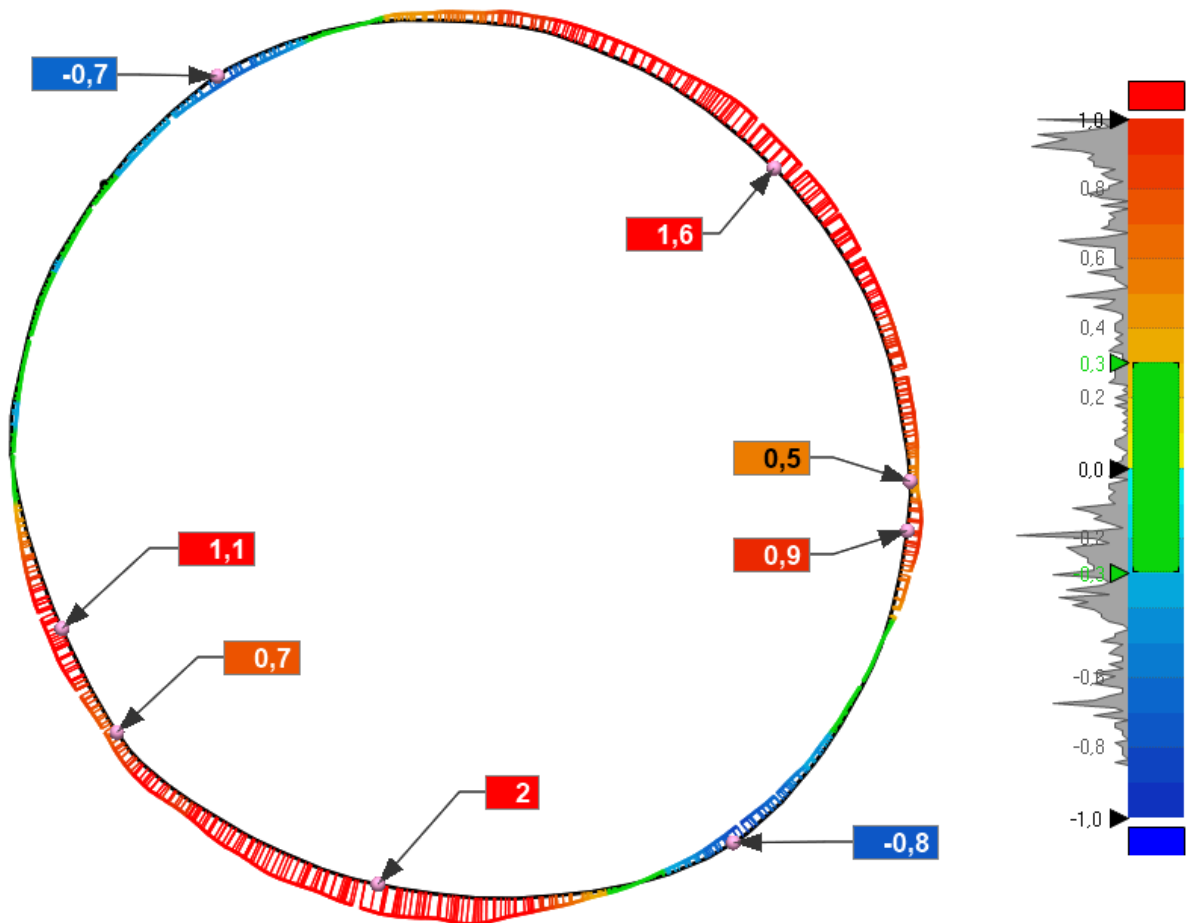
Kozel modelljeinek összehasonlítása:



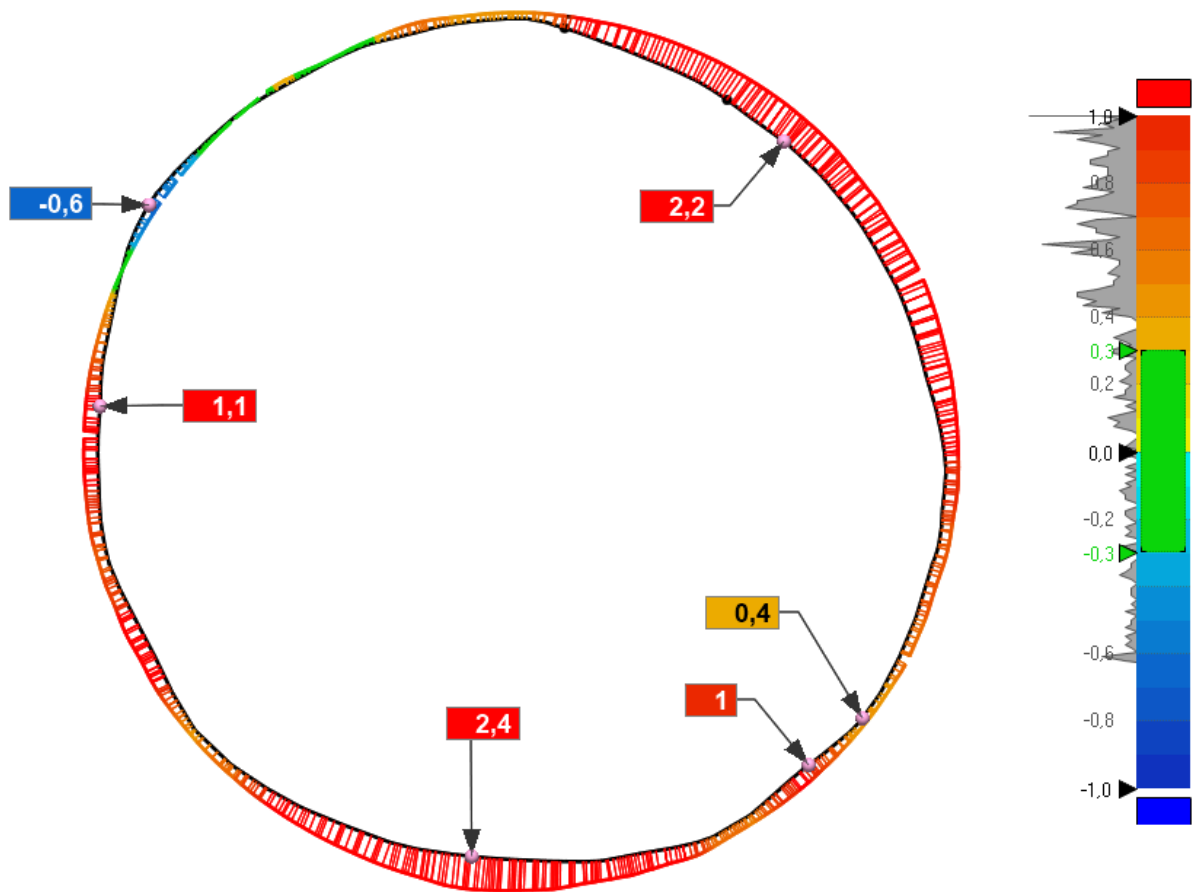
13. ábra: Kozel modellek összehasonlítása, 4 mm – alsó karima



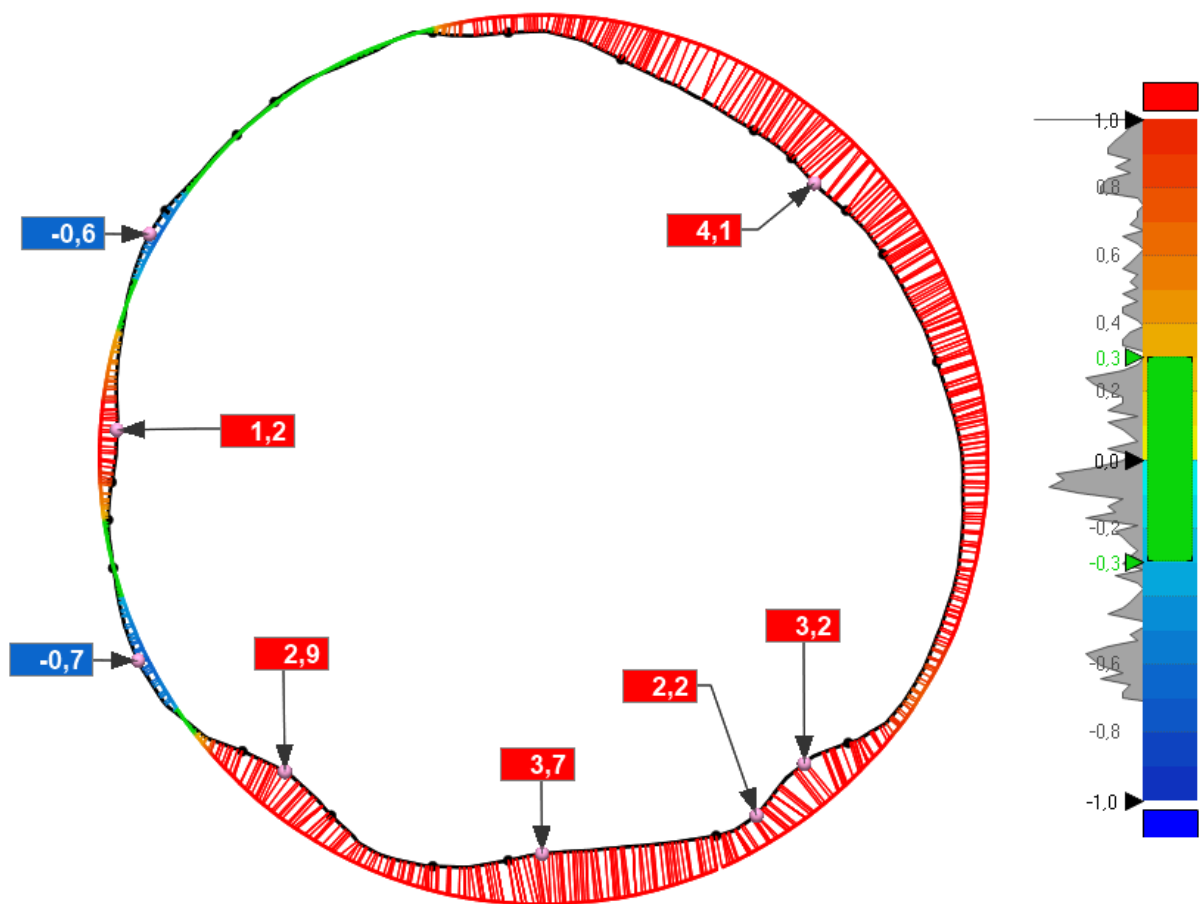
14. ábra: Kozel modellek összehasonlítása, 40 mm



15. ábra: Kozel modellek összehasonlítása, 76 mm

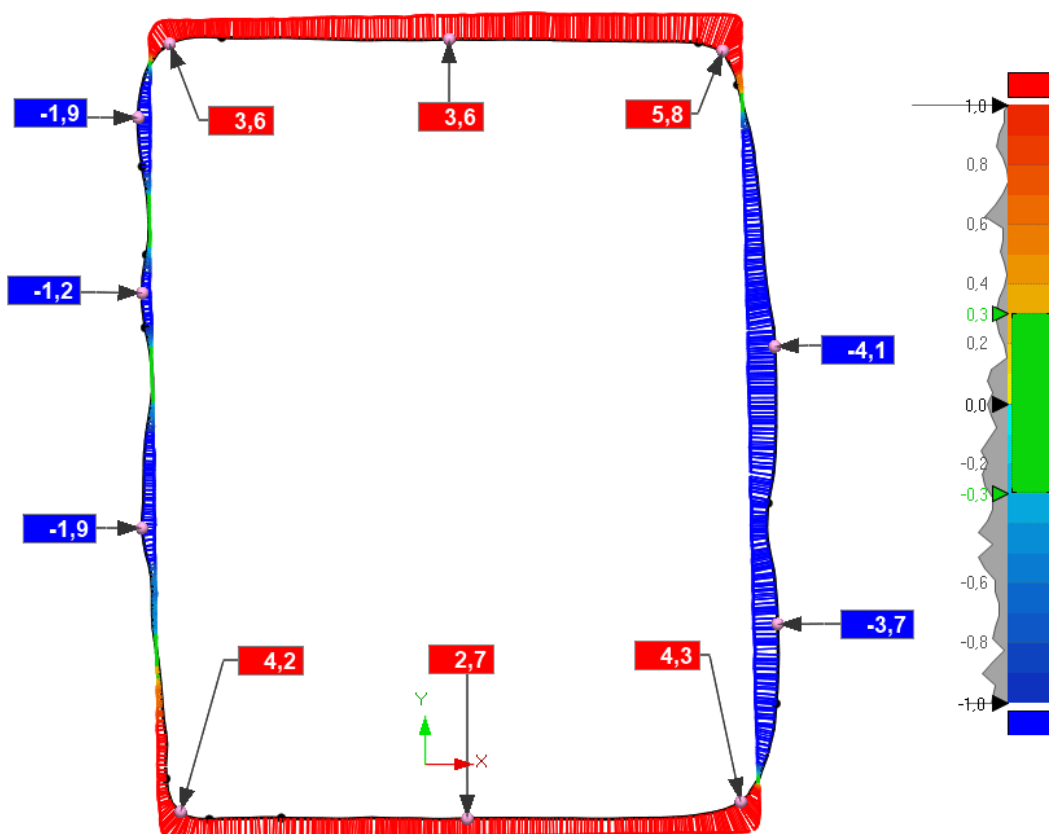


16. ábra: Kozel modellek összehasonlítása, 112 mm

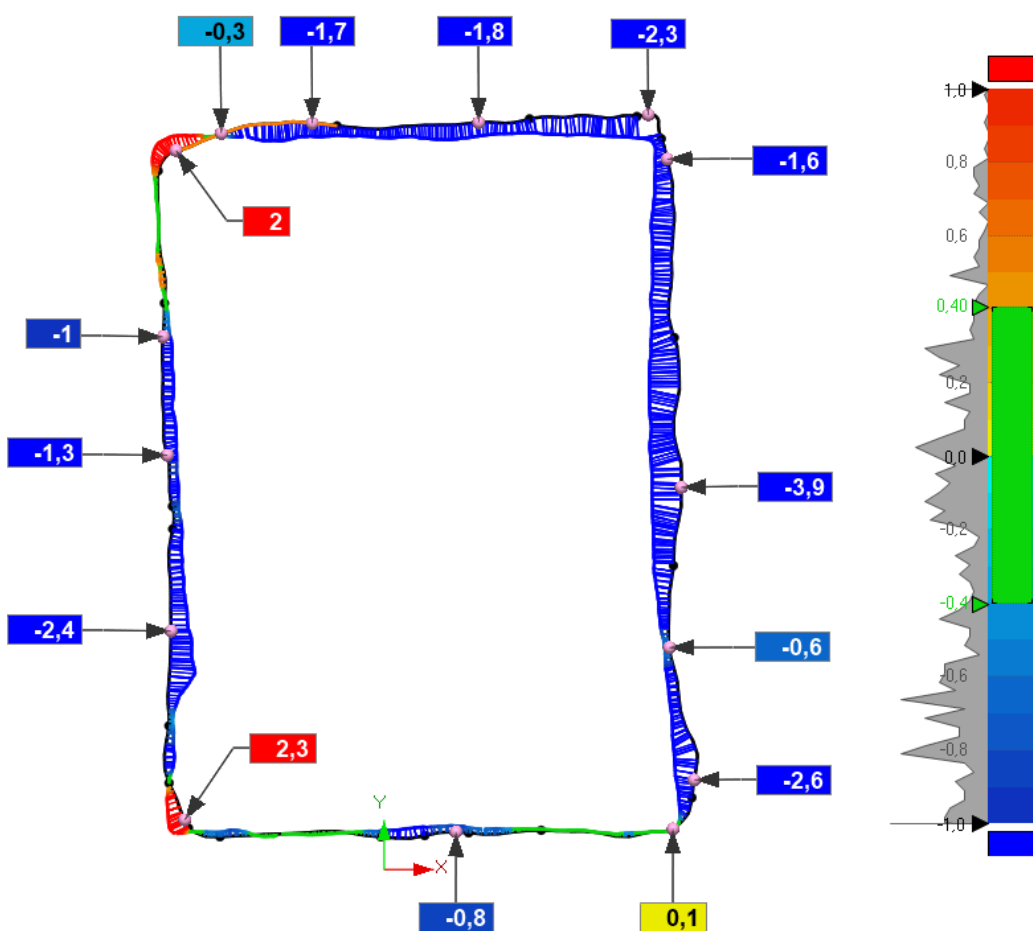


17. ábra: Kozel modellek összehasonlítása, 140 mm – felső karima

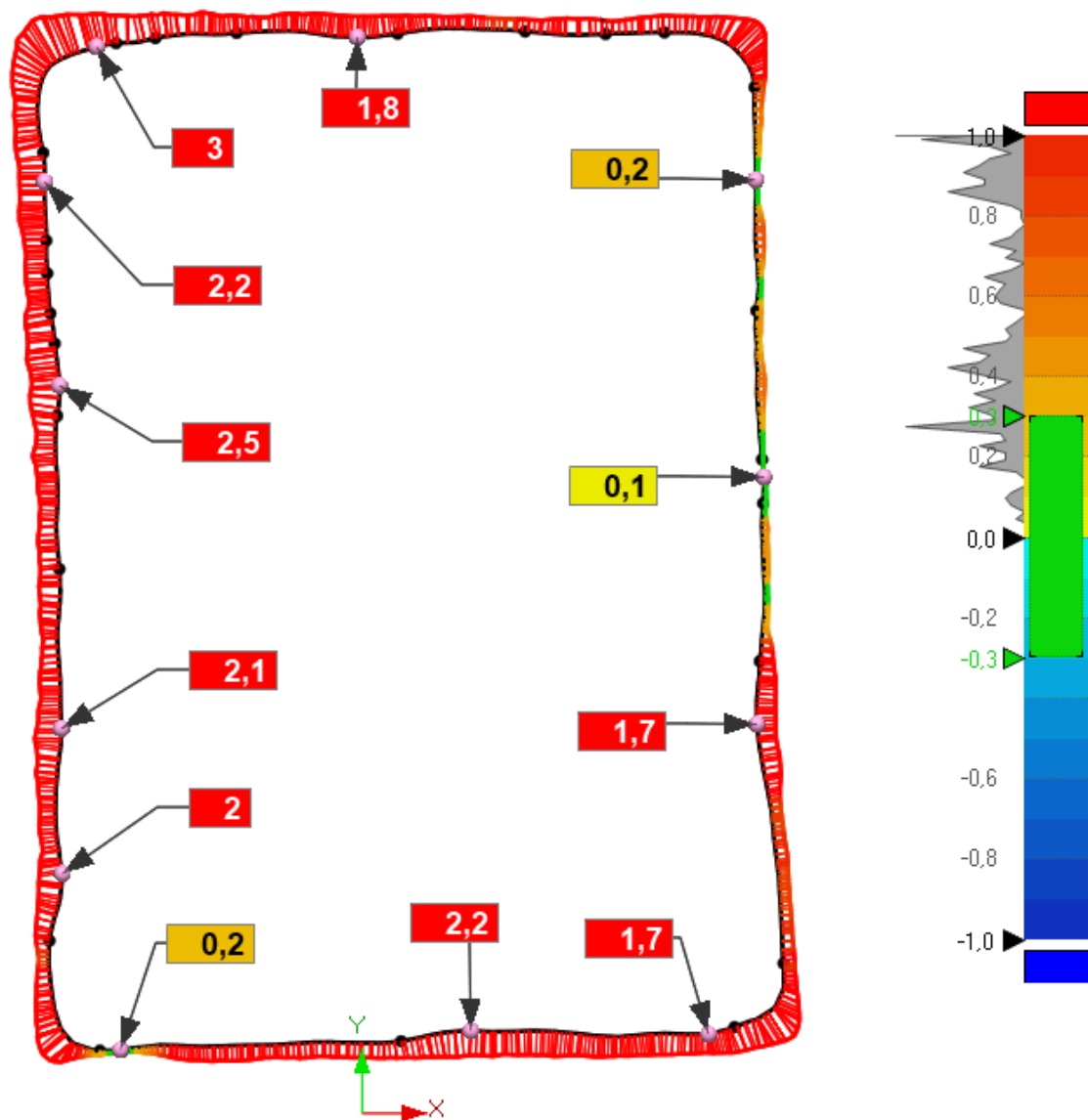
Maja dombormű modelljeinek összehasonlítása:



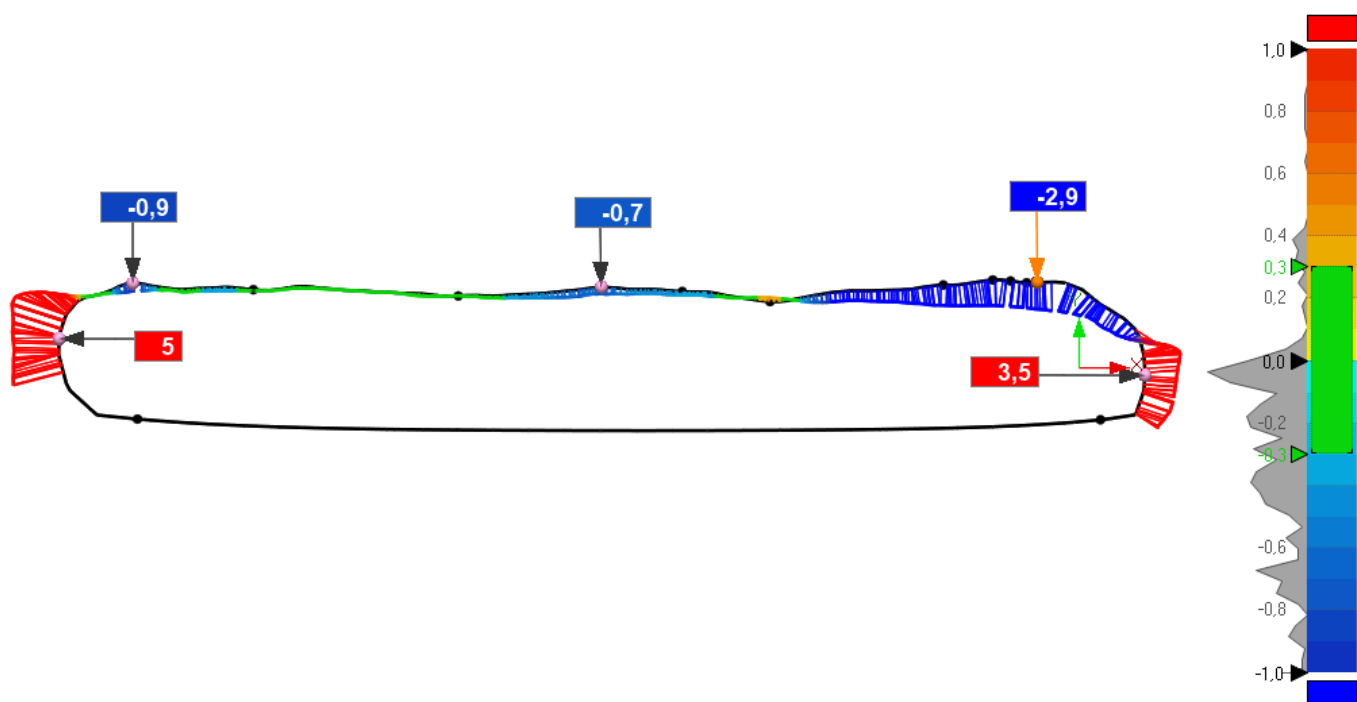
18. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Y tengely, 1 mm



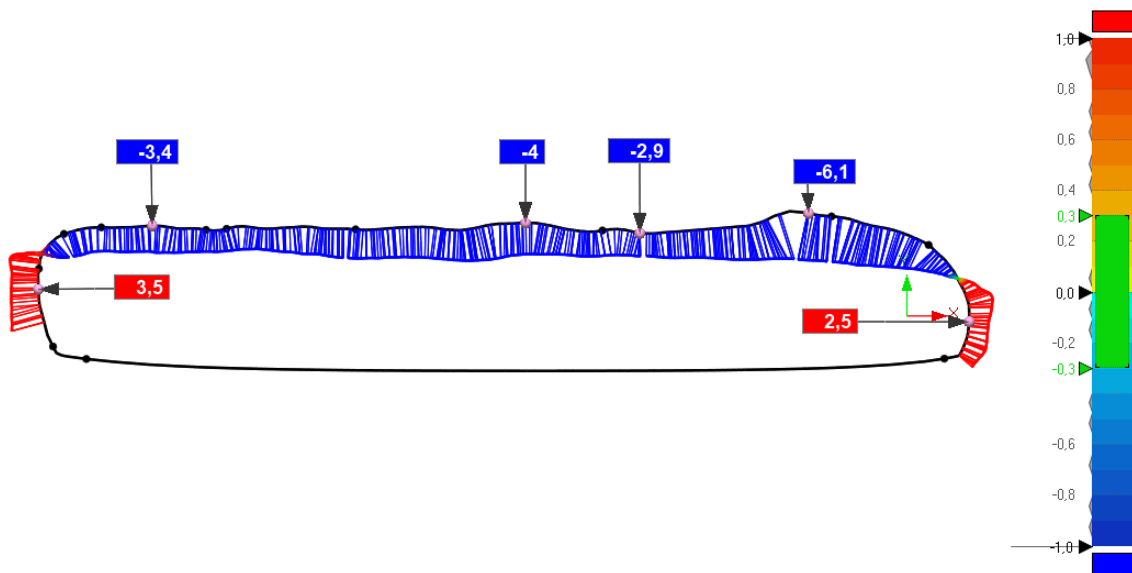
19. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Y tengely, 13 mm



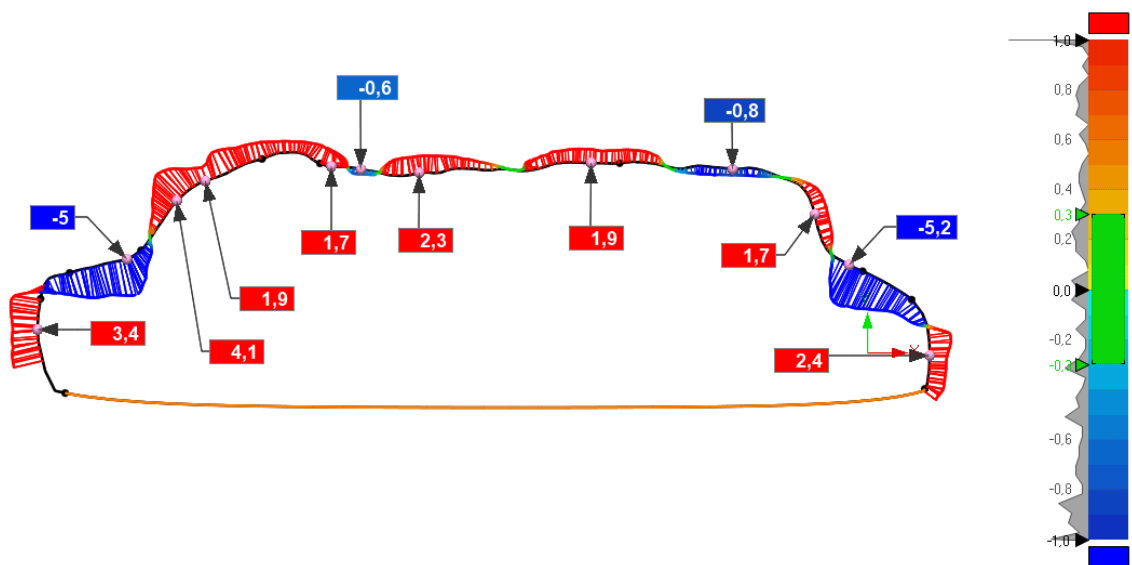
20. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Y tengely, 19 mm



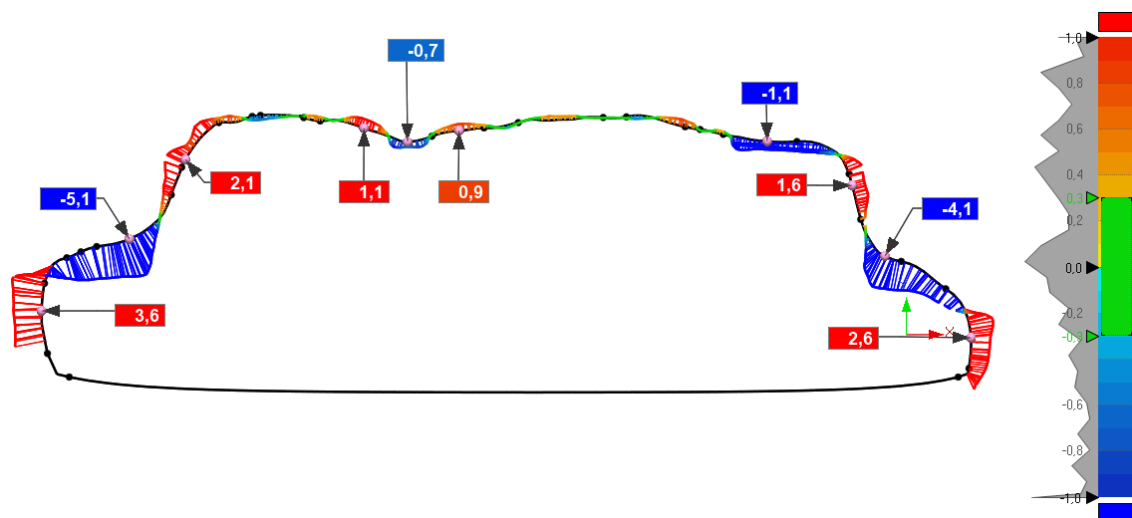
21. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, X tengely, A oldal, 46 mm



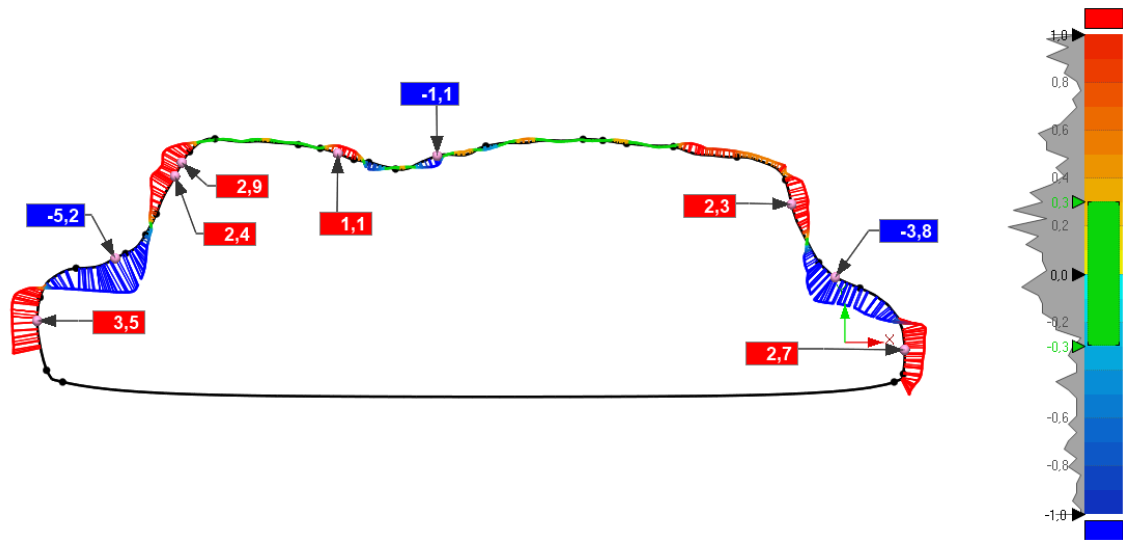
22. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, X tengely, A oldal, 41 mm



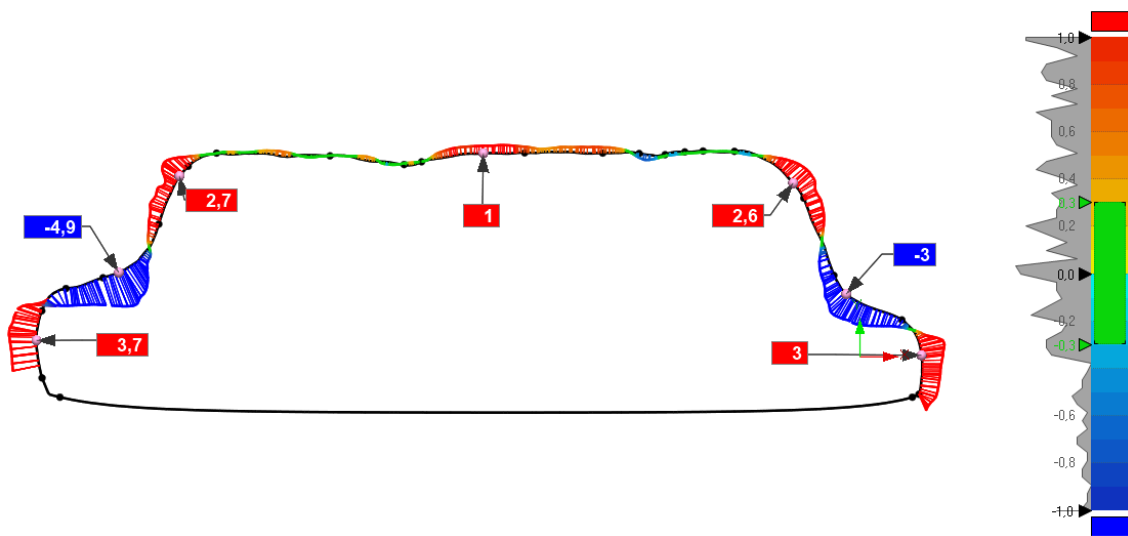
23. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, X tengely, A oldal, 31 mm



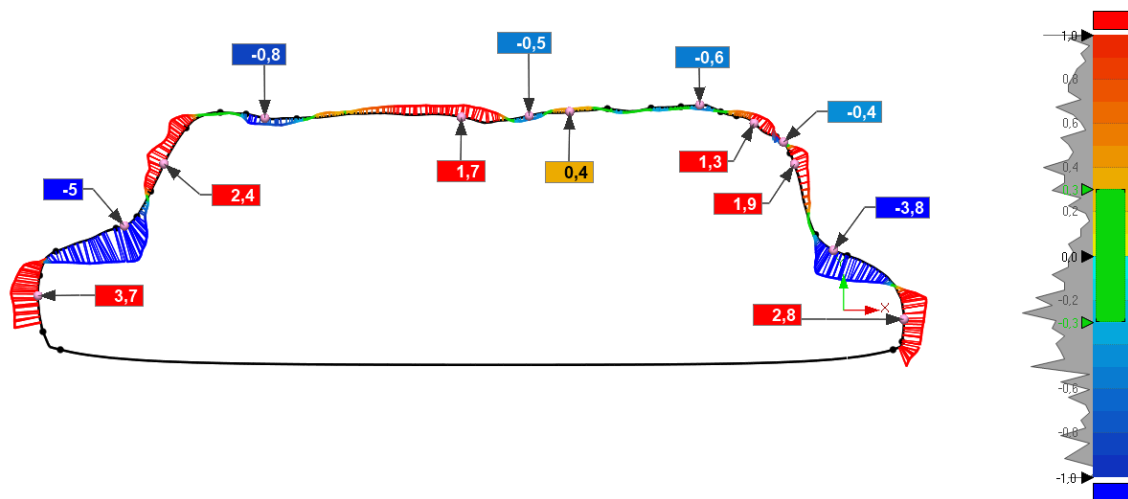
24. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, X tengely, A oldal, 22 mm



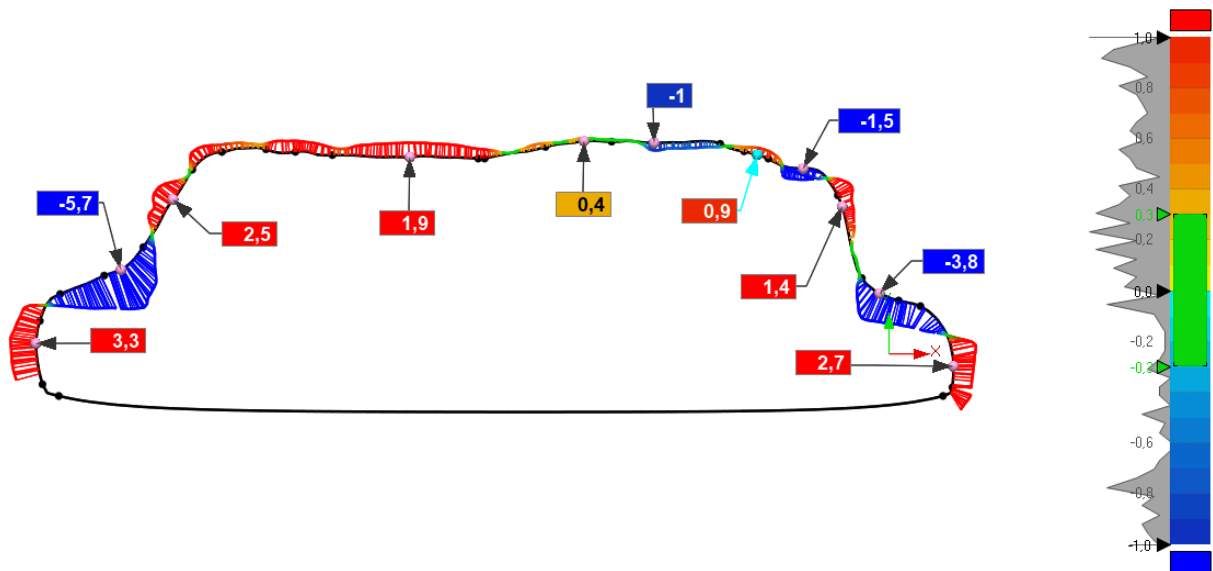
25. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, X tengely, A oldal, 13 mm



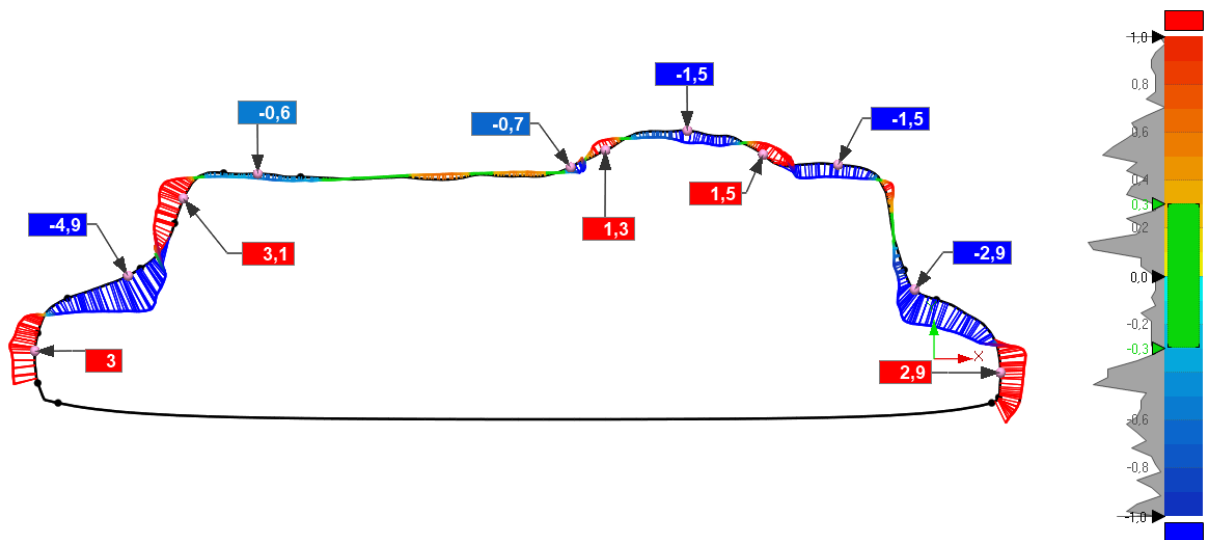
26. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, X tengely, A oldal, 4 mm



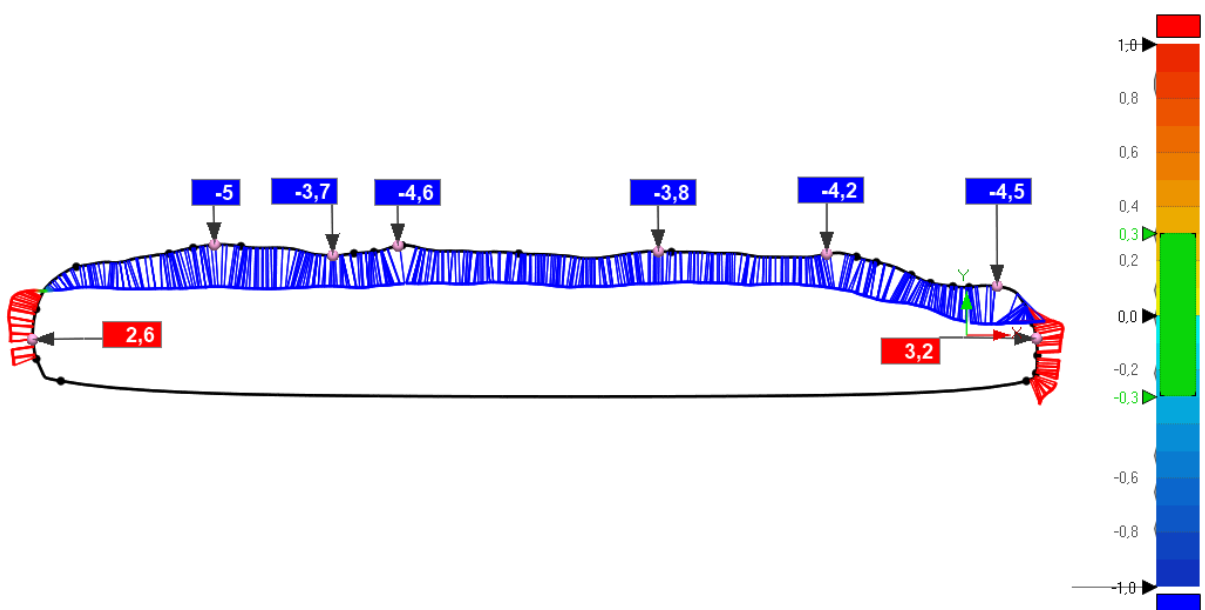
27. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, X tengely, B oldal, 5 mm



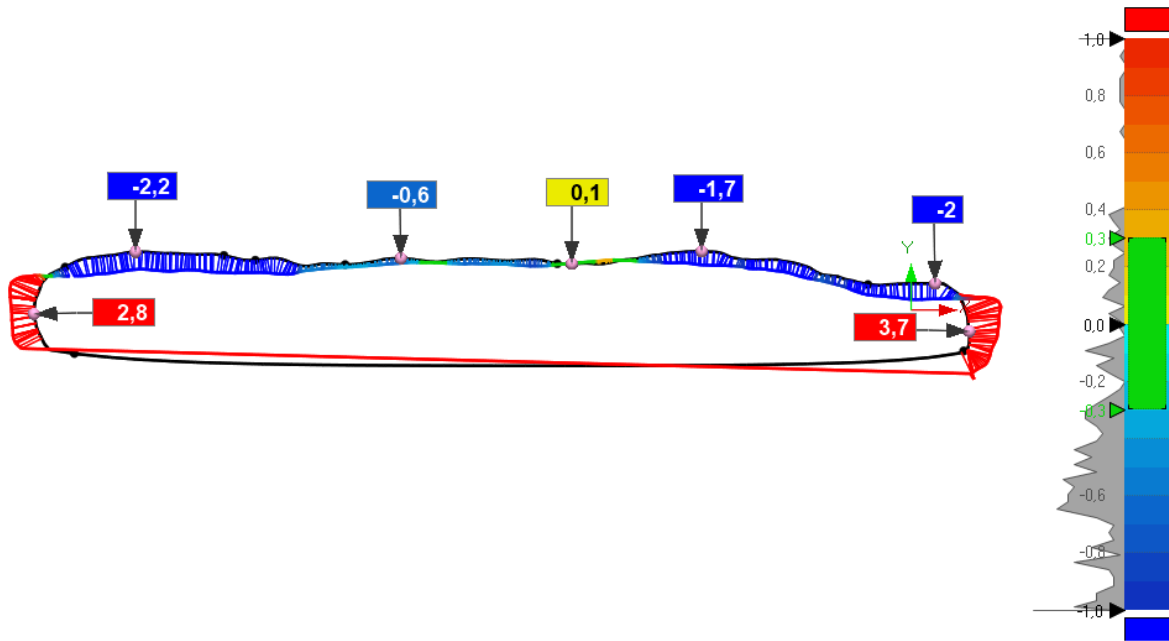
28. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, X tengely, B oldal, 14 mm



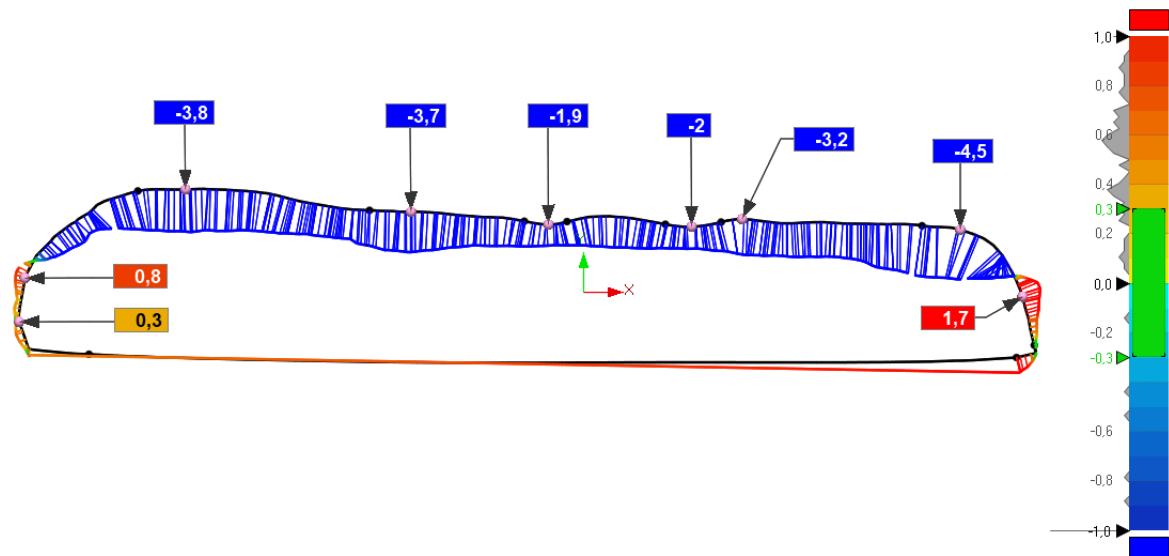
29. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, X tengely, B oldal, 23 mm



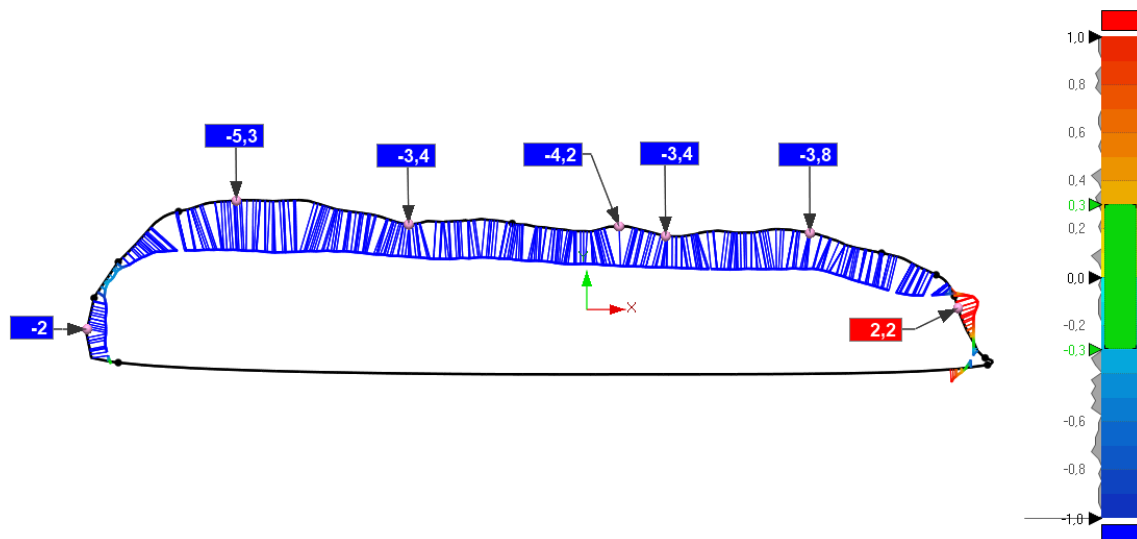
30. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, X tengely, B oldal, 32 mm



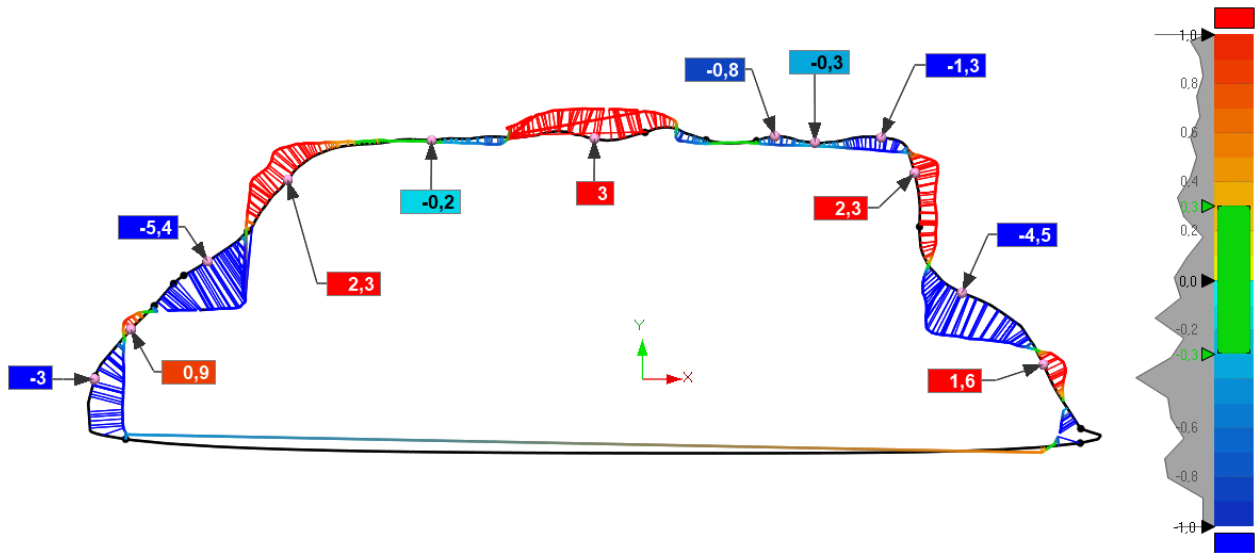
31. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, X tengely, B oldal, 38 mm



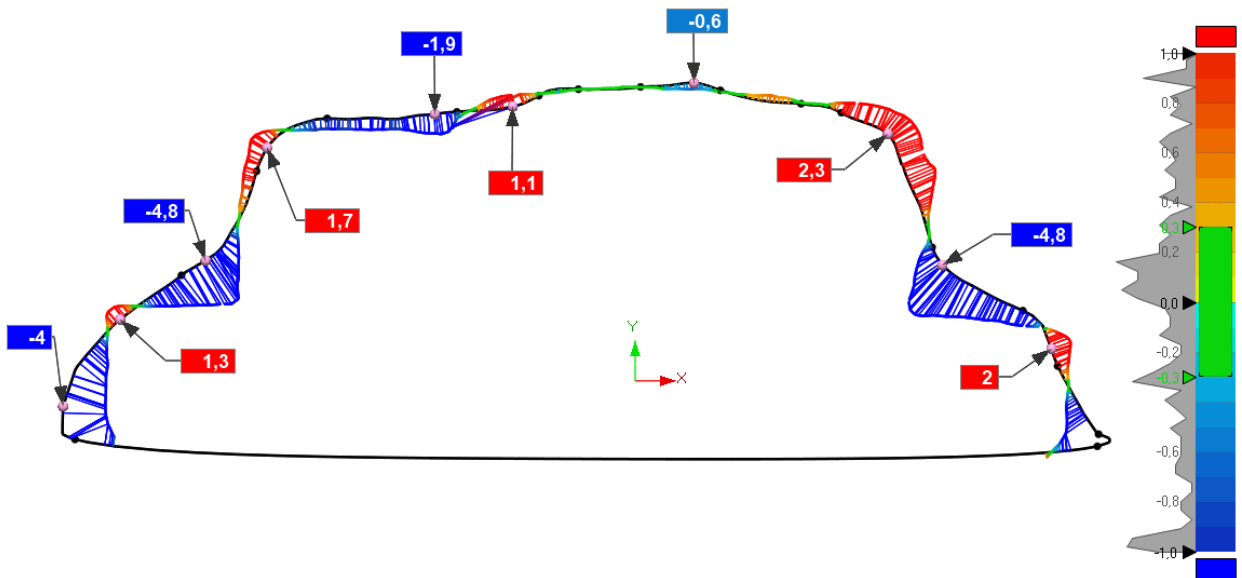
32. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, -3 mm



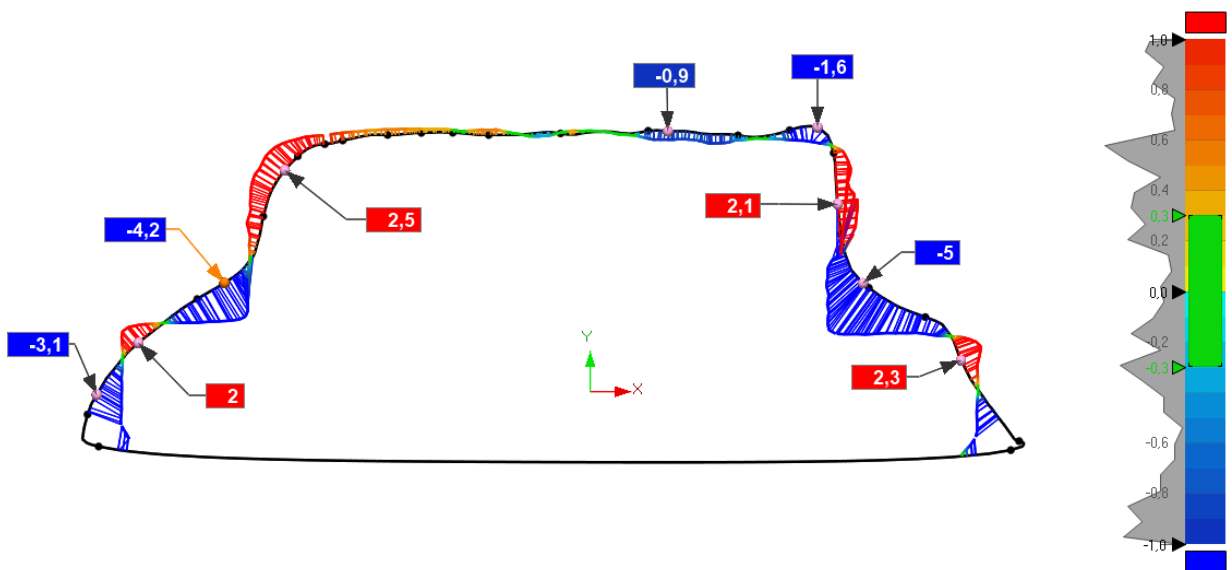
33. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 2 mm



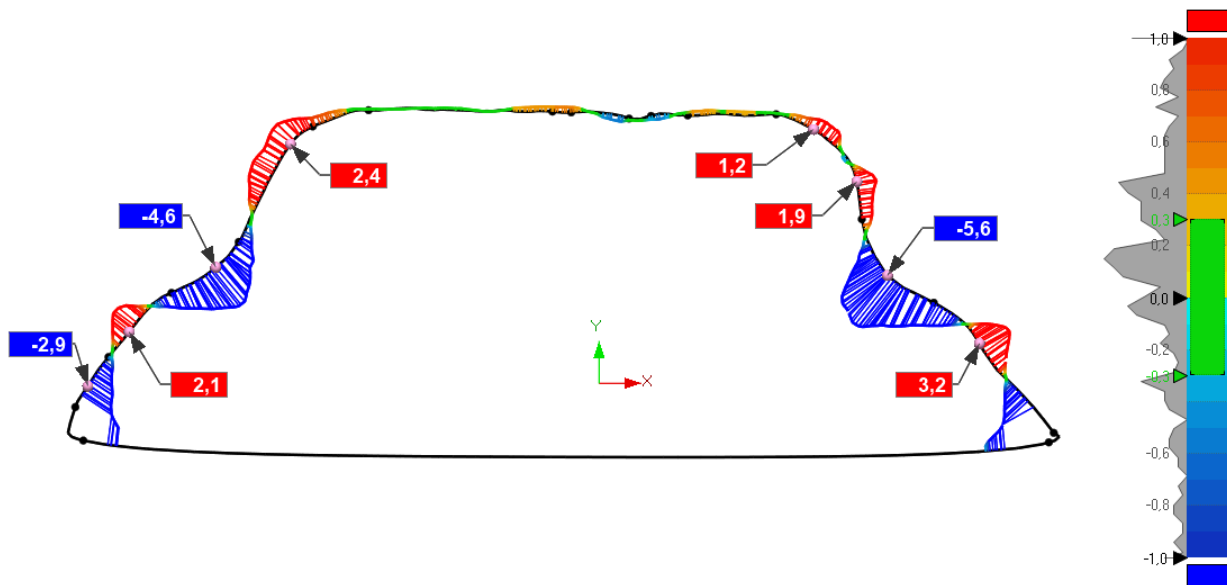
34. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 9 mm



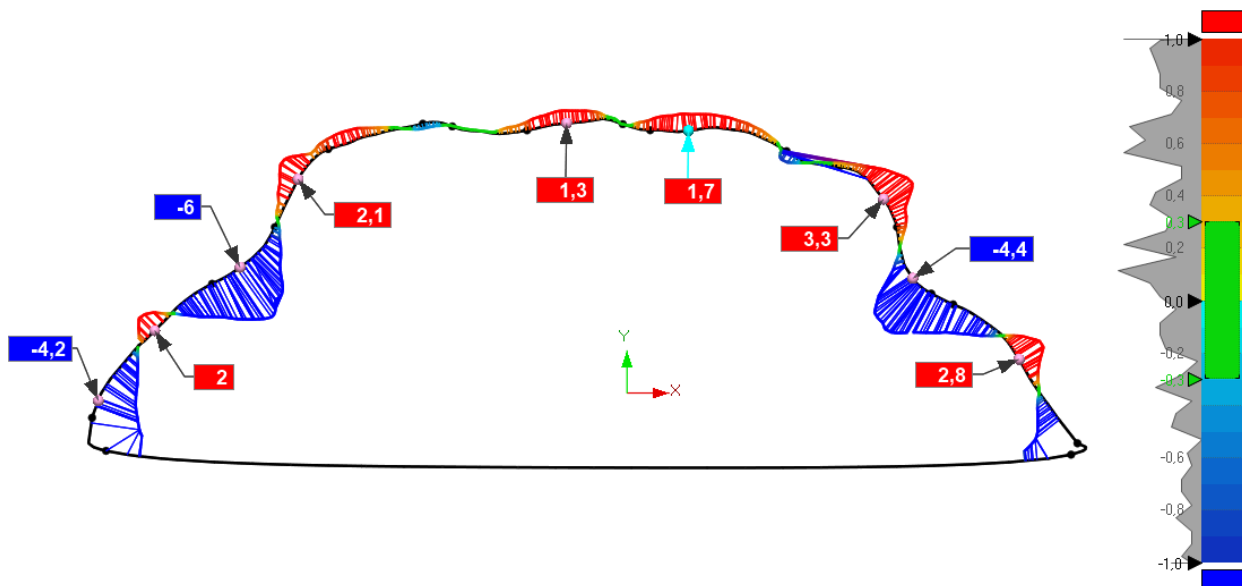
35. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 20 mm



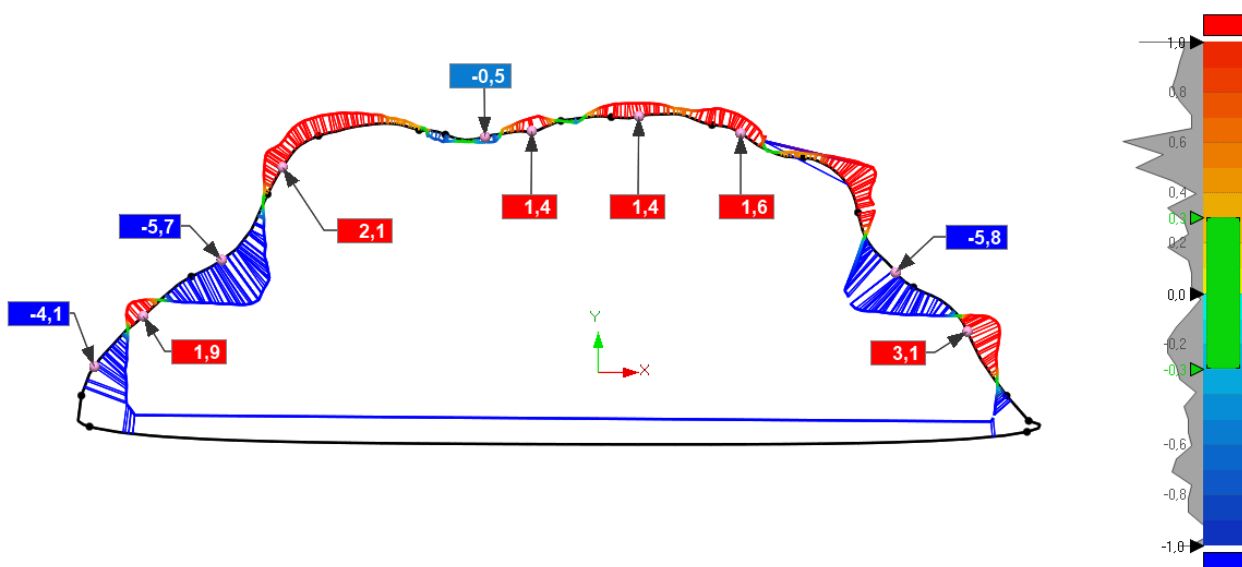
36. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 31 mm



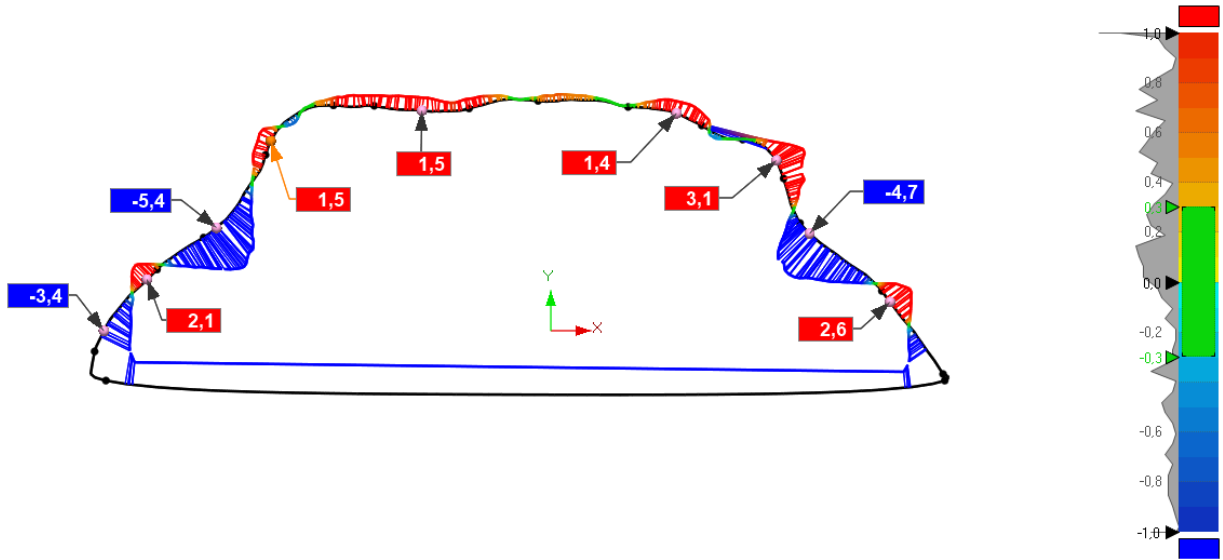
37. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 42 mm



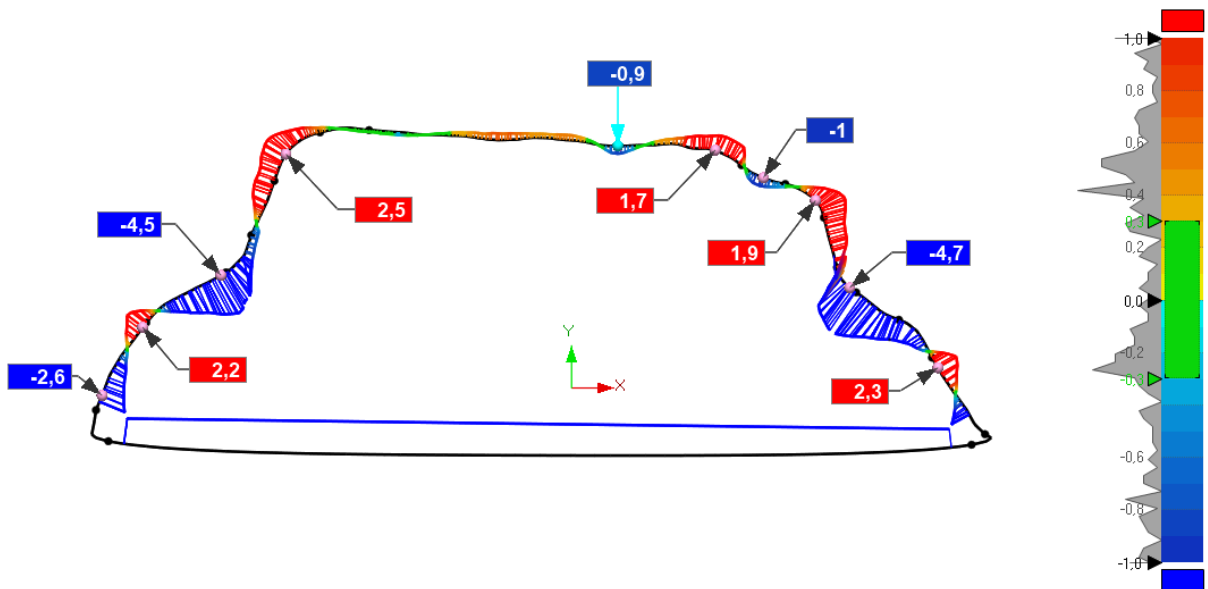
38. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 52 mm



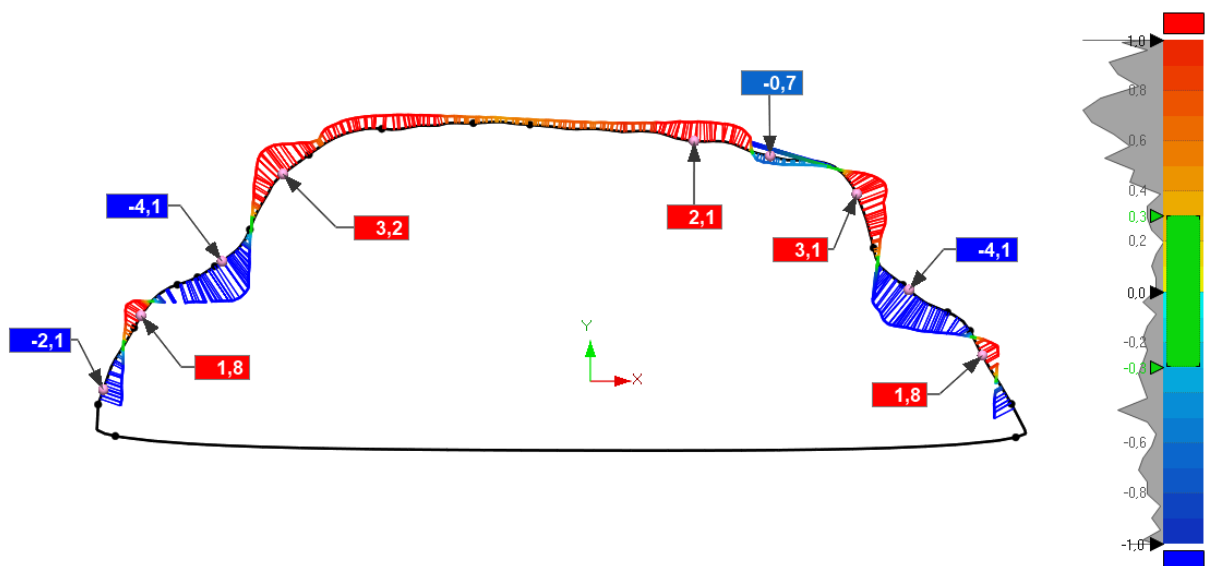
39. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 60 mm



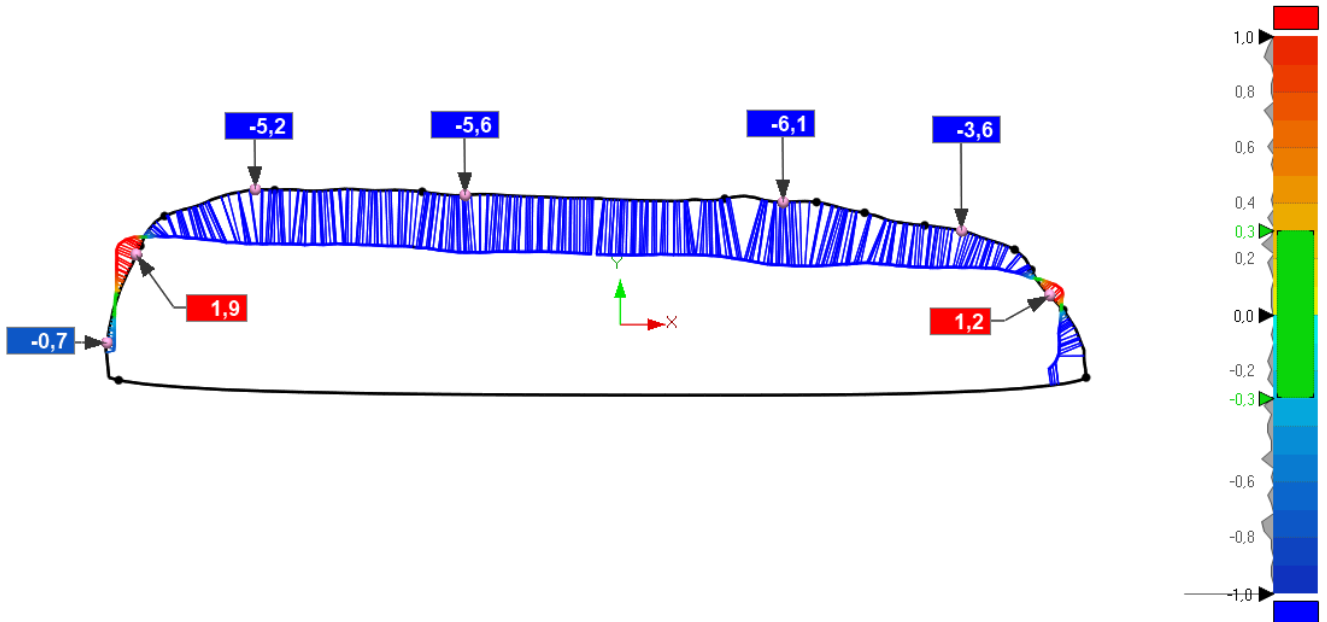
40. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 70 mm



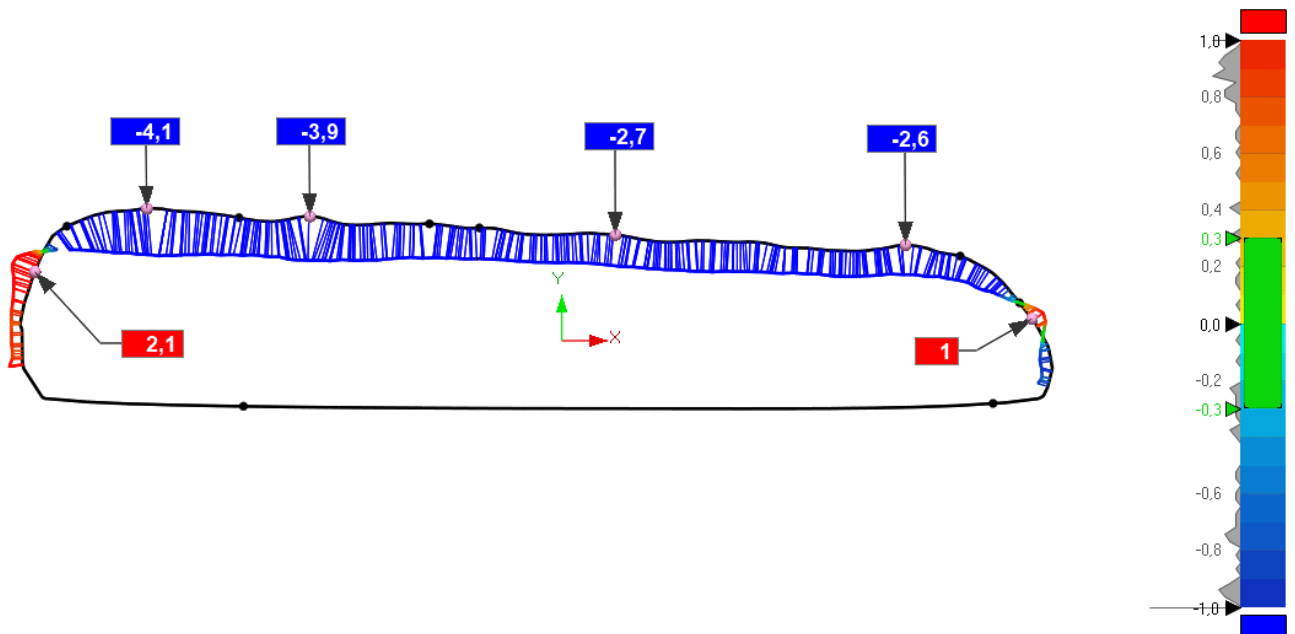
41. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 81 mm



42. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 91 mm

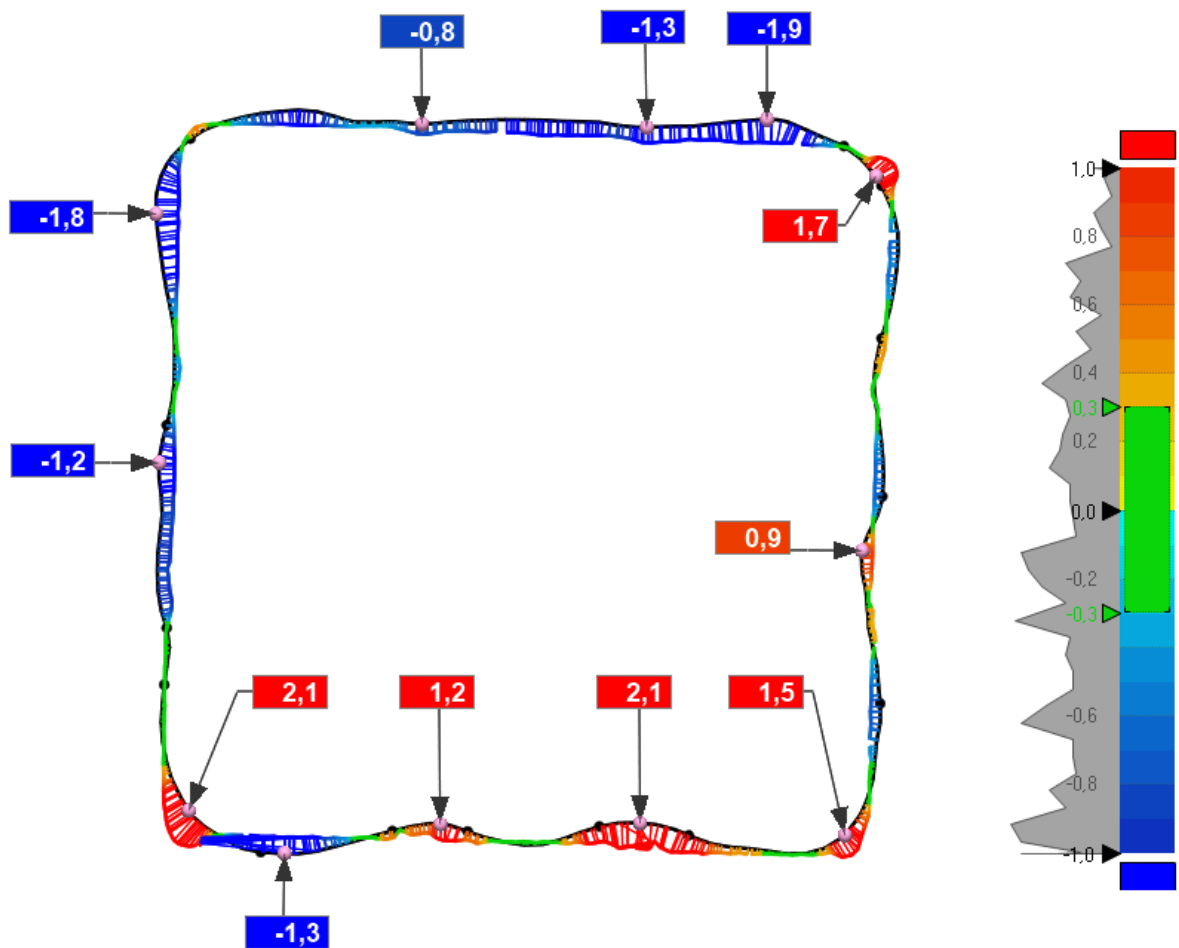


43. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 100 mm

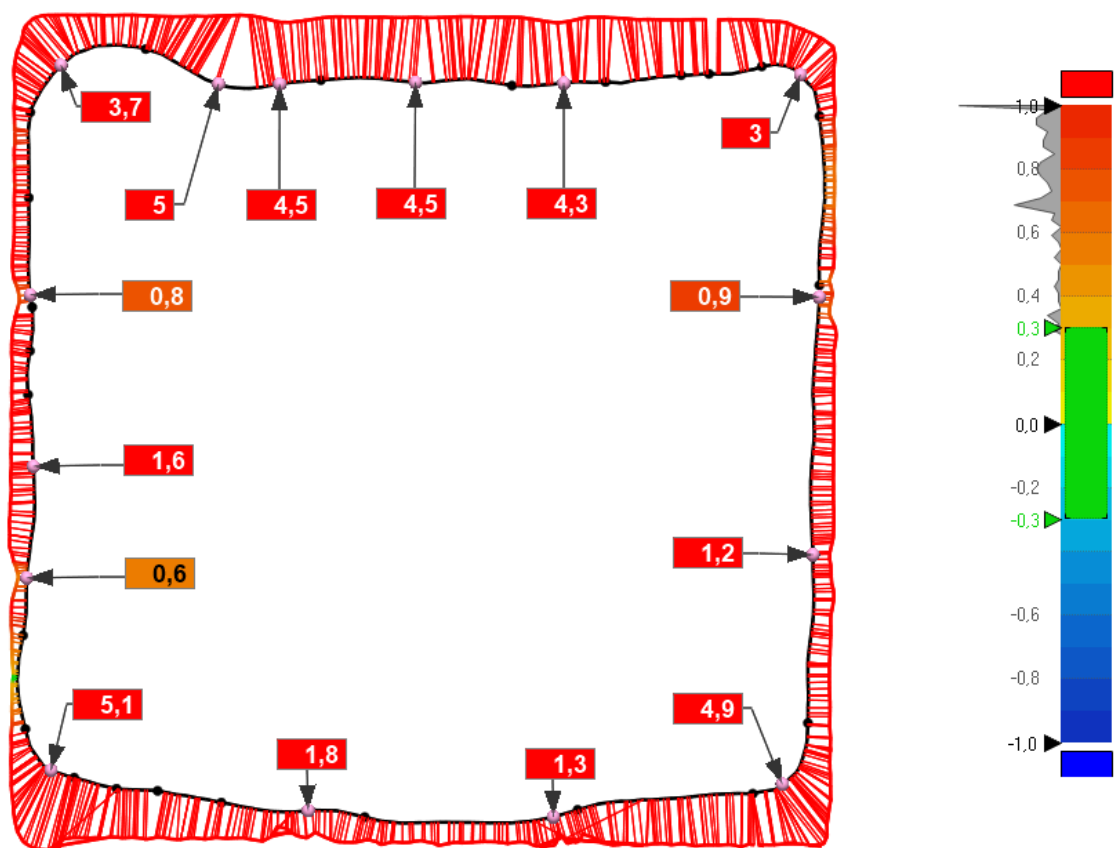


44. ábra: Maja dombormű modellek összehasonlítása, Z tengely, 107 mm

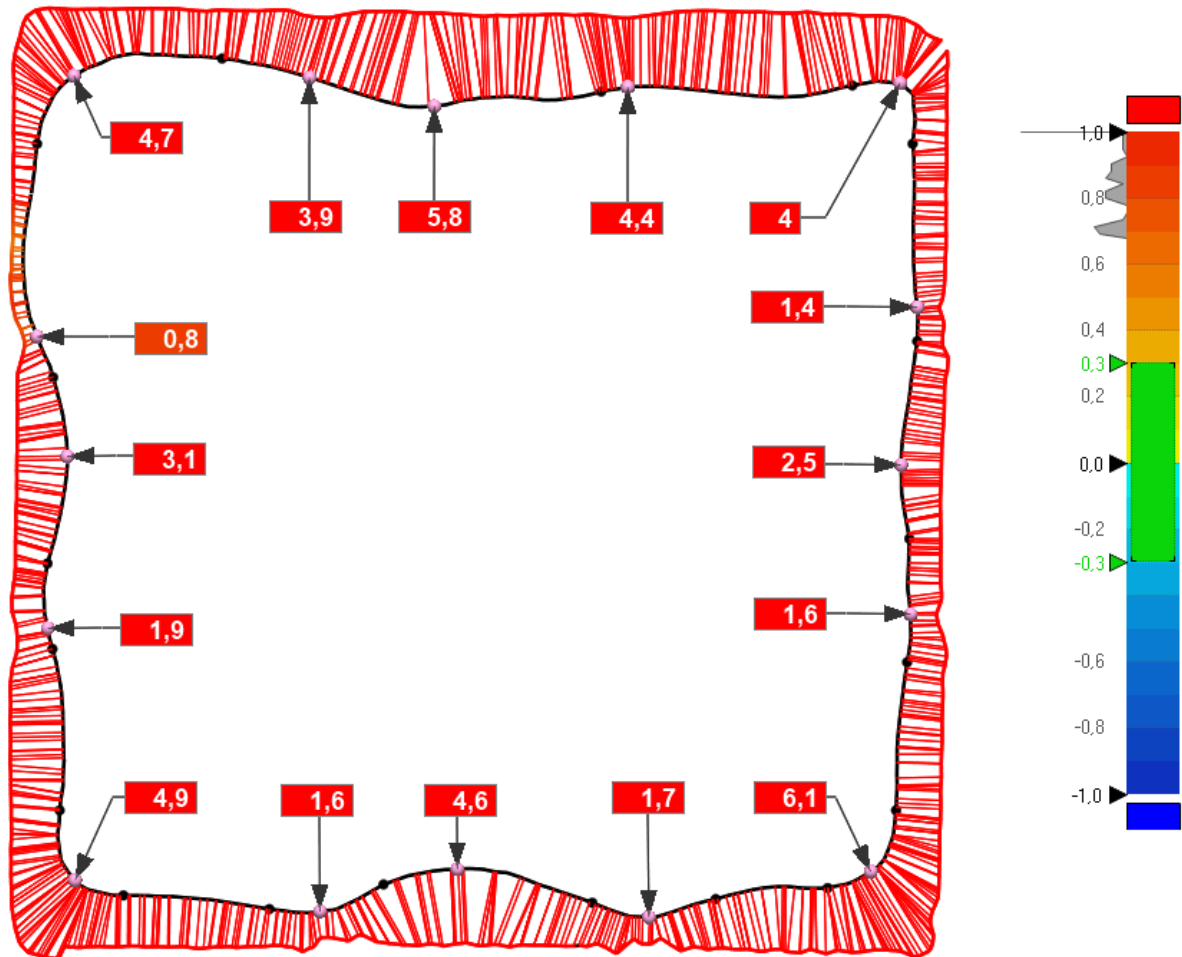
Rubik-kocka modelljeinek összehasonlítása:



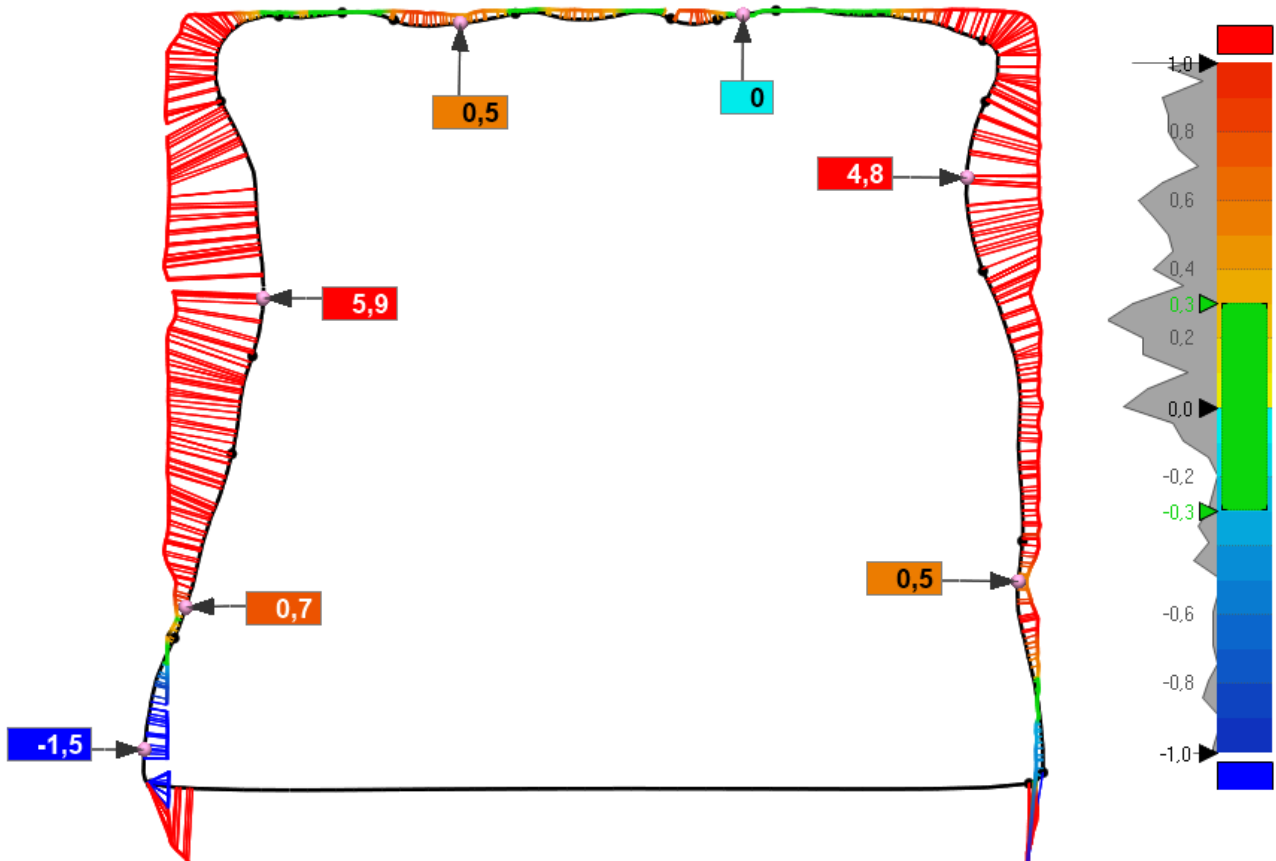
45. ábra: Rubik-kocka modellek összehasonlítása, Y tengely, 0 mm



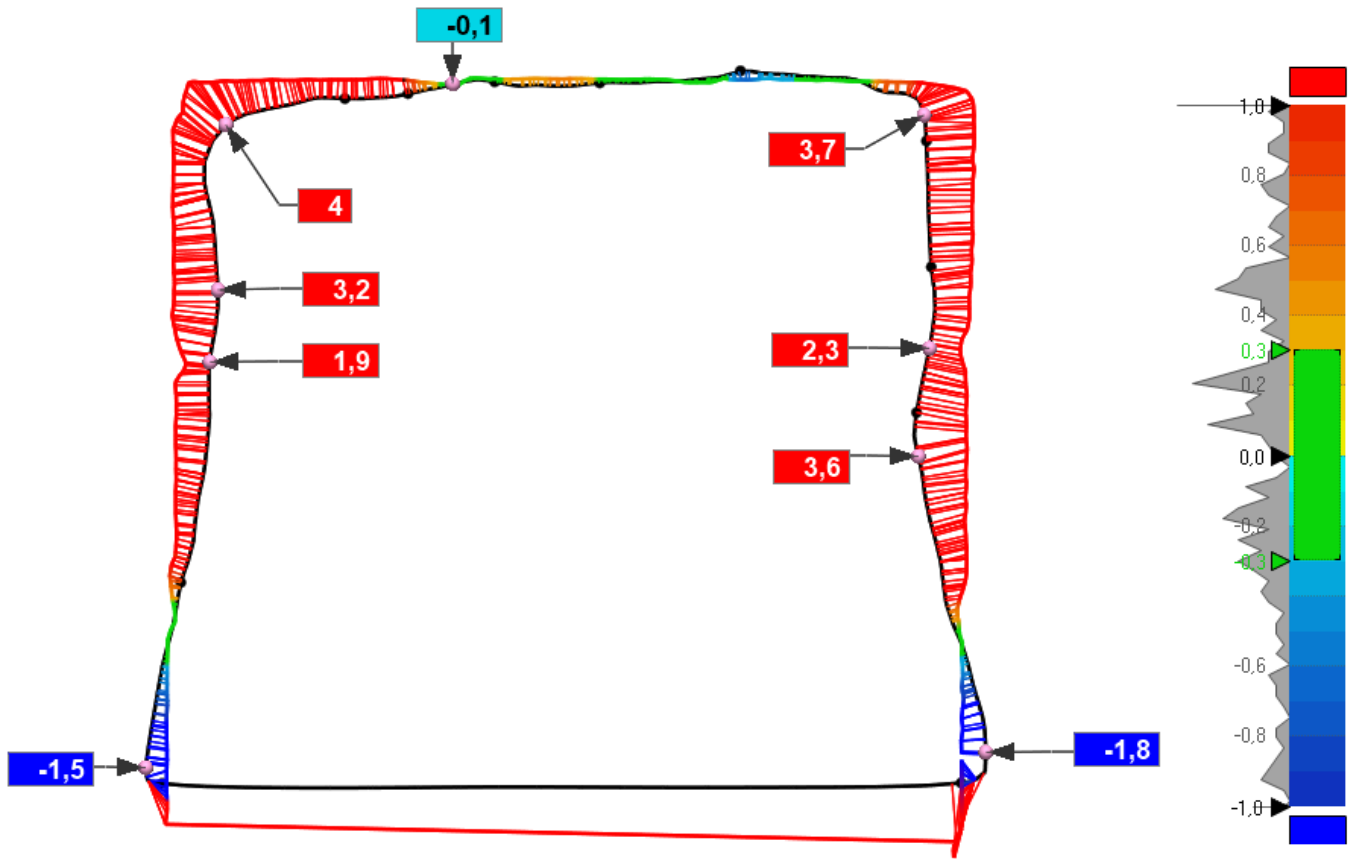
46. ábra: Rubik-kocka modellek összehasonlítása, Y tengely, 18 mm



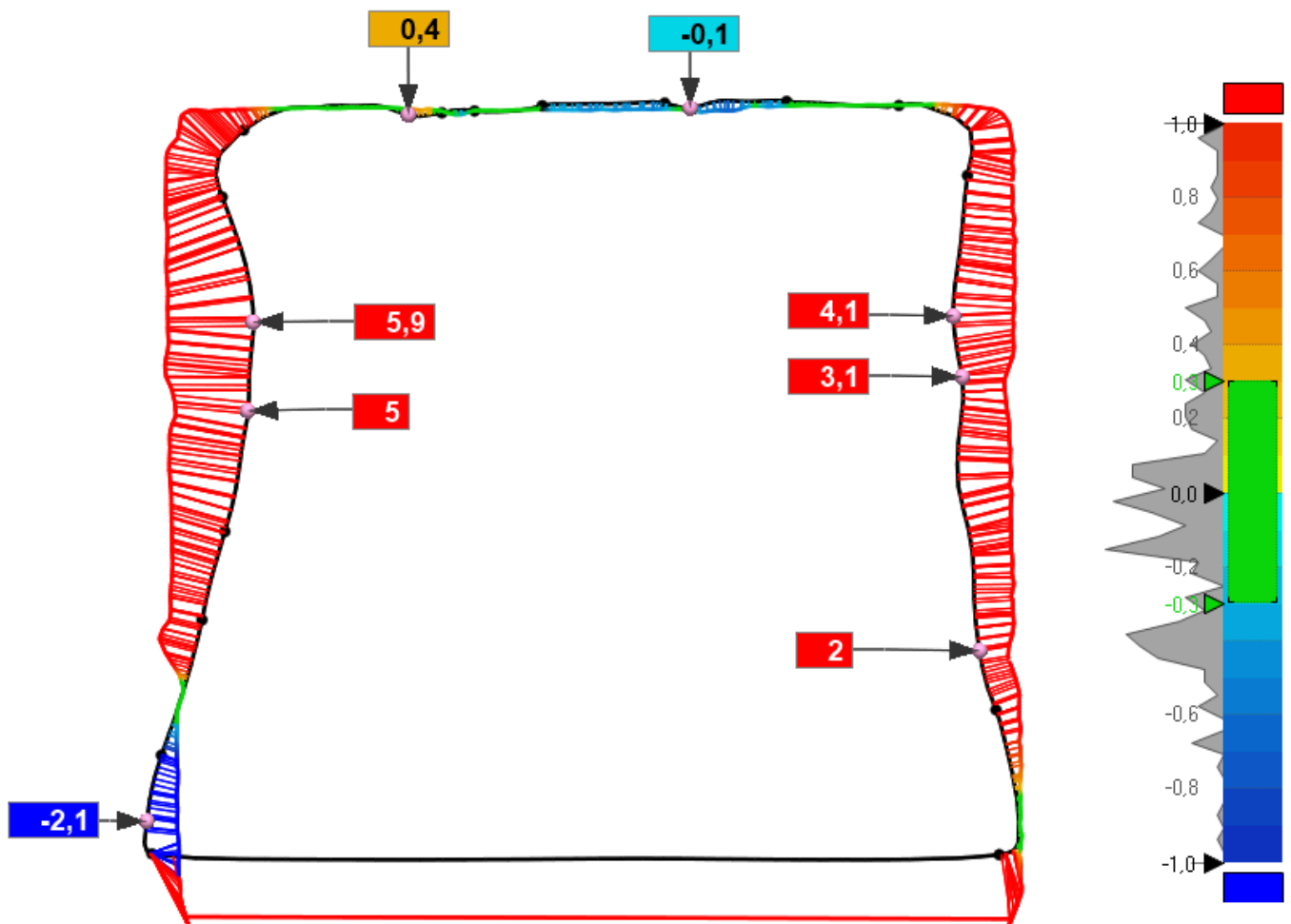
47. ábra: Rubik-kocka modellek összehasonlítása, Y tengely, 36 mm



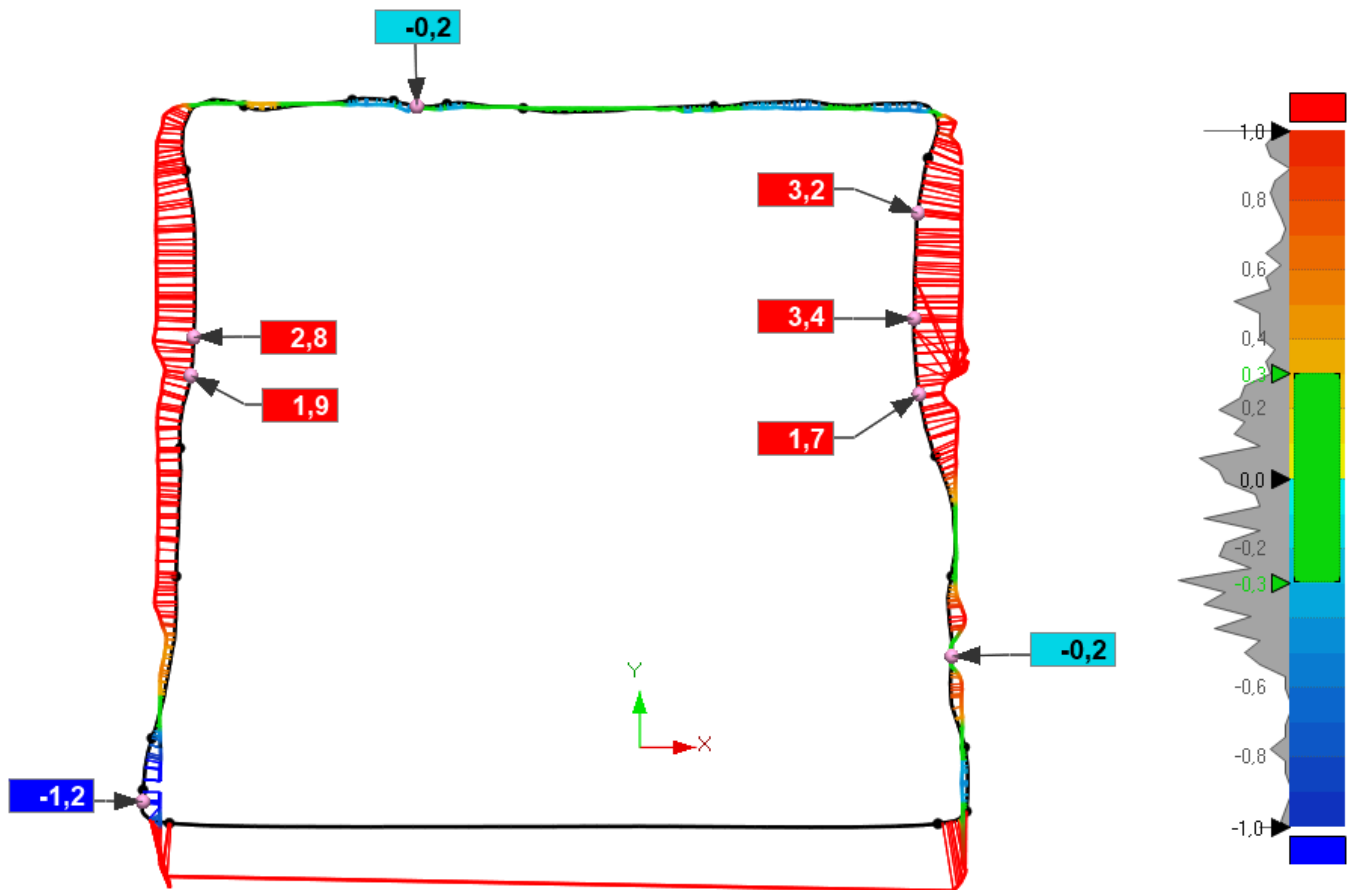
48. ábra: Rubik-kocka modellek összehasonlítása, X tengely, 5 mm



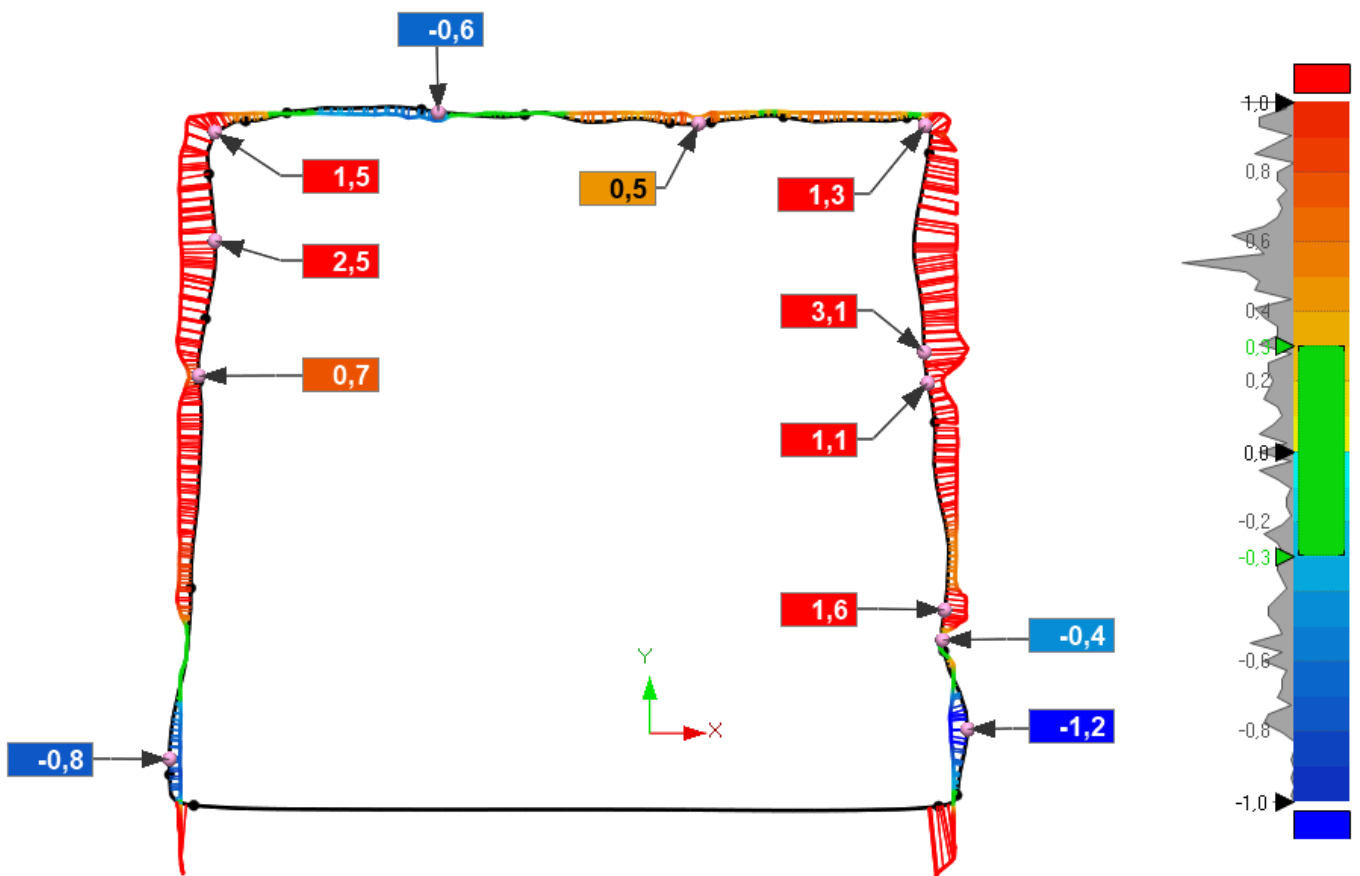
49. ábra: Rubik-kocka modellek összehasonlítása, X tengely, 15 mm



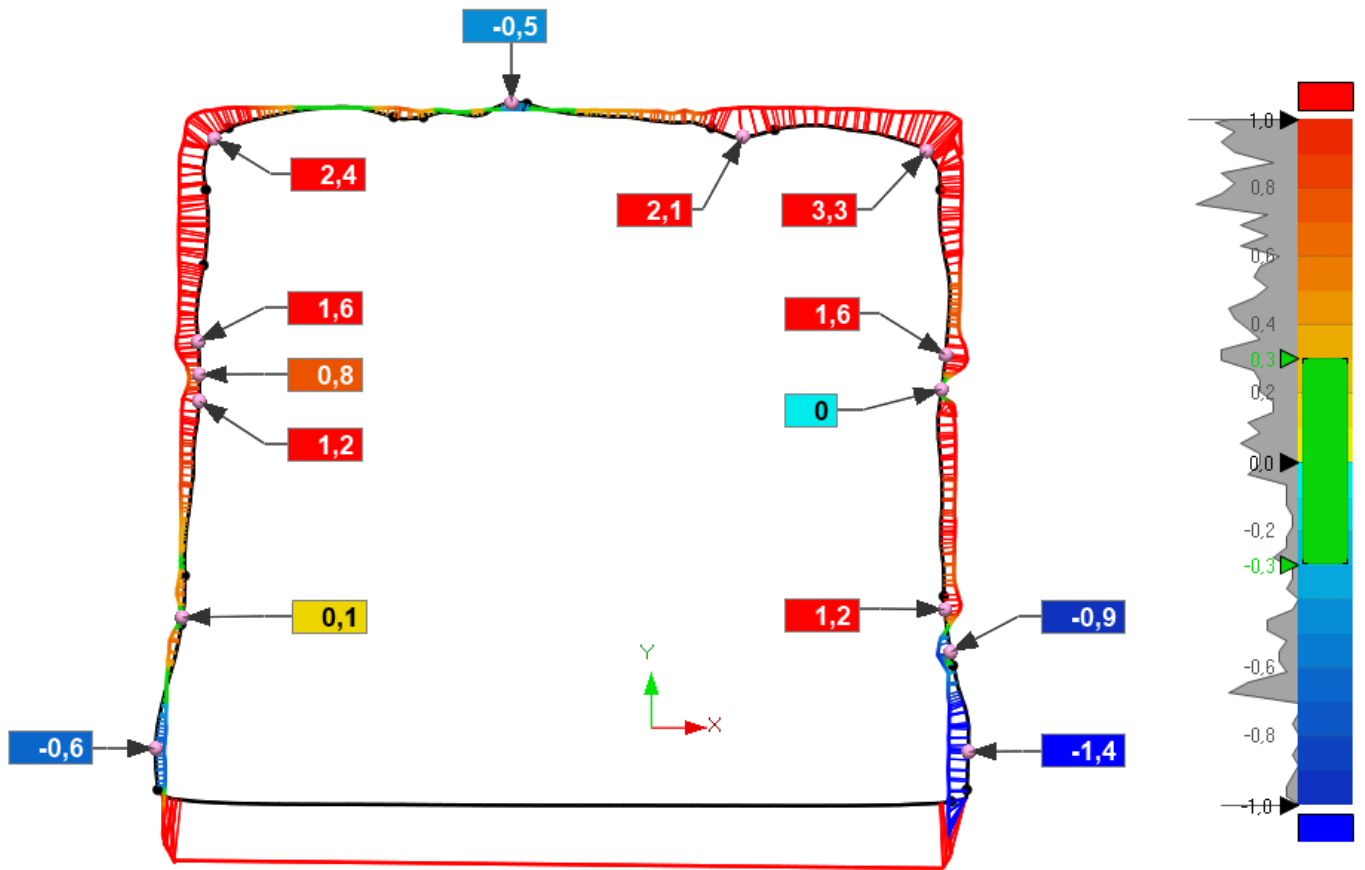
50. ábra: Rubik-kocka modellek összehasonlítása, X tengely, 33 mm



51. ábra: Rubik-kocka modellek összehasonlítása, Z tengely, 35 mm



52. ábra: Rubik-kocka modellek összehasonlítása, Z tengely, 54 mm



53. ábra: Rubik-kocka modellek összehasonlítása, Z tengely, 73 mm