



**DEBRECENI EGYETEM
MŰSZAKI KAR
GÉPÉSZMÉRNÖKI TANSZÉK**

UNIVERSITY OF DEBRECEN
FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF MECHANICAL
ENGINEERING

**PC/ABS ANYAGÚ FRÖCCSÖNTÖTT
ALKATRÉSZ GEOMETRIAI
OPTIMALIZÁLÁSA BESZÍVÓDÁSOK
CSÖKKENTÉSÉRE SZIMULÁCIÓS
MÓDSZEREKKEL**

SZAKDOLGOZAT

Balogh Sámuel

Gépészeti szimulációs szakmérnök

Debrecen

2026

(ide kell bekötni az eredeti feladat kiíró lapot)

NYILATKOZATOK

Debrecen, 2026.05.05

Elfogadási nyilatkozat

Ezen szakdolgozat a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Gépészmérnöki Tanszéke által a szakdolgozat feladatokra előírt valamennyi tartalmi és formai követelménynek, továbbá a feladatkiírásban előírtaknak maradéktalanul eleget tesz. E szakdolgozatot a bírálatra és nyilvános előadásra alkalmasnak tartom.

A beadás időpontja: 2026.05.07

.....
tanszéki konzulens

Tartalom

Jelölések jegyzéke.....	VI
1 Bevezetés.....	1
2 Az EndCap alkatrész tervezési szempontjai és konstrukciós kötöttségei	3
2.1 Funkcionális követelmények és beépítési környezet	3
2.2 Befoglaló méretek és szerelési kötöttségek.....	4
2.3 Rögzítési koncepció és csatlakozó geometria	5
2.4 Szerkezeti merevítés és panelgeometriai követelmények	5
2.5 Anyagválasztás és ragasztástechnológiai szempontok.....	6
2.6 Bordázott kialakítás és falvastagsági kompromisszumok.....	6
2.7 Beszállítói és szerszámgyártási egyeztetések.....	7
2.8 Jóváhagyási folyamat és esztétikai kockázatok	7
2.9 A további vizsgálatok célja	8
3 Fröccsöntési technológia és a beszívódások kialakulásának mérnöki elemzése .	9
3.1 A fröccsöntés technológiai szerepe	9
3.2 A fröccsöntési ciklus főbb szakaszai.....	9
3.3 Anyagtani háttér: zsugorodás és térfogatváltozás	11
3.4 A beszívódás fogalma és megjelenési formája	11
3.5 A beszívódások fő okai	12
3.6 Geometriai tényezők: falvastagság, bordák és csomópontok	13
3.7 Technológiai paraméterek hatása a beszívódásra	14
3.8 Szerszámkiakítás és beömlőrendszer szerepe	15
3.9 Fröccsöntési szimuláció szerepe a beszívódások vizsgálatában	16
3.10 Optimalizálási szemlélet endcap alkatrész esetén.....	17
3.11 Mérnöki következtetések	17
4 A kiindulási geometria fröccsöntési szimulációs vizsgálata.....	19
4.1 A szimuláció célja és értékelési módszere	19
4.2 Anyagmodell és alapanyag-viselkedés	19
4.3 Szimulációs modell, hálózás és technológiai beállítások.....	21
4.4 Falvastagság-eloszlás és előzetes geometriai kockázatok.....	24
4.5 Kitöltési folyamat és ömledékhőmérséklet	24
4.6 Nyomásviszonyok, utánnyomás és záróerő	26
4.7 Hűlés, maradó olvadt mag és térfogati zsugorodás.....	28
4.8 Hegedési vonalak és felületi megjelenés.....	29
4.9 Vetemedési és deformációs eredmények	30

4.10 Kritikus területek azonosítása	32
4.11 Mérnöki következtetések a kiindulási geometriára.....	32
5 Geometriai módosítások és a módosított geometria szimulációs vizsgálata	34
5.1 A geometriai módosítás célja és mérnöki elve.....	34
5.2 Hátoldali falvastagság csökkentése	35
5.3 Anyagtömeg-csökkentés a csap környezetében	36
5.4 Bordafalak módosítása és gyárthatósági szempontok.....	37
5.5 A módosított modell szimulációs beállításai.....	37
5.6 Kitöltési folyamat és ömledékhőmérséklet a módosított geometrián	38
5.7 Nyomásviszonyok, beömlőnyomás és záróerő	40
5.8 Utánnnyomás, alkatrésztömeg és hűlési állapot.....	42
5.9 Térfogati zsugorodás és beszívódási eredmények	43
5.10 Vetemedési és deformációs eredmények	45
6 Eredmények összehasonlítása és mérnöki értékelése	47
6.1 Eredeti és módosított geometria összehasonlítása	47
6.2 A geometriai módosítás eredményessége	48
6.3 Gyárthatósági és funkcionális értékelés	48
6.4 Következtetések	49
6.5 Összefoglalás.....	50
Irodalomjegyzék.....	51

Jelölések jegyzéke

T [s]	periódusidő
v [m/s]	sebességvektor
μ_0 [-]	tapadási súrlódási tényező
ρ [kg/m ³]	sűrűség

1 Bevezetés

A fröccsöntött műanyag alkatrészek alkalmazása a modern ipari termékek fejlesztésében széles körben elterjedt, mivel az eljárás lehetőséget biztosít összetett geometriájú, pontos és gazdaságosan gyártható alkatrészek előállítására. A végtermék minőségét nemcsak az alkalmazott anyag és a gyártástechnológiai paraméterek határozzák meg, hanem az alkatrész geometriai kialakítása is jelentős mértékben befolyásolja. Nem megfelelő design esetén a fröccsöntési folyamat során olyan gyártási hibák jelentkezhetnek, mint például beszívódások, vetemedés vagy felületi egyenetlenségek.

Jelen szakdolgozat szerzője Balogh Sámuel (Neptun kód: BQFSTV), a Debreceni Egyetem Műszaki Karának gépészeti szimulációs mérnök szakmérnöki képzésének hallgatója. A dolgozat elkészítésével párhuzamosan a Quantum Energy Technology Kft.-nél dolgozom termékfejlesztő projektvezetői munkakörben. Feladataim közé tartozik a fröccsöntött műanyag alkatrészek geometriai kialakításának tervezése, a fejlesztési folyamatok koordinálása, valamint a gyártástechnológiai szempontok érvényesítése a termékfejlesztés során. A szakdolgozat egy, a munkám során általam tervezett és fejlesztett PC/ABS anyagú fröccsöntött endcap alkatrész vizsgálatára épül. Az alkatrész jelenlegi kialakítása funkcionális felhasználásra megfelelő, azonban a Fröccsöntési szimulációs eredmények alapján a fröccsöntés során jelentős beszívódások kialakulása várható. Ezek a beszívódások a jelenlegi alkalmazásban még elfogadhatók, azonban az alkatrész későbbi, esztétikai követelményeket támaztó felhasználása esetén már nem felelnek meg a minőségi elvárásoknak.

A szakdolgozat célja az említett endcap geometriai kialakításának elemzése és optimalizálása fröccsöntési szimulációk segítségével. A dolgozat bemutatja a fröccsöntési technológia alapvető elméleti hátterét, a beszívódások kialakulásának okait, valamint a fröccsöntő szerszám felépítésének főbb szempontjait. Ezt követően szimulációs eredmények alapján vizsgálja, hogy a geometriai módosítások milyen irányban és milyen mértékben képesek csökkenteni a

beszívódásokat, miközben az alkatrész gyárthatósága és funkcionális megfelelése megmarad.

A dolgozat célja egy gyakorlati, ipari környezetből származó fejlesztési feladat bemutatása, amely jól szemlélteti a termékdesign, a fröccsöntési technológia és a szimulációs módszerek közötti szoros összefüggéseket.

Főbb műszaki adatok:

Alkatrész megnevezése: QG Bottom EndCap

Anyag: PC/ABS

Gyártástechnológia: Fröccsöntés

Névleges hossz: ~596 mm

Funkció: Véglezárás, szerkezeti merevítés

Kapcsolódás: Ragasztott kötés egy fém panelhez

Kritikus jellemző: Beszívódásra érzékeny bordázott geometria

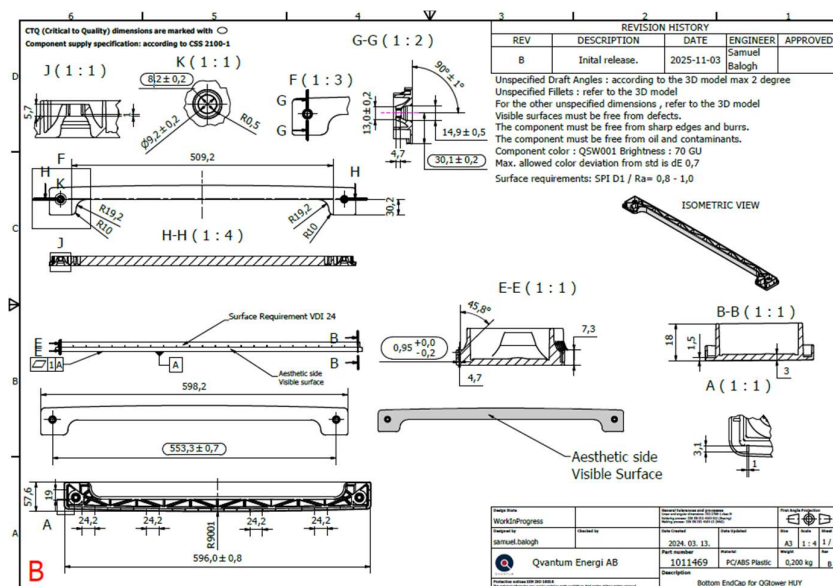
Felületminőség: Funkcionális / esztétikai (alkalmazástól függően)

Tömeg: 150 g

2 Az EndCap alkatrész tervezési szempontjai és konstrukciós kötöttségei

2.1 Funkcionális követelmények és beépítési környezet

Az EndCap alkatrész tervezése során elsődleges szempont volt annak meghatározása, hogy az alkatrész a végleges terméken belül milyen funkcionális, szerelési, geometriai és gyártástechnológiai követelményeknek kell megfeleljen. A konstrukciós mozgástér már a fejlesztés kezdeti szakaszában erősen korlátozott volt, mivel az alkatrész befoglaló méreteit a kapcsolódó front panel mérete, a végleges termékmagasság, valamint a készülék külső méretelőírásai határozták meg.



1. ábra. Az EndCap alkatrész 2D rajza. Forrás: saját készítésű kép.

Az alkatrész egyik alapvető feladata a front panel véglezárása és rögzítése. Emellett a kialakításnak hozzá kellett járulnia a szerkezet merevségéhez, biztosítania kellett a szerelhetőséget, valamint illeszkednie kellett a beszállító által alkalmazott fröccsöntési és szerszámgyártási technológiához. Ezek a követelmények együttesen határozták meg az alkatrész főbb méreteit és geometriai kialakítását.

2.2 Befoglaló méretek és szerelési kötöttségek

A végleges termékmagasság és a front panel mérete meghatározta azt a rendelkezésre álló teret, amelybe az EndCap alkatrésznek be kellett illeszkednie. A beépítési környezetből adódóan az alkatrész szélességi, magassági és befelé irányuló méretei csak korlátozottan voltak módosíthatók. A készülék hidraulikus tere közvetlenül az EndCap mögötti zónában helyezkedik el, ezért az alkatrész belső irányú méretnövelése csak nagyon keskeny sávban volt megengedhető.



2. ábra. A QG EndCap a panel alsó síkján elhelyezkedő műanyag lezáró elem. Forrás: saját készítésű kép.

A szerelési folyamat szintén jelentős geometriai kötöttséget jelentett. A tervezés során figyelembe kellett venni, hogy a front panelt milyen szöghelyzetben lehet a rögzítési pontra rávezetni, illetve milyen mozgástartomány szükséges az alkatrész fel- és leszereléséhez. A csatlakozó geometria kialakítása ezért nem kizárólag a beépített állapotból, hanem a szerelési mozgásból és a szükséges hozzáférhetőségből is következett.

2.3 Rögzítési koncepció és csatlakozó geometria

Az EndCap rögzítése csapos kapcsolaton keresztül valósul meg, ezért a belső csatlakozó geometria méretezését a csap átmérője, helyzete, valamint a szereléshez szükséges illesztési hézagok határozták meg. A csatlakozó méreteket úgy kellett kialakítani, hogy az alkatrész megfelelően felüljön a csapra, ugyanakkor a szerelés során ne okozzon túlzott illesztési ellenállást vagy befeszülést.

A fel- és leszerelés módja közvetlenül befolyásolta a csap környezetében kialakított belső geometriát. A választott geometriai megoldás célja az volt, hogy a rögzítés megfelelő stabilitást biztosítson, miközben az alkatrész a gyártási és szerelési tűrések mellett is biztonságosan szerelhető maradjon. Ez a kialakítás a szerelhetőség, a rögzítési merevség és a fröccsönthetőség közötti kompromisszumként értelmezhető.

2.4 Szerkezeti merevítés és panelgeometriai követelmények

Az EndCap a rögzítési funkción túl szerkezeti merevítő szerepet is betölt. A kapcsolódó fém panel közel 609 mm szélességű és megközelítőleg 2 m magasságú elem, ezért a véglezáró alkatrésznek a panel geometriai stabilitásához is hozzá kellett járulnia. A panel mérete, lemezzvastagsága és költséghatékony gyárthatósága miatt az EndCap kialakítása nem csupán lezáró elemként, hanem a szerkezet merevségét növelő alkatrészként is funkcionál.

A geometria kialakításánál figyelembe kellett venni a panel előírt ívét is, amelyet a konstrukcióban 8000 mm sugarú rádiusz jellemez. Az EndCap geometriáját úgy kellett kialakítani, hogy a végleges összeállításban támogassa a panel alakhelyességét és hozzájáruljon a kívánt külső megjelenés megtartásához. Ez a követelmény különösen fontos volt, mert az alkatrész geometriai merevsége közvetlenül befolyásolja a nagy méretű panel vizuális és szerkezeti stabilitását.

2.5 Anyagválasztás és ragasztástechnológiai szempontok

Az alkatrész a fém panelhez hot-melt, vagyis meleg ragasztós technológiával kerül rögzítésre. Az alapanyag kiválasztásánál ezért figyelembe kellett venni a ragasztási folyamat során fellépő hőterhelést is. A ragasztóanyag applikációs hőmérséklete megközelítőleg 180 °C, ezért olyan műanyag alapanyagra volt szükség, amely megfelelő hőállósággal, mérettartással és mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik.

A választás PC/ABS alapanyagra esett, mivel ez az anyag a szükséges műszaki tulajdonságok mellett gazdaságosan beszerezhető, fröccsöntéssel jól feldolgozható, és illeszthető a külső beszállító technológiai lehetőségeihez. Az anyagválasztásnál tehát nemcsak az elméleti anyagtulajdonságokat, hanem a beszállíthatóságot, az árképzést, a feldolgozhatóságot és a meglévő gyártói tapasztalatokat is figyelembe kellett venni.

2.6 Bordázott kialakítás és falvastagsági kompromisszumok

A geometriai koncepció kialakulását követően a merevítő bordázat meghatározása következett. A bordázott kialakításnál a vállalatnál korábban már alkalmazott, bevált geometriai megoldások szolgáltak kiindulási alapként. Ugyanakkor az alkatrész belső oldalán meg kellett tartani azt a rendelkezésre álló szabad teret, amely a szerelhetőséget és a kapcsolódó elemek megfelelő illeszkedését biztosítja.

A szűk beépítési tér ellenére az alkatrésznek megfelelő merevséget kellett biztosítani, ezért a szokásosnál nagyobb falvastagság alkalmazása vált szükségessé. Ez tudatos tervezési kompromisszumot jelentett: a nagyobb falvastagság kedvezően hatott az alkatrész merevségére és szerkezeti stabilitására, ugyanakkor fröccsöntéstechnológiai szempontból növelte a lokális anyaghalmozódások és ezzel együtt a beszívódások kialakulásának kockázatát.

A kezdeti fejlesztési szakaszban az alkatrész felületi minőségével kapcsolatban nem jelentkeztek kifejezetten szigorú esztétikai előírások. Emiatt a konstrukciós döntések során a funkcionális megfelelés, a merevség és a szerelhetőség elsőbbséget élvezett az optimális fröccsönthetőséggel szemben. Későbbi, látható felületen történő alkalmazás esetén azonban az esztétikai megjelenés már kritikus tényezővé válhat.

2.7 Beszállítói és szerszámgyártási egyeztetések

A fröccsöntő szerszám gyártását külső szállító végezte, a szerszám pedig kínai szerszámgyártó bevonásával készült el. A fejlesztési folyamat során a szállító és a szerszámgyártó több alkalommal egyeztetett az alkatrész gyárthatóságával kapcsolatban. A szerszámgyártó részéről több módosítási javaslat is érkezett, különösen azoknál a méreteknél és geometriai részleteknél, amelyek fröccsöntéstechnológiai vagy szerszámgyártási szempontból kockázatosnak bizonyultak.

Az alkatrészcsoporton előírt méretek egy része szigorú tűréssel készült. Amikor a szerszámgyártó egy adott méret tarthatóságával kapcsolatban kockázatot jelzett, meg kellett vizsgálni, hogy a kapcsolódó alkatrészekhez történő illeszkedés és az összeállítás működése mekkora méreteltérést enged meg. A folyamat során a szállítói gyárthatósági szempontok és a termékoldali konstrukciós követelmények között több esetben kompromisszumos megoldás született.

Ez a fejlesztési folyamat jól szemlélteti, hogy egy fröccsöntött műanyag alkatrész végleges kialakítása nem kizárólag konstrukciós döntések eredménye. A végleges geometria kialakításában a tervezés, a szerszámgyártás, a szállítói technológia, a minőségbiztosítás és a szerelhetőség szempontjai együttesen érvényesülnek.

2.8 Jóváhagyási folyamat és esztétikai kockázatok

A szerszám elkészülését követően megkezdődött a hivatalos jóváhagyási folyamat. Ebben a szakaszban még lehetőség nyílt a fröccsöntési paraméterek finomhangolására, valamint kisebb szerszámoldali és technológiai módosítások elvégzésére. A T0 és T1 próbadarabok ígéretes kialakítást és megjelenést mutattak, ugyanakkor az alkatrész befoglaló méretein és a külső megjelenéssel összefüggő részleteken további finomhangolásra volt szükség. Ezeket a módosításokat az alkatrész elfogadási jegyzőkönyvében rögzítettük.

A termék színének és egyes külső méreteinek finomhangolása később már Magyarországon, a szállító közreműködésével történt. Az alkatrész végleges elfogadása a szakdolgozat készítését megelőző időszakban történt meg. A gyártási jóváhagyást követően ugyanakkor a DM riport jelezte, hogy az alkatrész esztétikai szempontból nem minden felhasználási helyzetben tekinthető optimálisnak, mivel a fröccsöntés során jelentősebb beszívódási nyomok kialakulása várható.

2.9 A további vizsgálatok célja

A beszívódási kockázat különösen akkor jelent problémát, ha az alkatrész látható felületen kerül alkalmazásra, mivel ebben az esetben a felületi behúzóadások a termék megjelenését kedvezőtlenül befolyásolják. A szakdolgozat további részében ezért azt vizsgálom, hogy az eredeti konstrukció milyen geometriai okok miatt hajlamos beszívódások kialakulására, valamint milyen módosításokkal javítható az alkatrész esztétikai megjelenése.

A cél olyan geometriai változatok kidolgozása, amelyek csökkentik a lokális anyaghalmozódásokat és a beszívódási hajlamot, miközben megőrzik az EndCap eredeti funkcióját, szerelhetőségét, merevségét és gyárthatóságát. A későbbi szimulációs vizsgálatok ezt a mérnöki döntési folyamatot támogatják, és lehetőséget adnak az eredeti és módosított kialakítások összehasonlító értékelésére.

3 Fröccsöntési technológia és a beszívódások kialakulásának mérnöki elemzése

3.1 A fröccsöntés technológiai szerepe

A fröccsöntés a hőre lágyuló műanyagok egyik legelterjedtebb tömeggyártási technológiája. A technológia lényege, hogy a granulátum formájú alapanyagot a fröccsöntő gép plasztikáló egysége megolvasztja, majd az olvadt polimert nagy nyomással egy zárt szerszámműregbe juttatja. A szerszámban az anyag lehűl, megszilárdul, majd a kész alkatrész kidobásra kerül. A technológia különösen alkalmas nagy darabszámú, ismételhető minőségű, komplex geometriájú műanyag alkatrészek gyártására. A fröccsöntés ipari jelentőségét az adja, hogy egyetlen cikluson belül képes kialakítani a végleges alakot, miközben a ciklusidő, az anyagfelhasználás és a méretpontosság jól optimalizálható.

A fröccsöntött alkatrészek tervezése azonban nem kizárólag geometriai vagy funkcionális feladat. A tervezés során a gyárthatóságot, az anyagáramlást, a hűlést, a zsugorodást, a vetemedést és a felületi hibák kialakulását is figyelembe kell venni. Egy műanyag alkatrész CAD-modellje önmagában még nem garantálja, hogy az alkatrész stabilan, gazdaságosan és megfelelő minőségben gyártható. A fröccsöntési technológia sajátossága, hogy a geometria, az alapanyag, a szerszámkialakítás és a technológiai paraméterek szorosan összefüggnek egymással. Ezért a termékfejlesztés során a konstrukciós döntéseket gyártástechnológiai szemlélettel kell meghozni.

Az endcap jellegű alkatrészek esetében ez különösen fontos, mivel ezek az alkatrészek jellemzően egyszerre töltenek be mechanikai, pozicionáló, lezáró, esztétikai és szerelhetőségi funkciókat. A peremek, bordák, felfogató pontok, merevítések és csatlakozó felületek gyakran lokális falvastagság-növekedést okoznak. Ezek a vastagabb anyaghalmozódások a fröccsöntés során kedvezőtlen hűlési és zsugorodási viszonyokat eredményezhetnek, amelyek egyik leggyakoribb következménye a beszívódás.

3.2 A fröccsöntési ciklus főbb szakaszai

A fröccsöntési ciklus több egymásra épülő technológiai szakaszból áll. Ezek közül a legfontosabbak a plasztikálás, a kitöltés, az átkapcsolás, az utánnyomás, a hűtés és a kidobás. A ciklus egyes szakaszai nem függetlenek egymástól: a kitöltés

minősége befolyásolja az utánnyomás hatékonyságát, az utánnyomás hatása függ a kapu dermedési idejétől, a hűtés pedig meghatározza a zsugorodást, a méretpontosságot és a deformációkat.

A plasztikálás során a fröccsöntő gép csigája az alapanyagot megolvasztja, homogenizálja és előkészíti a következő lövéshez. A megfelelő olvadákhőmérséklet kulcsfontosságú, mert az anyag viszkozitását, folyóképességét és hőterhelését is meghatározza. Túl alacsony olvadákhőmérséklet esetén nőhet a kitöltési nyomásigény és a rövidfröccs kockázata, míg túl magas olvadákhőmérséklet esetén fokozódhat az anyag degradációja, a ciklusidő, valamint a zsugorodási hajlam.

A kitöltési fázisban az olvadt műanyag a beömlőrendszeren keresztül belép a szerszámüregbe. Ebben a szakaszban az anyagáramlás sebessége, az áramlási front alakja, a nyomásvesztés, a levegőkiszorítás és a hegedési vonalak kialakulása a legfontosabb tényezők. Az anyag a hidegebb szerszámfalakkal érintkezve azonnal elkezd hűlni, ezért az áramlási keresztmetszet folyamatosan változik. A szerszámüreg teljes kitöltése után a folyamat átvált az utánnyomási szakaszba.

Az utánnyomási szakasz a beszívódások szempontjából az egyik legkritikusabb technológiai rész. A polimer olvadék hűlés közben térfogatsökkenést szenved, vagyis zsugorodik. Az utánnyomás feladata, hogy a zsugorodó térfogatot további anyag bepréslésével kompenzálja, amíg a kapu vagy beömlési keresztmetszet le nem dermed. Ha az utánnyomás értéke, ideje vagy hatékonysága nem elegendő, a vastagabb részek belsejében anyaghiány alakulhat ki, amely a külső felületen beszívódásként, belső térben pedig akár zárványként vagy üregként jelentkezhet. Az Autodesk Moldflow hibaelemzési anyagai szerint [1] a túl korai kapudermedés, az alacsony utánnyomás, a rövid utánnyomási idő, a kedvezőtlen kapuhelyzet és a vastag lokális geometriák mind növelhetik a beszívódás kockázatát.

A hűtési szakaszban az alkatrész a szerszámban tovább hűl, amíg el nem éri azt a merevséget, amely mellett biztonságosan kidobható. A hűtés rendszerint a fröccsöntési ciklus leghosszabb része, ezért közvetlen hatása van a gyártási költségre és a ciklusidőre. Mérnöki szempontból fontos, hogy nemcsak az átlagos hűlési idő számít, hanem a hőmérséklet-eloszlás egyenletessége is. A lokális vastag részek lassabban hűlnek, emiatt később zsugorodnak, mint a vékonyabb falak. Ez a késleltetett zsugorodás a beszívódások és a vetemedés egyik fő oka.

3.3 Anyagtani háttér: zsugorodás és térfogatváltozás

A fröccsöntés során a műanyag alapanyag a magas hőmérsékletű, nyomás alatt lévő olvadékállapotból szilárd állapotba kerül. Ez a folyamat jelentős térfogatváltozással jár. A polimer térfogata függ a hőmérséklettől, a nyomástól és az anyag állapotától. Amikor az olvadék lehűl, a molekulaláncok mozgása csökken, az anyag sűrűsége nő, térfogata pedig csökken. Ezt nevezzük zsugorodásnak. A Moldflow szakirodalma kiemeli [3], hogy a műanyag olvadékból szilárd állapotba kerülésekor jelentős térfogatváltozás történik, amelyet az utánnnyomási szakasz csak korlátozott mértékben képes kompenzálni.

A zsugorodás mértéke anyagtípusonként eltérő. Az amorf és a részben kristályos polimerek eltérően viselkednek. Az amorf anyagok általában fokozatosabban dermednek, míg a részben kristályos anyagoknál a kristályosodás további térfogatsökkenést okozhat. Ezért például polipropilén, poliamid vagy PBT esetén a beszívódási és vetemedési hajlam más lehet, mint ABS vagy PC esetén. A pontos értékeléshez mindig az adott alapanyag adatlapját, p-v-T viselkedését és Moldflow anyagmodelljét kell figyelembe venni.

A zsugorodás nem önmagában probléma, hanem akkor válik hibaforrássá, ha az alkatrészben belül nem egyenletes. Egy egyszerű, azonos falvastagságú lap esetében a zsugorodás viszonylag homogén lehet. Ezzel szemben egy bordázott, felfogató fülekkel, csavaroszlopokkal, belső merevítésekkel és lokális vastagodásokkal rendelkező endcap esetében a különböző zónák eltérő sebességgel hűlnek. A vastagabb zónák tovább maradnak melegek, hosszabb ideig zsugorodnak, és nagyobb térfogatkompenzációt igényelnek. Amennyiben a kompenzáció nem megfelelő, a külső felület a belső térfogatsökkenés irányába behúzódhat.

3.4 A beszívódás fogalma és megjelenési formája

A beszívódás a fröccsöntött alkatrész felületén megjelenő lokális bemélyedés vagy enyhe kráterszerű alakhiba. Leggyakrabban vastag falrészek, bordák, csavaroszlopok, anyaghalmozódások, belső sarokkialakítások vagy nagyobb rádiuszok ellenoldalán jelentkezik. A beszívódás nem feltétlenül okoz azonnali funkcionális hibát, de rontja a felületi minőséget, az esztétikai megjelenést, valamint jelezheti a belső zsugorodási viszonyok kedvezőtlen alakulását. Súlyosabb esetben a beszívódás mellett belső üreg, méreteltérés vagy mechanikai gyengülés is kialakulhat.

A beszívódás kialakulása alapvetően a lokális térfogatvesztés következménye. Amikor a külső felületi réteg már megszilárdult, a vastagabb keresztmetszet belseje még meleg és zsugorodásra képes. A belső anyag térfogatsökkenése húzóhatást fejt ki a már kialakult külső héjra. Ha a külső héj még nem elég merev, vagy a belső zsugorodás mértéke jelentős, a felület befelé deformálódik. Ez hozza létre a beszívódást.

Fontos megkülönböztetni a beszívódást a vetemedéstől és a belső üregtől. A vetemedés az egész alkatrész vagy nagyobb szerkezeti rész alakváltozása, amelyet többnyire globális zsugorodási különbségek és belső feszültségek okoznak. A beszívódás ezzel szemben lokális felületi hiba. A belső üreg hasonló okból jöhet létre, mint a beszívódás, de akkor alakul ki, ha a külső héj már túl merev ahhoz, hogy befelé deformálódjon, ezért a térfogatvesztés az alkatrész belsejében üregként jelenik meg.

3.5 A beszívódások fő okai

A beszívódások kialakulásának egyik legfontosabb oka a nem egyenletes falvastagság. A fröccsöntött alkatrészek tervezésének alapelve az egyenletes falvastagságra való törekvés, mert ez segíti az egyenletes kitöltést, hűlést és zsugorodást. Az Autodesk műanyag alkatrésztervezési anyaga szerint [3] az egyenletes falvastagság csökkenti az egyenetlen hőmérséklet-, nyomás- és zsugorodási viszonyokat, ezáltal mérsékli a vetemedés és a felületi hibák kockázatát.

A második fő ok a lokális anyaghalmozódás. Ilyen anyaghalmozódás jöhet létre például túl vastag bordatőnél, csavaroszlopnál, erősítő bordák találkozásánál, nagy belső rádiuszoknál vagy hirtelen falvastagság-változásoknál. A BASF fröccsöntési hibákat tárgyaló műszaki anyaga [4] kifejezetten kiemeli, hogy a bordák és rögzítő oszlopok által létrehozott hirtelen falvastagság-változások beszívódáshoz és fényességbeli eltérésekhez vezethetnek. A javasolt megoldás az anyaghalmozódások kerülése, az egyenletesebb falvastagság, valamint a vastagabb zónákhoz közeli beömlési pont alkalmazása.

A harmadik ok az elégtelen utánnnyomás. A kitöltés után a polimer még zsugorodik, ezért az utánnnyomásnak biztosítania kell az anyagpótlást. Ha az utánnnyomás túl alacsony, túl rövid ideig tart, vagy a kapu túl korán lezár, akkor a nyomás nem jut el hatékonyan a kritikus zónákba. Ilyenkor a vastagabb keresztmetszetekben anyaghiány alakulhat ki. Az Autodesk Moldflow dokumentációja szerint [1] az alacsony utánnnyomás és a korai kapuzáródás kifejezetten jellemző oka a beszívódásoknak és belső üregeknek.

A negyedik ok a kedvezőtlen kapuhelyzet. Ha a beömlési pont messze van a vastagabb, nagyobb térfogatkompenzációt igénylő zónától, akkor a nyomásvesztés miatt az utánnyomás hatása gyengülhet. A vékonyabb szakaszok hamarabb ledermedhetnek, így elzárhatják az anyagpótlás útját a vastagabb régiók felé. Emiatt a kapuhelyzetet nemcsak kitöltési szempontból, hanem utánnyomási és zsugorodási szempontból is értékelni kell.

Az ötödik ok a nem megfelelő hűtés. A szerszám hűtőrendszerének célja nem pusztán az alkatrész lehűtése, hanem a hőelvonás egyenletességének biztosítása. Ha egy zóna rosszul hűtött, vagy a geometria miatt lokális hőtorlódás alakul ki, akkor az adott terület hosszabb ideig marad meleg. Ez növeli a helyi zsugorodás mértékét, és beszívódást okozhat. A Moldflow-alapú elemzések éppen ezért nemcsak a kitöltést, hanem a hűlést, a térfogati zsugorodást és a beszívódási indexet is vizsgálják.

3.6 Geometriai tényezők: falvastagság, bordák és csomópontok

A beszívódás csökkentésének leghatékonyabb módja sok esetben nem a technológiai paraméterek módosítása, hanem a geometria újragondolása. Ennek oka, hogy a beszívódás gyökéroká gyakran maga az anyageloszlás. Ha egy alkatrészen nagy lokális tömegek találhatók, akkor ezek hőtechnikai és zsugorodási szempontból kedvezőtlenek maradnak akkor is, ha a folyamatparamétereket optimalizálják.

A falvastagságot célszerű az alkatrész teljes felületén minél egyenletesebben tartani. Hirtelen vastagságváltások helyett fokozatos átmeneteket, rádiuszokat és lekönnyítéseket kell alkalmazni. Ugyanakkor a rádiuszok méretezésénél is körültekintően kell eljárni, mert a túl nagy belső rádiusz a csatlakozási zónában lokális anyagvastagodást okozhat. Emiatt a sarokkialakítás egyszerre mechanikai és fröccsöntéstechnológiai kérdés.

A bordák alkalmazása szükséges lehet a merevség növelésére, de a bordák méretezése kritikus. Általános tervezési irányelv, hogy a borda töve ne legyen az alapfal teljes vastagságával azonos, mert ez lokális vastagodást okoz. Több műanyag alkatrésztervezési irányelv szerint a bordavastagságot jellemzően az alapfal körülbelül 40–60%-a, illetve bizonyos esetekben 50–75%-a közé célszerű választani a beszívódási kockázat csökkentése érdekében. A pontos arány az anyagtól, a felületi követelménytől, a bordamagasságtól és a gyártási feltételektől függ.

Endcap jellegű alkatrésznél külön figyelmet igényelnek a bordák találkozási pontjai. Ha több borda egy csomópontba fut össze, akkor a névleges falvastagsághoz képest jelentős tömegnövekedés jön létre. A külső felületen ez gyakran látható beszívódásként jelentkezik. Ilyen esetekben célszerű a bordák eltolása, megszakítása, keresztmetszetük csökkentése vagy a csomópont lekönnyítése. A cél nem feltétlenül a bordák megszüntetése, hanem a merevség és az anyageloszlás közötti egyensúly megtalálása.

A csavaroszlopok és rögzítő pontok szintén gyakori beszívódási források. Egy tömör vagy túl vastag oszlop lassan hűl, és nagy zsugorodási tömeget jelent. Ezt általában magozással, belső furattal, vékonyabb falú oszlop kialakítással, valamint megfelelő bordakapcsolatokkal lehet javítani. A rögzítő funkciót úgy kell megtartani, hogy közben az anyagtömeg ne koncentrálódjon egyetlen pontba.

3.7 Technológiai paraméterek hatása a beszívódásra

A geometriai optimalizálás mellett a fröccsöntési paraméterek is jelentős hatással vannak a beszívódásokra. A legfontosabb paraméterek közé tartozik az olvadákhőmérséklet, a szerszámhőmérséklet, a kitöltési sebesség, az átkapcsolási pont, az utánnyomás nagysága, az utánnyomási idő és a hűtési idő.

Az olvadákhőmérséklet növelése általában javítja az anyag folyóképességét, de növelheti a lehüléshez szükséges időt és a zsugorodási hajlamot. Ha az anyag túl sokáig marad meleg állapotban a vastagabb zónákban, a belső zsugorodás intenzívebb lehet. Ezért az olvadákhőmérsékletet nem célszerű kizárólag a könnyebb kitöltés érdekében növelni; mindig vizsgálni kell a hűlésre, ciklusidőre és felületi hibákra gyakorolt hatását.

A szerszámhőmérséklet szintén kettős hatású. Magasabb szerszámhőmérséklet javíthatja a felületi leképzést és csökkentheti a belső feszültségeket, ugyanakkor lassíthatja a hűlést. Alacsonyabb szerszámhőmérséklet rövidítheti a ciklusidőt, de kedvezőtlen áramlási vagy felületi hibákat okozhat. Beszívódások esetén különösen fontos a szerszám hőmérséklet-eloszlásának egyenletessége, nem csupán az átlagos hőmérséklet.

Az utánnyomás a beszívódás csökkentésének egyik legfontosabb folyamatszintű eszköze. Az utánnyomás növelése több anyagot képes bejuttatni a zsugorodó zónákba, ezáltal csökkentheti a beszívódás mélységét. Ugyanakkor az utánnyomás nem korlátlanul növelhető. Túl magas utánnyomás belső feszültséget, sorjaképződést, méreteltérést vagy túlzott tömegnövekedést okozhat. Az Autodesk

validációs anyagaiban [2] a beszívódási értékeket különböző utánnyomási szintek mellett vizsgálták, ami mutatja, hogy a jelenség szoros kapcsolatban áll az utánnyomási profillal.

Az utánnyomási idő akkor hatékony, ha legalább addig tart, amíg a kapu még nem dermedt le teljesen. Ha a kapu már lezárt, további utánnyomás alkalmazása érdemben nem juttat több anyagot az alkatrészbe. Ezért a kapudermedési idő meghatározása alapvető fontosságú. A fröccsöntési szimulációk egyik gyakorlati haszna, hogy képesek becsülni, mely zónák dermednek le korán, hol szakad meg az utánnyomás hatása, és mely területeken marad magas beszívódási kockázat.

A hűtési idő növelése bizonyos esetekben mérsékelheti a kidobás utáni deformációkat, de önmagában nem mindig szünteti meg a beszívódást. Ha a beszívódás oka a lokális anyaghalmozódás és az elégtelen anyagpótlás, akkor a hosszabb hűtési idő inkább a ciklusidőt növeli, miközben a hiba továbbra is megmaradhat. Ezért a hűtési idő módosítását mindig a geometriai és utánnyomási viszonyokkal együtt kell értelmezni.

3.8 Szerszámkialakítás és beömlőrendszer szerepe

A fröccsöntő szerszám kialakítása meghatározza az anyag áramlási útját, a nyomásátadást, a hőelvonást és az alkatrész kidobhatóságát. A beszívódások szempontjából különösen fontos a beömlési pont helye, a beömlő keresztmetszete, a folyási út hossza, a hűtőkörök elhelyezkedése és a szerszám hőegyensúlya.

A kapuhelyzetet célszerű úgy megválasztani, hogy az anyagáramlás kiegyensúlyozott legyen, a kritikus vastagabb zónák pedig megfelelő utánnyomást kapjanak. Ha a kapu túl kicsi vagy túl korán dermed, akkor a nyomáskompenzáció megszűnik, mielőtt a vastagabb részek zsugorodása lezárulna. A BASF feldolgozási útmutatója például kiemeli [5], hogy megfelelően nagy kapuk szükségesek az utánnyomás biztosításához és a beszívódások elkerüléséhez.

A beömlőrendszer méretezése szintén fontos. A túl szűk vagy kiegyensúlyozatlan beömlőrendszer nagy nyomásvesztést okozhat. Ennek következtében az utánnyomás a gépoldalon ugyan megfelelőnek tűnhet, de a kritikus alkatrész-zónákban már nem érvényesül kellő mértékben. Többfészkés szerszám esetén ez még összetettebb probléma, mert az egyes fészkek kitöltése és utánnyomása eltérhet.

A hűtőrendszer feladata, hogy az alkatrész hőmérsékletét kontrolláltan és lehetőleg egyenletesen csökkentse. A hűtőcsatornák helyzete, átmérője, távolsága, áramlási sebessége és a szerszámbeépítések hővezetése mind befolyásolja a lokális

hőmérsékletet. Ha egy vastagabb endcap-zóna közelében nem megfelelő a hőelvonás, akkor hőtorlódás alakul ki. Ez nemcsak beszívódást, hanem hosszabb ciklusidőt és méretinstabilitást is eredményezhet.

3.9 Fröccsöntési szimuláció szerepe a beszívódások vizsgálatában

A fröccsöntési szimuláció célja, hogy a gyártás előtt előrejelezze azokat a technológiai és geometriai kockázatokat, amelyek a valós szerszámpróbán hibaként jelentkezhetnek. A Moldflow és hasonló CAE-rendszerek képesek vizsgálni az áramlási frontot, a kitöltési időt, a nyomásigényt, a hegedési vonalakat, a légzárványokat, a hőmérséklet-eloszlást, a térfogati zsugorodást, a vetemedést és a beszívódási hajlamot. Az Autodesk Moldflow ismertetői szerint [7] a szoftver alkalmas potenciális hibák, például hegedési vonalak, légzárványok és beszívódások előrejelzésére, majd a konstrukció és a szerszámkialakítás módosításának támogatására.

A beszívódások elemzésénél a szimuláció nem egyszerűen azt mutatja meg, hogy „lesz-e hiba”, hanem segít megérteni a hiba okát. Például láthatóvá teheti, hogy egy adott zónában magas a térfogati zsugorodás, túl magas a hőmérséklet a hűtés végén, nem jut el az utánnyomás, vagy a kapu túl korán dermed. Ez a mérnöki döntéshozatalban rendkívül hasznos, mert a geometriai módosítás célzottan, nem próbálgatással végezhető.

Egy endcap optimalizálási feladatban a szimulációs munkafolyamat célszerűen több változat összehasonlítására épül. Először a kiinduló geometriát kell vizsgálni, majd azonosítani kell a beszívódásra hajlamos zónákat. Ezután módosított geometriákat lehet létrehozni: például bordavastagság-csökkentéssel, bordák áthelyezésével, csomópontok lekönnyítésével, falvastagság-átmenetek javításával vagy csavaroszlopok magozásával. A változatokat azonos vagy kontrolláltan módosított technológiai paraméterek mellett kell összehasonlítani, hogy a geometriai hatás elkülöníthető legyen.

A szimulációs eredmények értékelésénél nem elegendő kizárólag a beszívódási térképet vizsgálni. A módosítások hatással lehetnek a kitölthetőségre, a hegedési vonalakra, a nyomásigényre, a vetemedésre és a merevségre is. Egy geometriai módosítás akkor tekinthető mérnökiileg sikeresnek, ha csökkenti a beszívódást, miközben nem okoz új, súlyosabb gyártási vagy funkcionális problémát.

3.10 Optimalizálási szemlélet endcap alkatrész esetén

Az endcap geometriai optimalizálásának első lépése a kritikus funkciók azonosítása. Meg kell határozni, mely felületek esztétikailag kritikusak, mely méretek funkcionálisak, hol vannak szerelési kapcsolatok, hol szükséges merevség, és mely részek módosíthatók szabadabban. Ez azért fontos, mert a beszívódás csökkentése gyakran anyagelvétellel jár, ami befolyásolhatja a mechanikai viselkedést.

A második lépés a falvastagsági térkép elemzése. A CAD-modell alapján ellenőrizni kell, hol találhatók a névleges falvastagsághoz képest jelentősen vastagabb részek. Ezek a zónák elsődleges beszívódási kockázatot jelentenek. Külön figyelmet érdemelnek a bordatövek, peremek, sarokcsomópontok, felfogató pontok és olyan helyek, ahol több geometriai elem egyesül.

A harmadik lépés a szimulációs alapállapot létrehozása. A kiinduló modellt a tervezett alapanyaggal, kapuhelyzettel, szerszámhőmérséklettel, olvadáshőmérséklettel, kitöltési idővel és utánnyomási profillal kell vizsgálni. Az alapállapot célja, hogy viszonyítási pontot adjon. A későbbi változatok eredményeit ehhez kell hasonlítani.

A negyedik lépés a célzott geometriai módosítás. Ha például a szimuláció magas beszívódási kockázatot mutat egy borda ellenoldalán, akkor nem általános „anyagcsökkentést” kell végezni, hanem a bordató vastagságát, a csatlakozási rádiuszt, a bordamagasságot és a bordák számát kell mérnökiileg értékelni. Ha a hiba egy csavaroszlopnál jelentkezik, akkor magozás, falvastagság-csökkentés vagy a merevítőbordák átalakítása lehet célravezető.

Az ötödik lépés az eredmények összehasonlítása. A beszívódás mélysége vagy relatív kockázata mellett vizsgálni kell a tömegváltozást, a kitöltési nyomást, a hűtési időt, a vetemedést és a funkcionális felületek elmozdulását. A legjobb változat nem feltétlenül az, amelyik a legkisebb beszívódást adja, hanem az, amelyik a teljes követelményrendszer alapján a legkedvezőbb kompromisszumot nyújtja.

3.11 Mérnöki következtetések

A beszívódás nem önálló, elszigetelt felületi jelenség, hanem a fröccsöntési folyamatban fellépő hőmérséklet-, nyomás- és zsugorodási viszonyok következménye. A hiba kialakulását elsősorban a lokális anyaghalmozódások, az

egyenetlen falvastagság, az elégtelen utánnyomás, a kedvezőtlen kapuhelyzet és a nem megfelelő hűtés okozza. Ezek közül a geometriai tényezők gyakran a legmeghatározóbbak, mert a folyamatparaméterek csak korlátozottan képesek kompenzálni a rossz anyageloszlást.

A fröccsöntött endcap optimalizálása során ezért a cél nem pusztán a beszívódások eltüntetése, hanem a geometria, a gyárthatóság és a funkció közötti egyensúly megteremtése. A bordák, csavaroszlopok és peremek szükségesek lehetnek az alkatrész működéséhez, de kialakításukat úgy kell megválasztani, hogy ne hozzanak létre túlzott lokális falvastagságot. A szimuláció ebben a folyamatban döntéstámogató eszköz: segít azonosítani a kritikus zónákat, összehasonlítani a módosításokat, és csökkenteni a szerszámpróbák számát.

A szakdolgozat szempontjából a legfontosabb mérnöki gondolat az, hogy a beszívódás csökkentése nem egyetlen paraméter módosításával oldható meg. A sikeres optimalizálás integrált megközelítést igényel: megfelelő alkatrészgeometriát, átgondolt kapuhelyzetet, hatékony utánnyomást, kiegyensúlyozott hűtést és validált szimulációs eredményeket. A geometriai módosítások értékelésekor mindig azt kell vizsgálni, hogy a beszívódás csökkenése mellett az alkatrész továbbra is megfelel-e a mechanikai, szerelési és gyártási követelményeknek.

4 A kiindulási geometria fröccsöntési szimulációs vizsgálata

4.1 A szimuláció célja és értékelési módszere

A kiindulási geometria fröccsöntési szimulációjának célja az volt, hogy a szerszámgyártási és gyártásindítási tapasztalatoktól függetlenül, számítási úton is értékelhető legyen az EndCap alkatrész gyárthatósága. A vizsgálat elsődlegesen a beszívódásra és zsugorodásra hajlamos geometriai zónák azonosítására irányult, de az eredmények értelmezéséhez a kitöltési, nyomás-, hőmérsékleti, hűlési és vetemedési jellemzőket is figyelembe kellett venni.

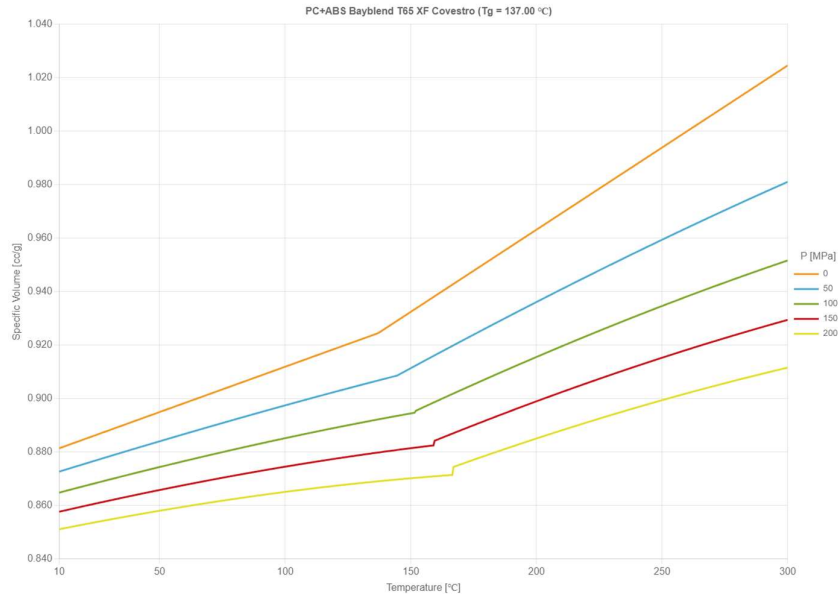
A beszívódási kockázat értékelése nem kizárólag egyetlen eredményábra alapján történt. A képeken bemutatott falvastagság-eloszlás, térfogati zsugorodás, maradó olvadt mag, hegedési vonalak és deformációs eredmények együttesen mutatják meg, hogy a konstrukció mely részei tekinthetők kritikusnak. Ez azért lényeges, mert a beszívódás a fröccsöntött alkatrészen lokális jelenséggént jelenik meg, azonban kialakulása a teljes fröccsöntési folyamat hőmérsékleti, nyomási és zsugorodási viszonyaival függ össze.

A szimuláció Moldex3D Studio 2026 környezetben készült. A vizsgált anyag PC+ABS Bayblend T65 XF Covestro volt, amely az alkatrész hőállósági, merevségi, ragasztástechnológiai és beszállítói feldolgozhatósági követelményeihez illeszkedik. Az eredmények értékelése során a kiindulási geometria olyan módon került vizsgálatra, ahogyan az a gyártási koncepcióban szerepelt, vagyis a cél nem egy ideális, elméleti modell, hanem az ipari gyakorlatban alkalmazott kialakítás megítélése volt.

4.2 Anyagmodell és alapanyag-viselkedés

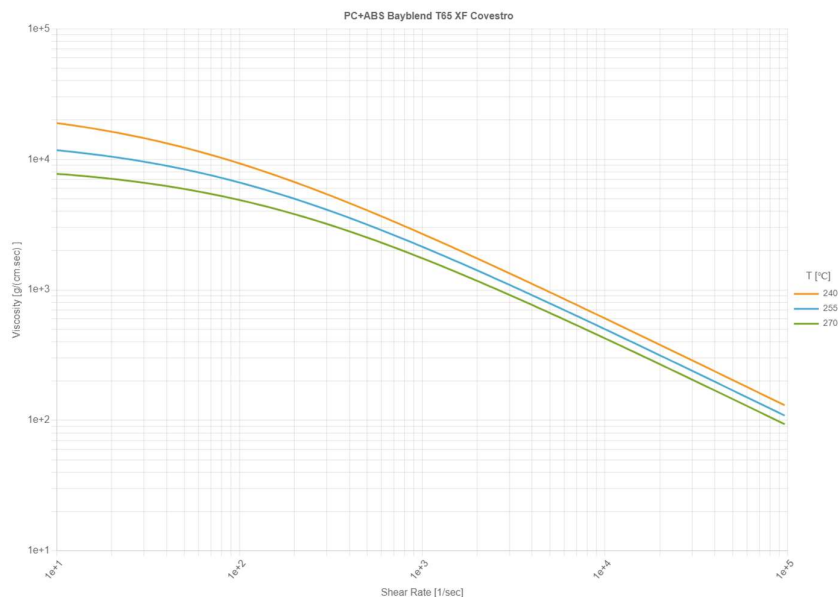
A PC/ABS alapanyag fröccsöntési viselkedésének értékeléséhez elsőként az anyag p - v - T görbét és viszkozitási jelleggörbét vizsgáltam. A p - v - T görbe alapján látható, hogy az anyag fajlagos térfogata a hőmérséklet növekedésével nő, míg nagyobb nyomáson csökken. Ez a fröccsöntési folyamat szempontjából azt jelenti, hogy a kitöltés és az utánnyomás során alkalmazott nyomás közvetlenül befolyásolja a térfogatváltozást és ezen keresztül a zsugorodást. A beszívódási hajlam szempontjából különösen fontos, hogy a hűlés során bekövetkező

térfogatcsökkenést az utánnyomás csak addig képes kompenzálni, amíg a beömlési keresztmetszet és a kritikus zónák felé vezető áramlási utak nem dermednek le.



3. ábra. A PC+ABS Bayblend T65 XF alapanyag p-v-T jelleggörbéje. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D Studio 2026 szimulációs eredmény.

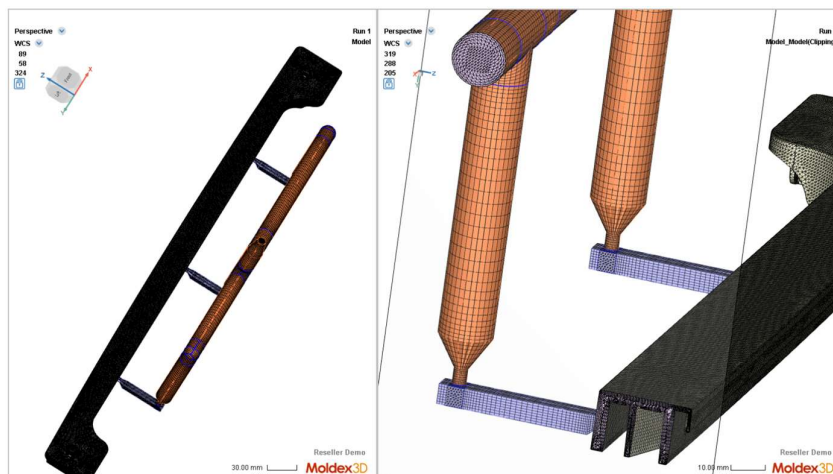
A viszkozitási görbe alapján az anyag tipikus nyírásra vékonyodó viselkedést mutat: a nyírási sebesség növekedésével a viszkozitás csökken. Ez kedvező a hosszú, keskeny EndCap geometria kitöltése szempontjából, mert a nagyobb áramlási sebesség és a kapuk környezetében kialakuló intenzívebb nyírás csökkenti az ömledék látszólagos viszkozitását. Ugyanakkor a nyíróhatás helyi hőmérséklet-emelkedést okozhat, amely a szimulációs eredményekben is megfigyelhető. A hőmérséklet-emelkedés önmagában javíthatja a kitölthetőséget, de a vastagabb zónákban kedvezőtlenebb hűlési és zsugorodási viszonyokat eredményezhet.



4. ábra. A PC+ABS Bayblend T65 XF alapanyag viszkozitási jelleggörbéje. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D Studio 2026 szimulációs eredmény.

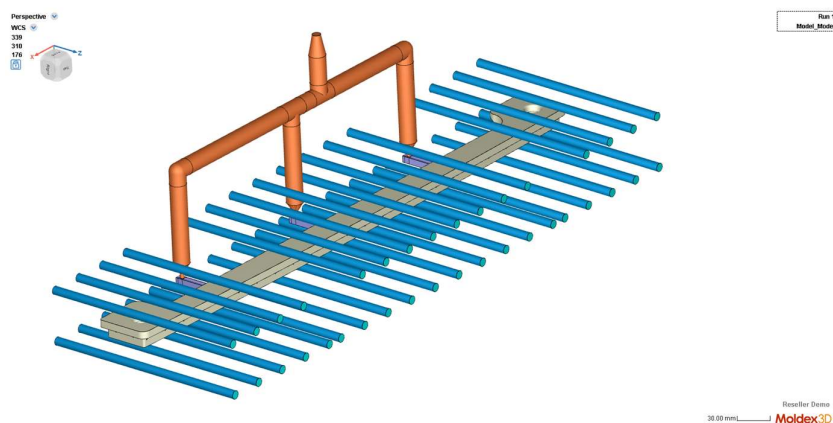
4.3 Szimulációs modell, hálózás és technológiai beállítások

A szimulációs modell az EndCap alkatrészt, a beömlőrendszert, a kapuk környezetét és a hűtőköröket együttesen tartalmazta. A hálózott modellnél a fal menti határréteg háló és a térfogati elemek biztosították, hogy a hosszú, bordázott alkatrész vékonyabb falrészei, a csatlakozó bordák, valamint a vastagabb végzónák is megfelelő részletességgel jelenjenek meg a számításban. A beömlőrendszer több kapun keresztül táplálja az alkatrészt, ami a hosszú áramlási út miatt indokolt megoldás.



5. ábra. A szimulációs modell és a fal menti határréteg háló kialakítása. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D Studio 2026 szimulációs eredmény.

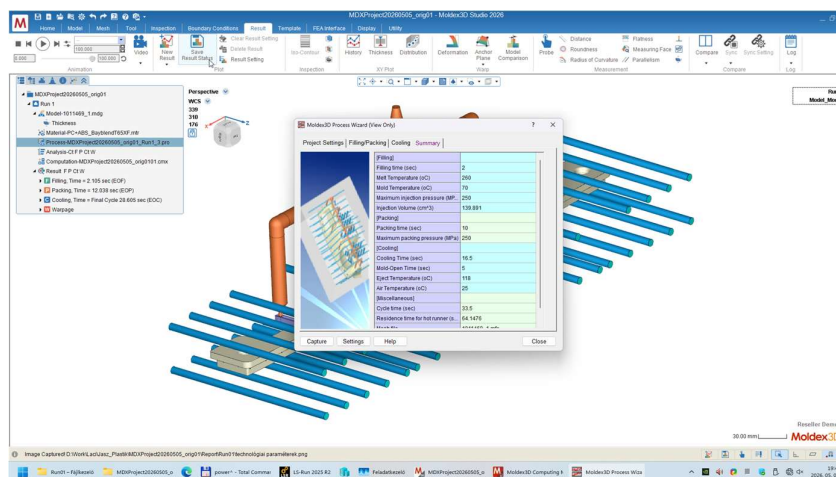
A hűtőkörök a hosszú alkatrész két oldalán, párhuzamos csatornákkal kerültek modellezésre. A hűtési rendszer célja az volt, hogy az alkatrész hőelvonása a teljes hossz mentén közel kiegyenlített legyen. A hűtés értékelése szempontjából azonban nem elegendő a csatornák általános elhelyezkedését vizsgálni, mert a beszívódási kockázatot a lokális anyaghalmozódások környezetében kialakuló maradó meleg magok határozzák meg.



6. ábra. A vizsgált modellhez tartozó hűtőkörök és beömlőrendszer. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D Studio 2026 szimulációs eredmény.

A számítás során alkalmazott fő technológiai paramétereket a Moldex3D Process Wizard összefoglalója tartalmazza. A kitöltési idő 2,0 s, az ömledékhőmérséklet 260 °C, a szerszámhőmérséklet 70 °C, az utánnyomási idő 10 s, a hűtési idő 16,5 s volt. A szoftverben megadott maximális fröccsnyomás és

maximális utánnyomás 250 MPa értékkel szerepelt, az alkatrészhez tartozó befecskendezési térfogat 139,891 cm³ volt. A ciklusidő a beállítások alapján 33,5 s, míg az eredményfában a végső hűtési állapot 28,605 s időpontban jelenik meg.



7. ábra. A szimulációban alkalmazott fő technológiai paraméterek. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D Studio 2026 szimulációs eredmény.

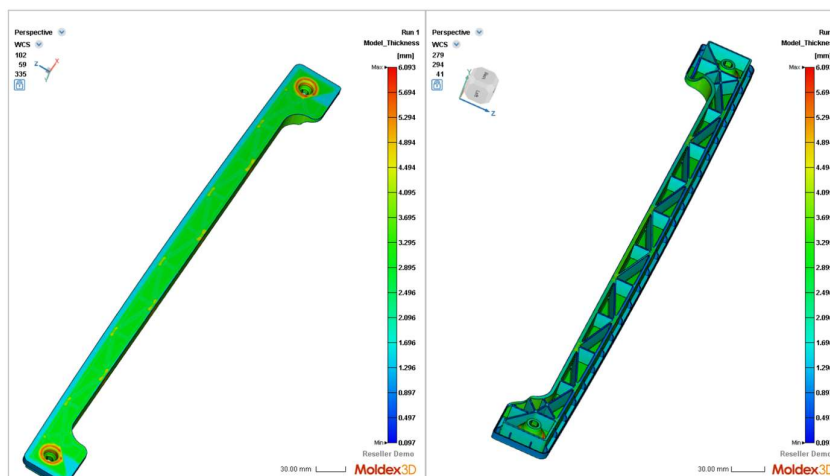
A szimuláció főbb technológiai bemenő adatai az alábbi táblázatban foglalhatók össze.

Paraméter	Beállított érték
Anyag	PC+ABS Bayblend T65 XF Covestro
Kitöltési idő	2,0 s
Ömledékhőmérséklet	260 °C
Szerszámhőmérséklet	70 °C
Maximális fröccsnyomás	250 MPa
Befecskendezési térfogat	139,891 cm ³
Utánnyomási idő	10 s
Maximális utánnyomás	250 MPa
Hűtési idő	16,5 s
Kidobási hőmérséklet	118 °C
Levegő hőmérséklete	25 °C
Ciklusidő	33,5 s

1. táblázat. A kiindulási geometria fröccsöntési szimulációjának fő technológiai beállításai. Forrás: saját szerkesztés, Moldex3D Studio 2026 eredmények alapján.

4.4 Falvastagság-eloszlás és előzetes geometriai kockázatok

A modell falvastagsági eredménye alapján az EndCap névleges falvastagsága a hosszanti szakaszokon viszonylag egyenletes, azonban a végzónákban, a csatlakozó furatok környezetében, a bordák találkozásánál és a helyi merevítő elemeknél jelentős falvastagság-növekedés figyelhető meg. A szimulációban megjelenített falvastagsági tartomány 0,097 és 6,093 mm között változik. A legnagyobb értékek a csapfogadó, furatos végelemek és a bordázott belső csomópontok környezetében jelennek meg.



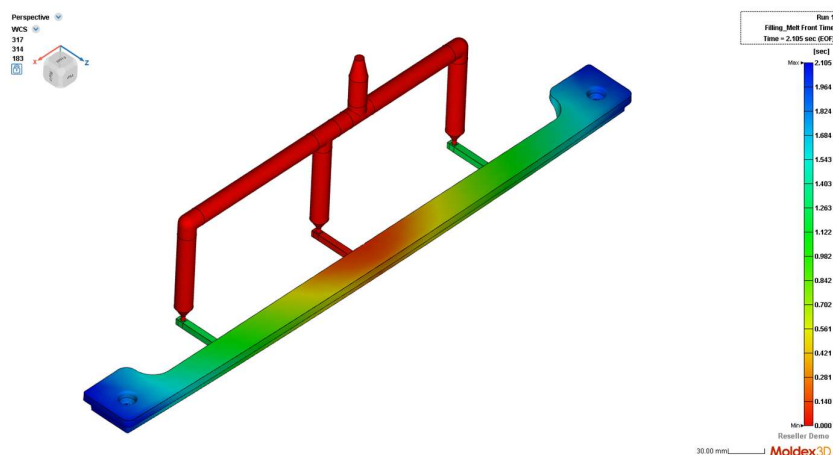
8. ábra. A kiindulási EndCap geometria falvastagság-eloszlása. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D Studio 2026 szimulációs eredmény.

Ez a falvastagsági eloszlás már a fröccsöntési eredmények részletes vizsgálata előtt jelzi a várható problémás zónákat. A beszívódás kialakulásának egyik fő oka a lokális anyaghalmozódás, ezért azok a területek tekinthetők elsődlegesen kritikusnak, ahol a bordák, peremek, furatkörnyezetek és merevítő geometriák több irányból egy csomópontba futnak össze. A kiindulási konstrukció ebből a szempontból nem ideális, mivel a merevségi és szerelési követelmények miatt a bordázott belső geometria több helyen nagyobb anyagtömeget hoz létre.

4.5 Kitöltési folyamat és ömledékhőmérséklet

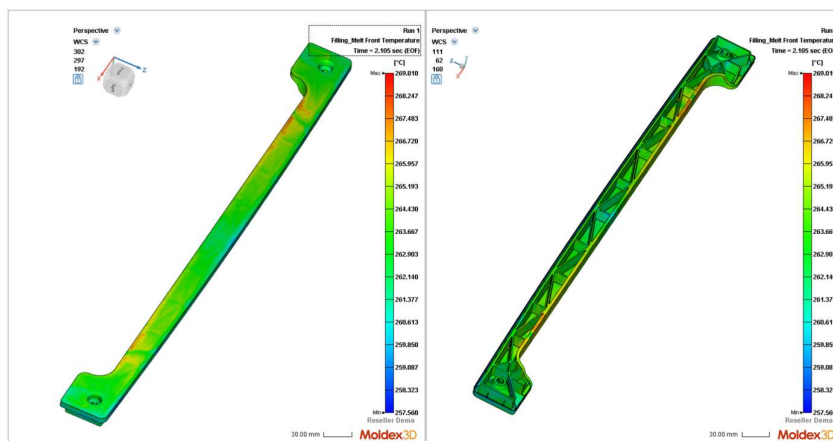
A kitöltési eredmény alapján az alkatrész a beállított technológiai paraméterekkel teljes mértékben kitölthető. A Moldex3D eredmény szerint a kitöltés 2,105 s alatt fejeződik be. A többpontos beömlés miatt az áramlási út a

hosszú EndCap geometria mentén megoszlik, így a kitöltés nem egyetlen szélső pontból indul, hanem több kapun keresztül történik. Ez kedvező a nyomásigény és a kitöltési stabilitás szempontjából.



9. ábra. A kiindulási geometria kitöltési idő eredménye, teljes kitöltés 2,105 s alatt.
Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D Studio 2026 szimulációs eredmény.

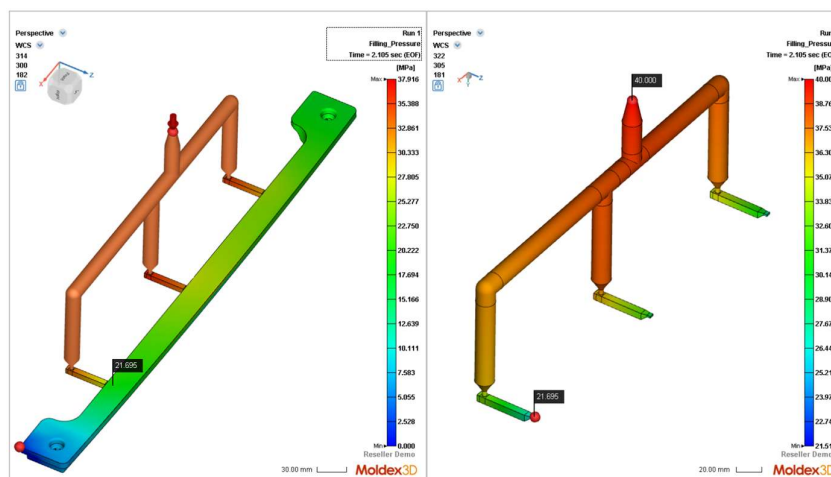
A kitöltési hőmérséklet eredménye szerint az ömledék hőmérséklete a kitöltés végén megközelítőleg 257,56 és 269,01 °C között változik. A beállított 260 °C ömledékhőmérséklethez képest lokálisan magasabb, 268-269 °C körüli értékek is kialakulnak. Ezek elsősorban a kapuk, a keskenyebb átömlési keresztmetszetek és a bordázott geometriák környezetében jelentkeznek, ahol a nyírási igénybevétel hőtermelést okoz. A hőmérséklet-eloszlás alapján a kitöltés technológiailag megvalósítható, de a melegebb zónák a későbbi hűlés és zsugorodás szempontjából kedvezőtlenek lehetnek.



10. ábra. Az ömledékfront hőmérsékletének alakulása a kitöltés végén. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D Studio 2026 szimulációs eredmény.

4.6 Nyomásviszonyok, utánnyomás és záróerő

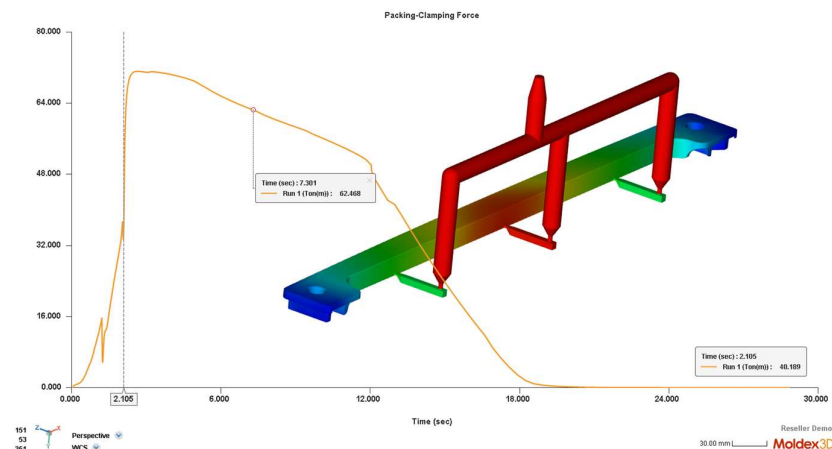
A nyomáseloszlási eredmény alapján a maximális nyomás a beömlőrendszerben és a kapuk közelében alakul ki. A szimulációs képen a formaüregben mért nyomás 0-37,916 MPa tartományban, míg az elosztórendszerben körülbelül 21,512-40,000 MPa tartományban jelenik meg. A távolabbi alkatrészrészekben a jelölt érték megközelítőleg 21,695 MPa, ami azt mutatja, hogy a nyomás a hosszú alkatrész mentén fokozatosan csökken.



11. ábra. A formaüreg és az elosztórendszer nyomásviszonyai a kitöltés végén. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D Studio 2026 szimulációs eredmény.

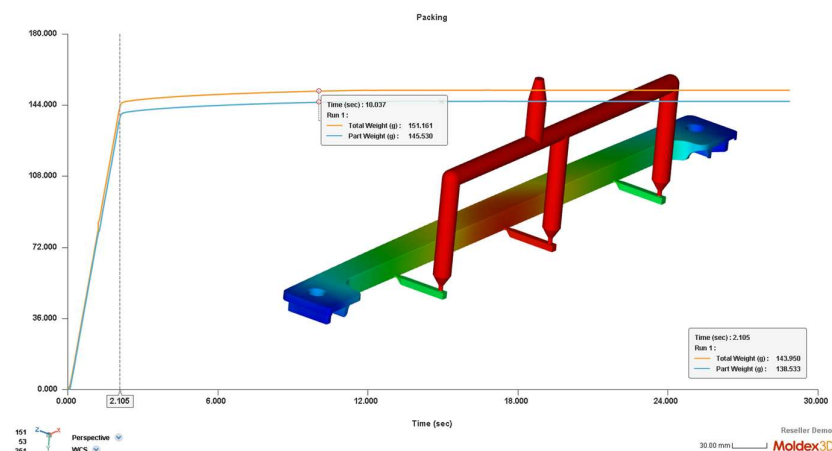
A nyomásesés önmagában nem okoz kitöltési hibát, azonban a beszívódási kockázat szempontjából fontos. Az utánnyomás akkor tudja hatékonyan kompenzálni a térfogatcsökkenést, ha a nyomás a kritikus vastagabb zónákba is eljut. A hosszú alkatrészen és a vékonyabb átmeneteken keresztül érvényesülő nyomásvesztés miatt a távolabbi vagy korábban dermedő zónákban az utánnyomás hatása csökkenhet. Ez különösen a bordacsomópontok és a végzónák esetében jelent kockázatot.

A záróerő görbéje alapján a kitöltés végén a szimuláció körülbelül 40,189 tonna záróerőt jelez, majd az utánnyomási szakasz elején a záróerő gyorsan növekszik. A görbe legnagyobb értéke megközelítőleg 70 tonna körüli tartományban látható, majd az utánnyomás és a hűlés előrehaladtával fokozatosan csökken. A 7,301 s időpontban a jelölt érték 62,468 tonna. A záróerő lefutása alapján a folyamat a vizsgált beállításokkal stabilnak tekinthető, ugyanakkor az utánnyomási fázis intenzív nyomásterhelése nem szünteti meg teljes mértékben a helyi zsugorodási kockázatokat.



12. ábra. A záróerő időbeli változása a kitöltési és utánnyomási szakaszban. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D Studio 2026 szimulációs eredmény.

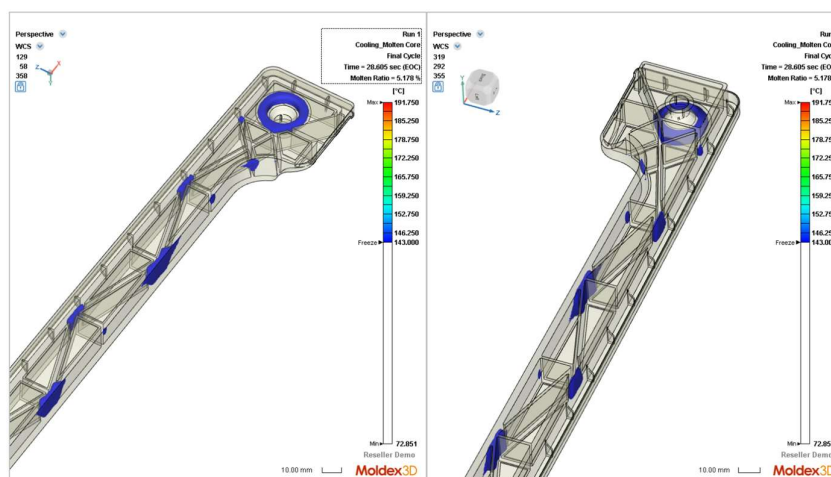
Az utánnyomási tömeggörbe szerint a kitöltés végén az alkatrész tömege 138,533 g, a teljes tömeg pedig 143,950 g volt. Az utánnyomás hatására a 10,037 s időpontban az alkatrésztömeg 145,530 g-ra, a teljes tömeg pedig 151,161 g-ra növekedett. A görbe ellaposodása azt mutatja, hogy az utánnyomási szakasz végére a tömegnövekedés már kismértékű, vagyis az anyagpótlás hatékonysága lecsökken. Ez összhangban van azzal, hogy a kapuk és a vékonyabb keresztmetszetek dermedésével a vastagabb zónák további térfogatcsökkenése már csak korlátozottan kompenzálható.



13. ábra. Az alkatrésztömeg és a teljes tömeg változása az utánnyomási szakaszban. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D Studio 2026 szimulációs eredmény.

4.7 Hűlés, maradó olvadt mag és térfogati zsugorodás

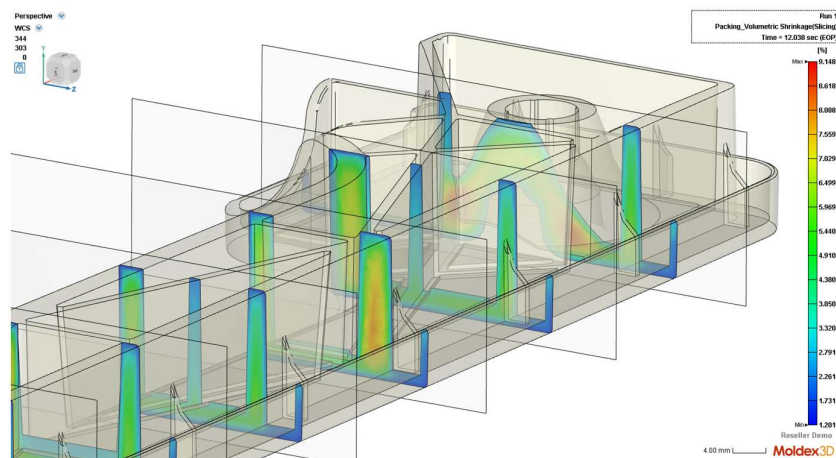
A hűlési eredmények alapján a végső hűtési állapotban, 28,605 s időpontban az alkatrész döntő része megszilárdult, azonban a szoftver 5,178% maradó olvadt mag arányt jelez. A maradó olvadt zónák főként a furatkörnyezetek, bordacsomópontok, végzónák és lokális anyaghalmozódások környezetében jelennek meg. Ez közvetlenül összefügg a falvastagsági eredménnyel: ahol nagyobb a helyi anyagtömeg, ott lassabb a hőelvonás, és a belső mag később dermed meg.



14. ábra. A hűtési szakasz végén még olvadt állapotban lévő magzónák elhelyezkedése.
Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D Studio 2026 szimulációs eredmény.

A maradó olvadt magok beszívódási szempontból kifejezetten kritikusak. Amikor a külső héjrég már megszilárdult, a belső mag viszont még meleg és zsugorodásra képes, a belső térfogatcsökkenés a külső felületet befelé húzhatja. Ha a külső héj kellően merev, a térfogatvesztés belső üregként is megjelenhet, de a jelen alkatrész esetében az esztétikai kockázat miatt a felületi beszívódás a fontosabb értékelési szempont.

A térfogati zsugorodási eredmény metszeti ábrája alapján a zsugorodás 1,201% és 9,148% között változik. A magasabb, 7-9% közötti értékek a bordák tövéénél, a belső merevítő csomópontoknál és a furatos végzónák közelében figyelhetők meg. Ezek azok a zónák, ahol a nagyobb falvastagság, a hőtorlódás és az utánnyomás csökkenő hatékonysága egyszerre jelentkeznek.

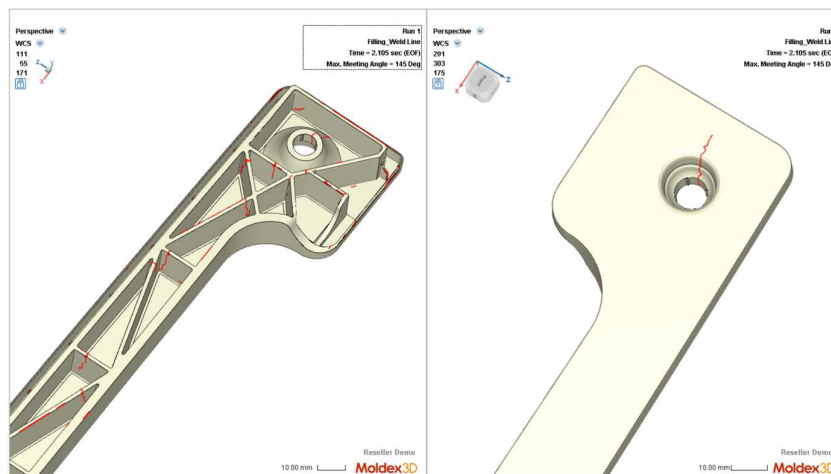


15. ábra. Térfogati zsugorodás metszeti megjelenítése a bordázott belső geometriában.
Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D Studio 2026 szimulációs eredmény.

A térfogati zsugorodás eloszlása alapján a kiindulási geometria beszívódási szempontból nem tekinthető kiegyenlítettnek. A hosszanti alapfalon a zsugorodás mérsékeltebb, míg a bordákhoz és a csatlakozó csomópontokhoz kapcsolódó zónákban jelentősen megnő. Ez arra utal, hogy a probléma elsődleges oka nem az alapanyag általános feldolgozhatósága vagy a teljes alkatrész kitölthetősége, hanem a lokális geometriai anyaghalmozódás.

4.8 Hegedési vonalak és felületi megjelenés

A hegedési vonalak eredménye alapján az áramlási frontok több helyen találkoznak az alkatrész belső bordázott oldalán, valamint a furatkörnyezet közelében. A szimuláció maximális találkozási szögeként 145° értéket jelez. A hegedési vonalak megjelenése a többpontos beömlés és a bonyolult bordázott geometria természetes következménye. A belső oldalon megjelenő vonalak funkcionális szempontból kevésbé kritikusak, ugyanakkor a látható felülethez közeli vagy a furatkörnyezetben kialakuló hegedési vonalak esztétikai és lokális mechanikai szempontból is figyelmet igényelnek.

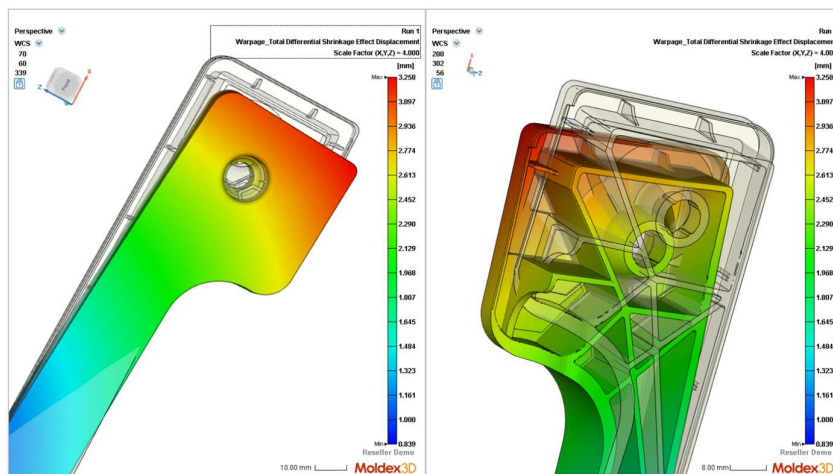


16. ábra. Hegedési vonalak elhelyezkedése a kiindulási geometrián. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D Studio 2026 szimulációs eredmény.

A külső felületen a furat környezetében megjelenő hegedési vonal azért fontos, mert ezen a területen a falvastagság-növekedés, a csatlakozó geometria és a helyi áramlási fronttalálkozás együttesen jelentkeznek. Ez nem feltétlenül jelent azonnali funkcionális hibát, de egy látható felületen alkalmazott alkatrész esetén a felületi minőség megítélését ronthatja. A hegedési vonalak és a beszívódások együttese ezért az esztétikai értékelésnél különösen lényeges.

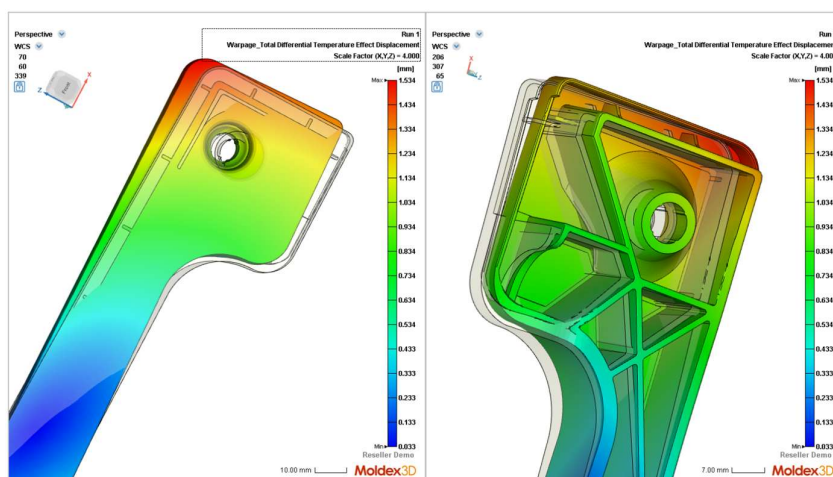
4.9 Vetemedési és deformációs eredmények

A vetemedési eredmények közül a differenciált zsugorodási hatás okozta elmozdulás mutatja a legnagyobb értékeket. A szimuláció szerint a teljes differenciált zsugorodási hatásból származó deformáció maximuma 3,258 mm. A legnagyobb elmozdulás a végzónákban és a furatos csatlakozó rész környezetében jelentkezik. Ez összhangban van a falvastagsági és térfogati zsugorodási eredményekkel, mert a vastagabb végzónák lassabban hűlnek, nagyobb mértékben zsugorodnak, és ez a hosszú, keskeny alkatrészen alakváltozásként is megjelenik.



17. ábra. A differenciált zsugorodásból származó vetemedési hatás. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D Studio 2026 szimulációs eredmény.

A hőmérsékletkülönbségből származó vetemedési komponens maximuma 1,534 mm. Ez az érték kisebb, mint a differenciált zsugorodási hatásból származó deformáció, azonban a végső alakváltozásban továbbra is szerepet játszik. A hőmérsékleti hatás elsősorban a hűtés egyenetlenségével és a lokális hőtorlódásokkal hozható összefüggésbe. A vizsgált alkatrészben a hőmérsékleti és zsugorodási deformációs mintázat hasonló kritikus területekre mutat, ami megerősíti, hogy a probléma gyökere a lokálisan kedvezőtlen anyagelosztás és hűlés.



18. ábra. A hőmérsékletkülönbségből származó vetemedési hatás. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D Studio 2026 szimulációs eredmény.

4.10 Kritikus területek azonosítása

A szimulációs eredmények összevetése alapján a kiindulási EndCap geometria kritikus területei elsősorban a bordázott belső oldalhoz, a furatos végzónákhoz, a bordák találkozási pontjaihoz és a csapfogadó/rögzítő geometriákhoz köthetők. Ezeken a helyeken több kedvezőtlen tényező egyszerre jelentkezik: nagyobb falvastagság, lassabb hűlés, maradó olvadt mag, magasabb térfogati zsugorodás és helyenként hegedési vonal.

A legfontosabb kritikus zónák az alábbiak szerint foglalhatók össze. Elsőként a furatos végzónák emelhetők ki, ahol a csatlakozó geometria, a lekerekítések és a lokális vastagodások miatt a falvastagság eléri a legnagyobb értékeket. Másodikként a bordák tövei és metszéspontjai tekinthetők kritikusnak, mert ezek a merevítés szempontjából szükséges elemek több helyen anyaghalmozódást okoznak. Harmadikként a hosszanti bordázott középső szakasz egyes csomópontjai említhetők, ahol a térfogati zsugorodás és a hűlés végén maradó olvadt mag szintén magasabb értéket mutat.

A beszívódási kockázat a szimuláció alapján tehát nem általánosan az egész alkatrészen jelentkezik, hanem jól behatárolható geometriai zónákban. Ez kedvező a további fejlesztés szempontjából, mert a módosításokat célzottan lehet elvégezni. A szükséges optimalizálási irányok közé tartozik a bordatövek anyagsökkentése, a bordacsomópontok lekönnyítése, a furatkörnyezet falvastagságának mérséklése, valamint a helyi átmenetek és rádiuszok fröccsöntéstechnológiai szempontú újragondolása.

4.11 Mérnöki következtetések a kiindulási geometriára

A kiindulási geometria fröccsöntési szimulációja alapján az EndCap alkatrész kitölthető, és a beállított technológiai paraméterekkel a teljes formaüreg kitöltése 2,105 s alatt megvalósul. A nyomás- és záróerőeredmények alapján a gyártási folyamat alapvetően stabilnak tekinthető, tehát a konstrukció fő problémája nem a kitöltés hiánya vagy a túlzott fröccsnyomásigény.

A kritikus jelenségek a hűléshez, a térfogati zsugorodáshoz és a lokális anyaghalmozódásokhoz kapcsolódnak. A falvastagsági eredmény 6,093 mm maximális értéket mutat, a térfogati zsugorodás metszeti eredménye pedig helyenként 9,148%-ig emelkedik. A hűtési eredmény szerint a ciklus végén még 5,178% maradó olvadt mag található az alkatrészben, főként a bordázott és furatos

csomópontok környezetében. Ezek az adatok együttesen magyarázzák, hogy a kiindulási geometria beszívódásra hajlamos.

A vetemedési eredmények azt mutatják, hogy a differenciált zsugorodásból származó deformáció jelentősebb, mint a hőmérsékletkülönbségből adódó deformáció. A 3,258 mm maximális differenciált zsugorodási hatás arra utal, hogy a geometria belső anyageloszlása nem kiegyenlített. A beszívódási és zsugorodási probléma ezért elsődlegesen konstrukciós eredetű, vagyis tartós javulás elsősorban geometriai módosítással várható.

A következő fejlesztési lépés célja olyan módosított geometriaváltozatok kidolgozása, amelyek csökkentik a kritikus zónák anyaghalmozódását, mérséklék a térfogati zsugorodást és javítják a hűlési viszonyokat. A módosításokat ugyanakkor úgy kell végrehajtani, hogy az EndCap szerelhetősége, merevítő funkciója, rögzítési geometriája és a fém panelhez való illeszkedése ne sérüljön.

5 Geometriai módosítások és a módosított geometria szimulációs vizsgálata

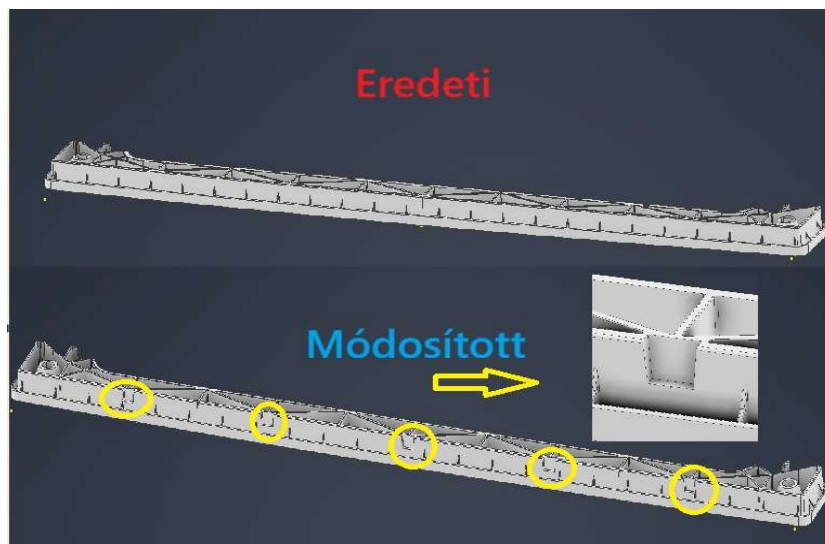
A kiindulási EndCap geometria szimulációs eredményei alapján a beszívódási kockázat nem az alkatrész teljes felületén, hanem jól behatárolható, lokális geometriai zónákban jelentkezett. A kritikus területek elsősorban a bordák csatlakozásaihoz, a furatos csapfészek környezetéhez, valamint a nagyobb falvastagságú hátoldali tartományokhoz kapcsolódtak. A geometriai módosítás célja ezért nem az alkatrész általános áttervezése volt, hanem célzott anyagtömegcsökkentés végrehajtása azokon a zónákon, ahol a szimuláció szerint a lokális térfogati zsugorodás és a beszívódási hajlam kedvezőtlenül alakult.

A módosítások kidolgozásánál alapvető követelmény volt, hogy az EndCap eredeti funkciója, a panelhez való illeszkedése, a csapos rögzítés szerelhetősége, valamint a fröccsöntő szerszám mozgás- és kilökési irányai ne sérüljenek. A módosított geometria tehát a gyárthatóság megtartása mellett próbálja csökkenteni a beszívódásra hajlamos anyaghalmozódásokat.

5.1 A geometriai módosítás célja és mérnöki elve

A módosítási stratégia alapja az volt, hogy a fröccsöntött alkatrészeknél a beszívódások leggyakrabban a névleges falvastagsághoz képest megnövekedett helyi anyagtömegek ellenoldalán jelennek meg. Emiatt a fejlesztés során nem a külső kontúr vagy a funkcionális csatlakozási méretek megváltoztatása volt a cél, hanem a belső oldali anyageloszlás javítása. A változtatásokkal az alkatrész vastagabb részeiben csökkenthető a hűlés közbeni térfogatvesztés, ezáltal mérsékelhető a külső felületeken megjelenő behúzódás mértéke.

A módosított konstrukciónál három fő beavatkozási terület került meghatározásra: a hátoldali falvastagság lokális csökkentése, a csap belső oldala környezetében kialakuló anyagtömeg csökkentése, valamint a front oldali bordafalakba kialakított lokális bevágások alkalmazása. A módosításoknál a megfelelő draftszögek megtartása kiemelt szempont volt, mivel a szerszám nyitási iránya, a magok mozgása és a kész alkatrész biztonságos kilökése csak így biztosítható.



19. ábra. Az eredeti és a módosított EndCap geometria áttekintő összehasonlítása, a módosított bordacsatlakozások jelölésével. Forrás: saját készítésű kép.

5.2 Hátoldali falvastagság csökkentése

A hátoldali felületen a módosítás során 1,5 mm mértékű falvastagság-csökkentés került kialakításra. A beavatkozás célja az volt, hogy a hosszú, viszonylag nagy kiterjedésű hátsó tartományban mérséklődjön az anyagtömeg, miközben az alkatrész külső befoglaló mérete és illeszkedési funkciója változatlan maradjon. A falvastagság csökkentése különösen a hűlési és zsugorodási viszonyok szempontjából kedvező, mivel a kisebb helyi keresztmetszet gyorsabban és egyenletesebben képes lehűlni.

A módosításnál figyelembe kellett venni, hogy a hátoldali felület a panelhez való illeszkedés és a ragasztás szempontjából nem módosítható korlátlanul. Emiatt a csökkentés olyan tartományban történt, ahol a funkcionális felületek és az összeállítási méretek nem sérülnek, ugyanakkor a fröccsöntési szimuláció szempontjából érzékelhető anyagsökkentés valósul meg.

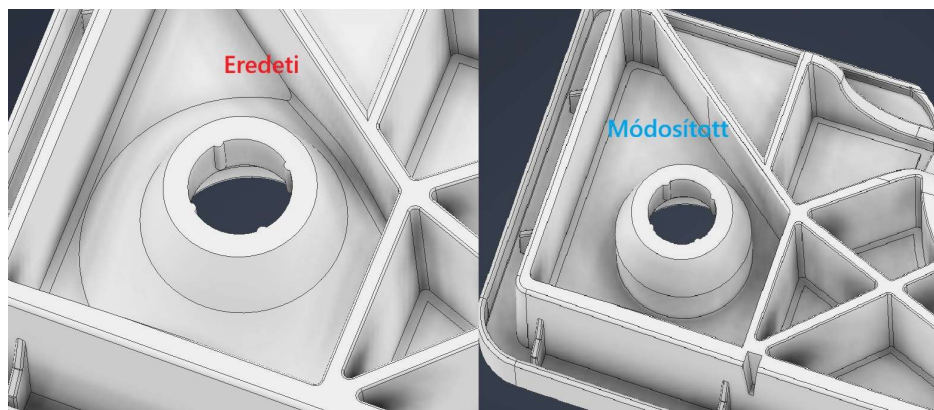


20. ábra. A hátoldali falvastagság módosításának összehasonlítása az eredeti és a módosított kialakításon. Forrás: saját készítésű kép.

5.3 Anyagtömeg-csökkentés a csap környezetében

A furatos csatlakozó rész környezetében az eredeti kialakítás jelentős lokális anyagtömeget tartalmazott. Ez a zóna a szimulációk alapján különösen érzékeny a késleltetett hűlésre és a térfogati zsugorodásra, ezért a módosított geometria egyik legfontosabb eleme a csap belső oldala körüli anyaghalmozódás csökkentése volt. A módosítás mértéke ezen a területen szintén 1,5 mm volt.

A csapfészek geometriájának módosításakor a rögzítési funkció és a szerelhetőség megtartása elsődleges követelmény volt. A csatlakozó belső méretek, az illesztési felületek és a szerelési mozgást biztosító geometriai szabadterek nem sérülhettek. Emiatt az anyagelvétel a csap környezetének nem kritikus, belső oldali részén történt, ahol a lokális falvastagság csökkentése kedvezően hat a beszívódási hajlamra, de nem rontja a rögzítés alapfunkcióját.



21. ábra. A csap környezetének eredeti és módosított kialakítása, a lokális anyagtömeg-csökkenés szemléltetésével. Forrás: saját készítésű kép.

5.4 Bordafalak módosítása és gyárthatósági szempontok

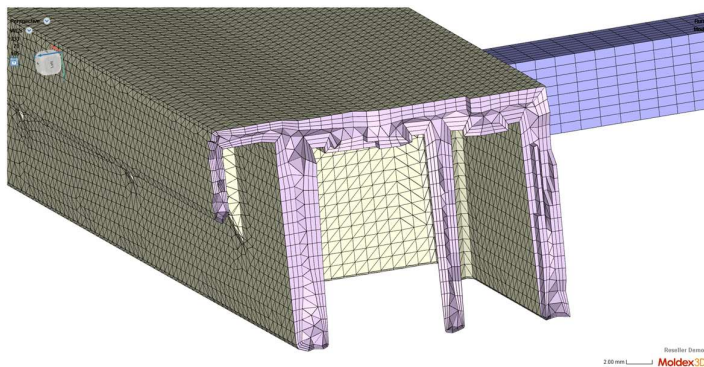
A front oldali bordafalakba lokális bevágások kerültek, amelyek célja a bordák által létrehozott anyaghalmozódások csökkentése volt. A bordák a szerkezeti merevítés miatt továbbra is szükségesek maradtak, ezért a módosítás nem a bordarendszer megszüntetésére, hanem a bordacsatlakozások kedvezőbb anyageloszlására irányult. A kialakított bevágásokkal a bordák csomópontjaiban csökkenthető a helyi falvastagság, miközben a bordák merevítő szerepe részben megmarad.

A módosítások szerszámgyártási szempontból is ellenőrzésre kerültek. A bevágások és falvastagság-csökkentések kialakításánál a draftszögek megtartása alapvető feltétel volt, mivel a fröccsöntött alkatrész szerszámból történő eltávolítása csak megfelelő kúposág mellett biztosítható. A módosítások elve megegyezett a korábbi szerszámgyártási egyeztetéseken alkalmazott gyakorlattal: a geometriai beavatkozásokat úgy kellett végrehajtani, hogy azok a beszívódási kockázatot csökkentsék, de ne hozzanak létre új szerszámozhatósági vagy kilökési problémát.

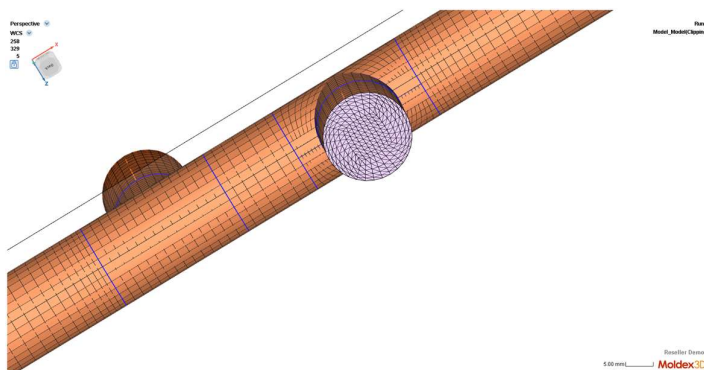
5.5 A módosított modell szimulációs beállításai

A módosított geometria szimulációja az eredeti vizsgálathoz hasonló modellfelépítéssel készült. Az összehasonlíthatóság érdekében a beömlőrendszer, a kapuzási koncepció, az anyagmodell és a fő technológiai beállítások azonos mérnöki logika szerint kerültek alkalmazásra. Így a kapott eredmények elsősorban a geometriai módosítás hatását tükrözik, nem pedig egy teljesen eltérő technológiai beállítás következményei.

A hálózásnál a termék testhálója mellett a fali határréteg-háló és a forrócsatorna hálója is ellenőrzésre került. Ez azért fontos, mert a fal menti hőmérséklet- és nyírási viszonyok, valamint a kapuk környezetében kialakuló áramlási állapotok jelentősen befolyásolják a kitöltés, az utánnyomás és a hűlés eredményeit.



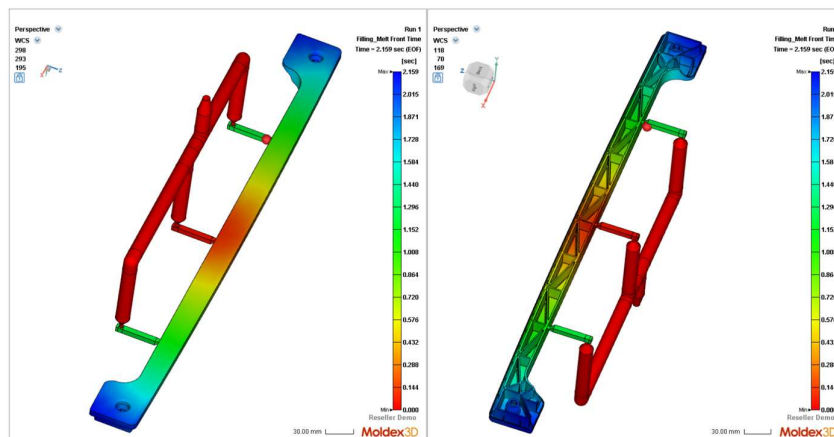
22. ábra. A módosított EndCap geometria testhálója és fali határréteg-hálója. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D 2026 szimulációs eredmény.



23. ábra. A forrócsatorna és a beömlőrendszer fali határréteg-hálójának részlete. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D 2026 szimulációs eredmény.

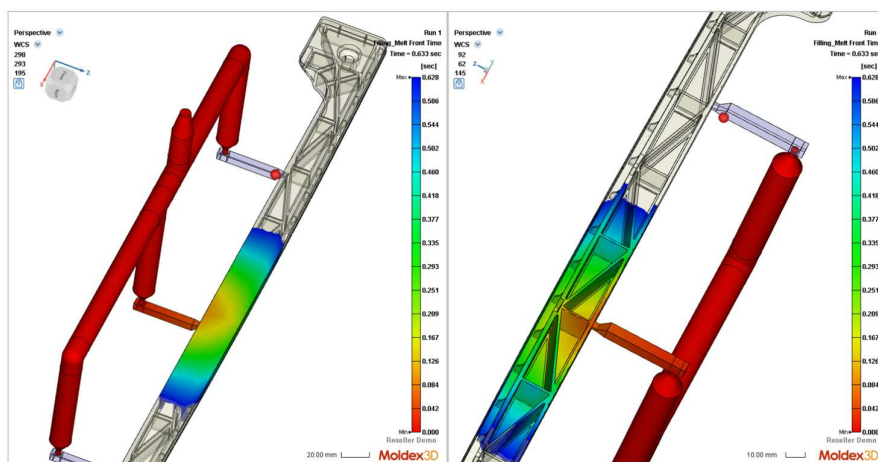
5.6 Kitöltési folyamat és ömledékhőmérséklet a módosított geometrián

A módosított geometria kitöltési ideje 2,159 s, amely kis mértékben nagyobb, mint a kiindulási geometria 2,105 s értéke. A különbség 0,054 s, amely a teljes kitöltési időhöz viszonyítva körülbelül 2,6% növekedést jelent. Ez a változás mérnöki szempontból elfogadható, mivel a geometriai módosítás nem okozott rövidfröccsöt, kitöltetlen zónát vagy jelentős áramlási akadályt.



24. ábra. A módosított geometria teljes kitöltése 2,159 s alatt. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D Studio 2026 szimulációs eredmény.

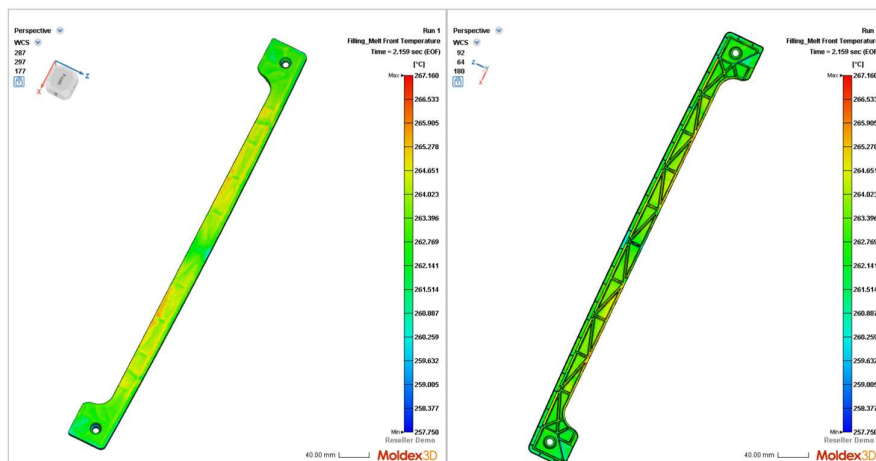
A részleges kitöltési állapot 0,633 s időpillanatban azt mutatja, hogy a kapukon keresztüli anyagbevezetés kiegyensúlyozottan indul meg, és az áramlási front a hosszanti alkatrész mentén fokozatosan halad tovább. A szelepezett kapuk környezetében nem figyelhető meg olyan kedvezőtlen áramlási torlódás, amely a módosított geometria kitölthetőségét alapvetően veszélyeztetné.



25. ábra. Részleges kitöltési állapot 0,633 s időpillanatban, a szelepezett kapuk környezetében. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D Studio 2026 szimulációs eredmény.

A kitöltés végén az ömledékfront hőmérsékletének maximális értéke 267,16 °C. Ez az érték a kiindulási geometria 269,01 °C körüli maximumához képest enyhén alacsonyabb. A módosítás tehát nem növelte a nyírásból származó lokális túlmelegedést, sőt a legnagyobb hőmérsékleti érték kismértékű csökkenése figyelhető meg. A hőmérséklet-eloszlás továbbra is a kapuk és a hosszanti áramlási

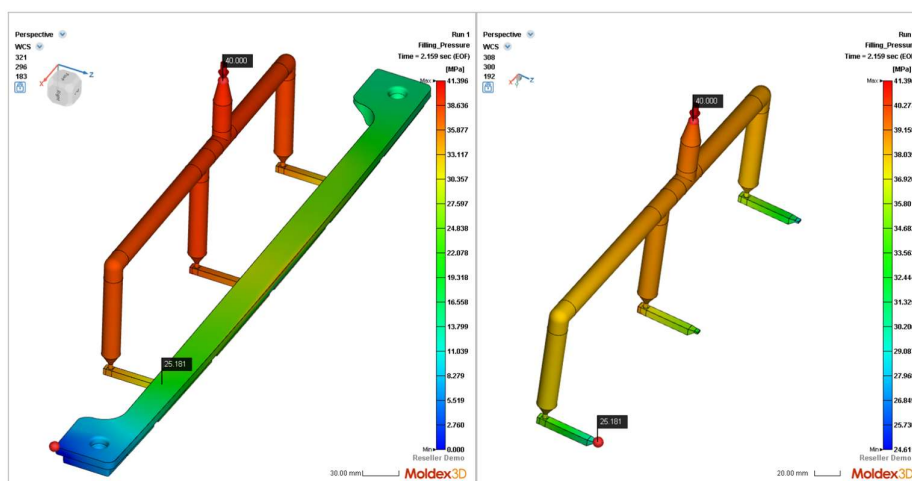
út mentén mutat változást, de a módosított geometria nem okoz szélsőséges hőtorlódást.



26. ábra. Az ömledékfront hőmérsékletének eloszlása a módosított geometrián. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D 2026 szimulációs eredmény.

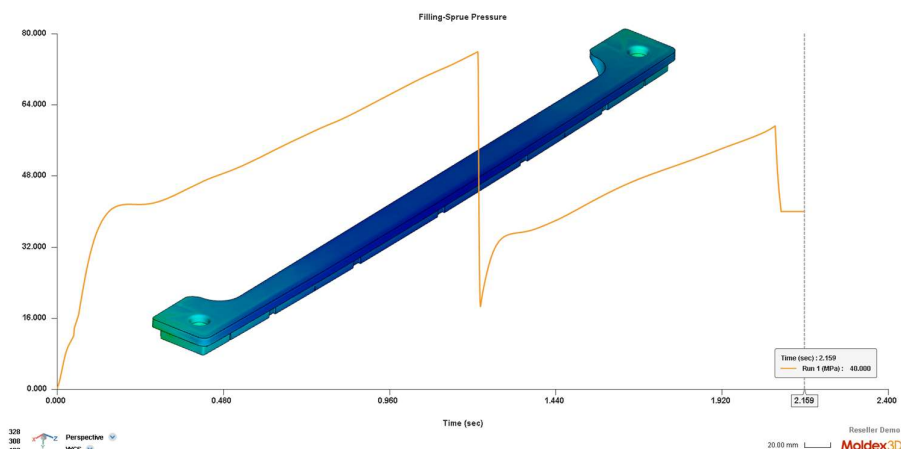
5.7 Nyomásviszonyok, beömlőnyomás és záróerő

A módosított geometria esetében a formaüregben és az elosztórendszerben kialakuló maximális nyomás körülbelül 41,396 MPa. Ez kis mértékben magasabb, mint a kiindulási modellnél jellemző, nagyságrendileg 40 MPa körüli érték, azonban a különbség nem tekinthető kritikusnak. A nyomásnövekedés részben a megváltozott helyi keresztmetszetekkel és az anyagáramlási út kismértékű módosulásával magyarázható.



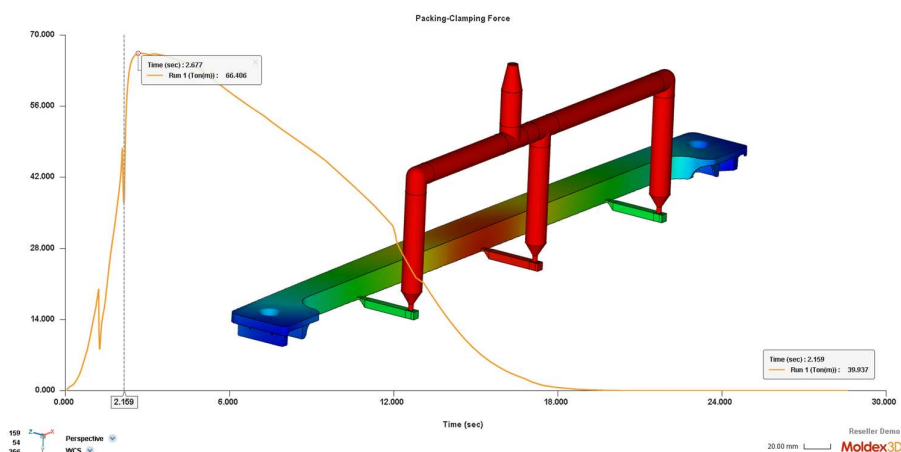
27. ábra. A módosított geometria formaüregi és elosztórendszeri nyomásviszonyai a kitöltés végén. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D 2026 szimulációs eredmény.

A beömlőnyomás időfüggvénye alapján a kitöltési szakasz végén a nyomás 40 MPa környezetében alakul. A görbe alakja alapján a kitöltés alatt a nyomás fokozatosan növekszik, majd a vezérelt kapuzási és átkapcsolási folyamat következtében jellegzetes töréspontok figyelhetők meg. A módosított geometria tehát a beömlőnyomás szempontjából is feldolgozható tartományban marad.



28. ábra. A beömlőnyomás időbeli alakulása a módosított geometria kitöltése során.
Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D Studio szimulációs eredmény.

A záróerő görbe alapján a kitöltés végén a záróerő értéke körülbelül 39,937 tonna, a görbe legnagyobb kijelzett értéke pedig 66,406 tonna. A kiindulási geometriához képest a záróerő szintje azonos nagyságrendben maradt, ezért a geometriai módosítás nem okozott olyan nyomásszint-növekedést, amely a szerszámzárás szempontjából kedvezőtlen lenne.

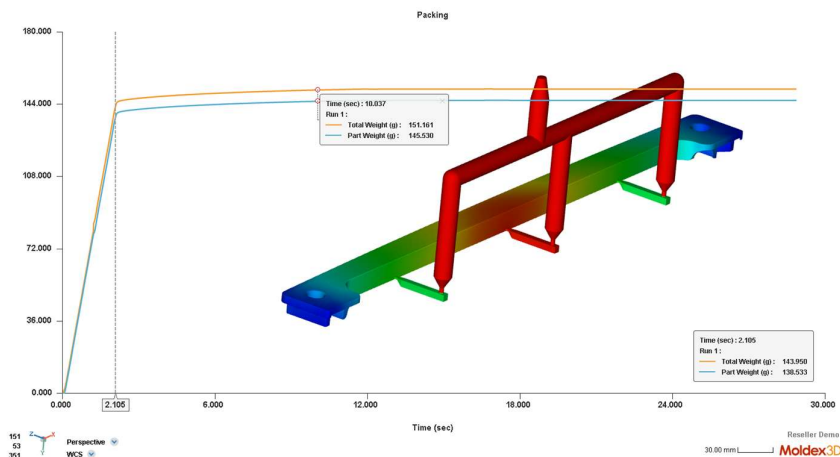


29. ábra. A záróerő időbeli alakulása a módosított geometria kitöltési és utánnomási szakaszában. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D 2026 szimulációs eredmény.

5.8 Utánn nyomás, alkatrésztömeg és hűlési állapot

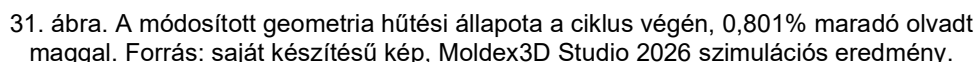
Az utánn nyomási tömeggörbe szerint a módosított alkatrész tömege a kitöltés végén 122,310 g, a teljes tömeg pedig 127,740 g volt. Az utánn nyomási szakasz végén az alkatrésztömeg 128,515 g, a teljes tömeg pedig 134,150 g értékre növekedett. A kiindulási geometriánál az utánn nyomási szakasz végén az alkatrésztömeg 145,530 g volt, így a módosítás körülbelül 17,0 g tömegcsökkenést eredményezett. Ez megközelítőleg 11,7%-os alkatrésztömeg-csökkenésnek felel meg.

A tömegcsökkenés nem önmagában cél, hanem a lokális anyaghalmozódások mérséklésének következménye. A kisebb anyagtömeg kedvezően hat a hűlési időre, a zsugorodási viszonyokra és a beszívódási hajlamra, miközben anyagköltség szempontjából is kedvezőbb konstrukciót eredményez.

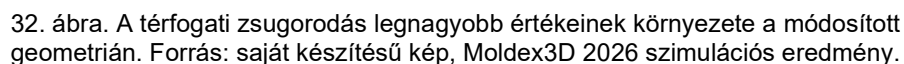


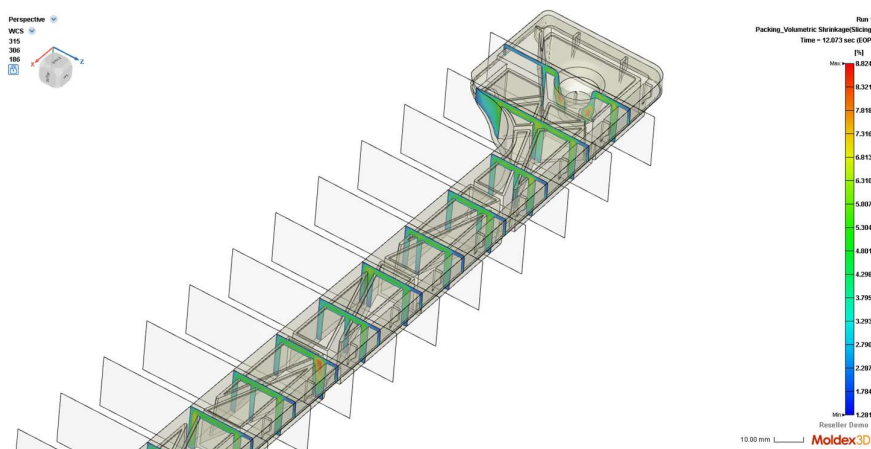
30. ábra. A módosított geometria alkatrésztömegének és teljes tömegének változása az utánn nyomási szakaszban. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D 2026 szimulációs eredmény.

A hűtési eredmény alapján a végső ciklusállapotban, 28,659 s időpontban a maradó olvadt mag aránya 0,801%. Ez jelentős javulás a kiindulási geometria 5,178%-os értékéhez képest. A maradó olvadt mag csökkenése azt jelzi, hogy a módosított geometria hűlése kiegyenlítettebbé vált, és a lokális, vastagabb keresztmetszetekben kisebb mértékben marad késleltetetten dermedő anyag.



A módosított geometria térfogati zsugorodási eredménye alapján a vizsgált metszetekben a zsugorodás 1,281% és 8,824% között változik. A maximális érték a csap környezetében és a bordák kapcsolódási zónáiban jelenik meg, vagyis továbbra is azokban a régiókban, amelyek geometriai szempontból a legnagyobb lokális anyagtömeget tartalmazzák. A legnagyobb térfogati zsugorodás azonban a kiindulási modell 9,148%-os maximumához képest kismértékben csökkent.

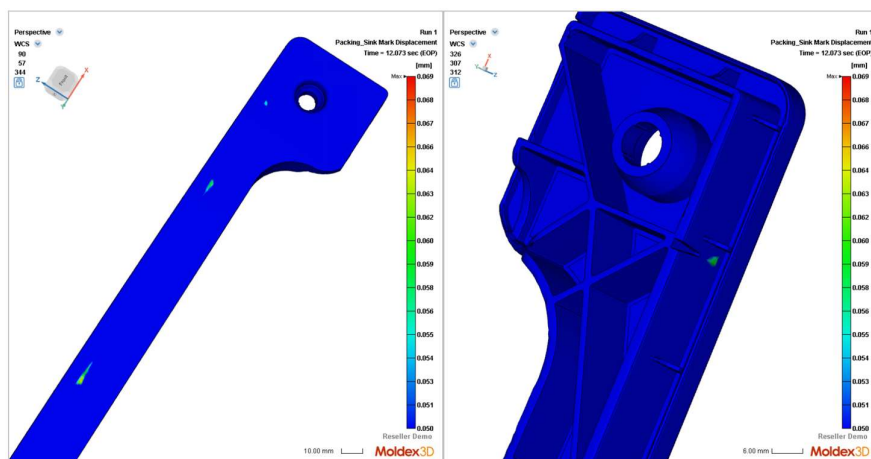




33. ábra. A térfogati zsugorodás metszeti eloszlása a módosított EndCap geometrián.
Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D Studio szimulációs eredmény.

A beszívódási elmozdulás eredménye a módosított geometrián legfeljebb 0,069 mm. Az eredeti geometriához képest ez körülbelül 40%-os csökkenést jelent. A beszívódás továbbra is lokális foltokban jelenik meg, elsősorban a belső bordák és a falvastagság-váltások ellenoldalán, azonban az érintett felület nagysága és az elmozdulás mértéke is kedvezőbb lett.

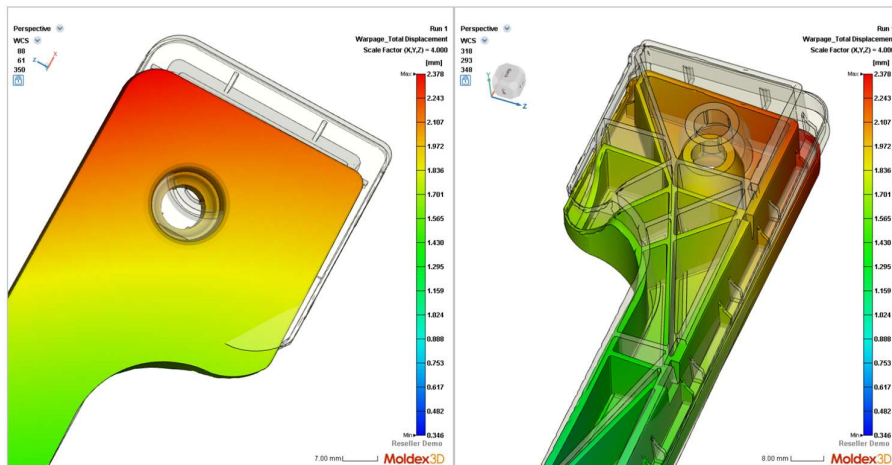
A beszívódási eredmény különösen fontos a szakdolgozat célkitűzése szempontjából, mivel a módosítások elsődleges célja az esztétikai megjelenés javítása volt. A 0,069 mm-es maximális érték alapján a lokális felületi behúzódnások várható mértéke számottevően kisebb, mint a kiindulási kialakítás esetén. Ez azt mutatja, hogy a célzott anyagcsökkentés és a bordacsatlakozások módosítása közvetlenül javította a beszívódási viselkedést.



34. ábra. A beszívódási elmozdulás várható helyei és mértéke a módosított geometrián.
Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D Studio szimulációs eredmény.

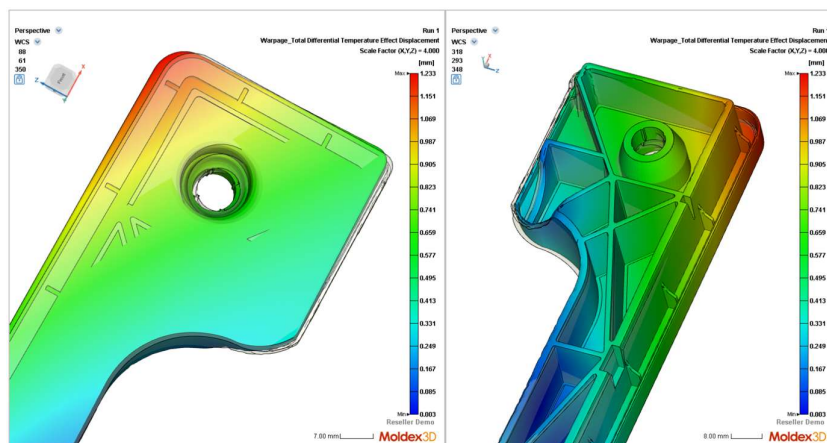
5.10 Vetemedési és deformációs eredmények

A módosított geometria eredő deformációjának maximális értéke 2,378 mm. Ez kedvezőbb, mint a kiindulási geometriánál meghatározott 3,258 mm legnagyobb differenciált zsugorodási eredetű elmozdulás. A teljes elmozdulási mezőben továbbra is a furatos végzőna és a hosszanti rész végei mutatják a legnagyobb elmozdulásokat, azonban a maximális érték csökkent.



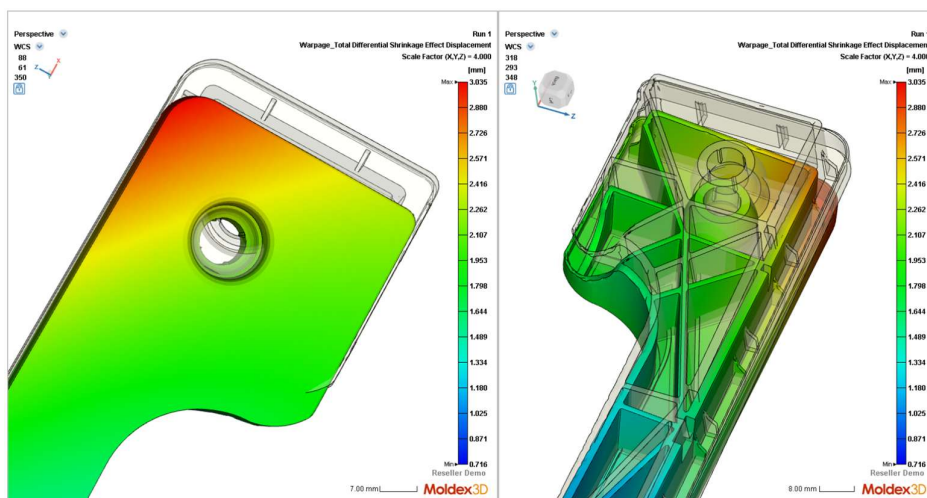
35. ábra. A módosított geometria eredő deformációja. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D 2026 szimulációs eredmény.

A hőmérsékletkülönbségből származó deformáció maximális értéke 1,233 mm. Ez a kiindulási geometria 1,534 mm-es értékéhez képest körülbelül 19,6%-os csökkenést jelent. A módosított geometria tehát nemcsak a beszívódási elmozdulás, hanem a hőhatásból származó vetemedési komponens szempontjából is kedvezőbb eredményt adott.



36. ábra. A hőmérsékletkülönbségből származó deformáció a módosított geometrián. Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D 2026 szimulációs eredmény.

A térfogati zsugorodásból származó deformáció maximális értéke 3,035 mm. Ez a kiindulási geometriánál mért 3,258 mm-es értékhez képest mérsékelt, körülbelül 6,8%-os csökkenést jelent. A zsugorodási komponens tehát továbbra is meghatározó része az alkatrész deformációs viselkedésének, de a módosítások ebben a tekintetben is javulást eredményeztek.



37. ábra. A térfogati zsugorodásból származó deformáció a módosított geometrián.
Forrás: saját készítésű kép, Moldex3D 2026 szimulációs eredmény.

6 Eredmények összehasonlítása és mérnöki értékelése

A módosított geometria szimulációs eredményei alapján megállapítható, hogy a célzott geometriai beavatkozások kedvezően befolyásolták az EndCap alkatrész fröccsöntési viselkedését. A legfontosabb eredmény a beszívódási elmozdulás csökkenése, ugyanakkor a tömeg, a hűlési állapot és a deformációs jellemzők is javulást mutattak. A kitöltési idő és a nyomásigény kismértékben változott, de ezek a változások a gyárthatóság szempontjából elfogadható tartományban maradtak.

6.1 Eredeti és módosított geometria összehasonlítása

2. táblázat. A kiindulási és a módosított geometria fő szimulációs eredményeinek összehasonlítása. Forrás: saját szerkesztés, Moldex3D Studio 2026 eredmények alapján.

Vizsgált jellemző	Kiindulási geometria	Módosított geometria	Értékelés
Kitöltési idő	2,105 s	2,159 s	Kismértékű, 0,054 s növekedés; gyártástechnológiai szempontból elfogadható.
Maximális ömledékfront-hőmérséklet	269,01 °C	267,16 °C	Kismértékű csökkenés, nem alakult ki kedvezőtlen túlmelegedés.
Formaüregi/elosztói maximális nyomás	kb. 40 MPa	41,396 MPa	Kismértékű növekedés, de nem kritikus.
Kitöltés végi záróerő	40,189 t	39,937 t	Gyakorlatilag változatlan szint.
Legnagyobb kijelzett záróerő	kb. 70 t nagyságrend	66,406 t	Nem nőtt kedvezőtlenül.
Alkatrésztömeg utánnyomás végén	145,530 g	128,515 g	17,015 g, azaz kb. 11,7% tömegcsökkenés.
Maradó olvadt mag aránya a hűtés végén	5,178%	0,801%	Jelentős javulás, egyenletesebb hűlés.
Maximális térfogati zsugorodás	9,148%	8,824%	Kismértékű csökkenés, a kritikus zónák megmaradtak, de kedvezőbb értékkel.
Maximális beszívódási elmozdulás	kb. 0,115 mm	0,069 mm	Kb. 40%-os csökkenés.
Hőhatásból származó deformáció	1,534 mm	1,233 mm	Kb. 19,6%-os csökkenés.

Térfogati zsugorodásból származó deformáció	3,258 mm	3,035 mm	Kb. 6,8%-os csökkenés.
Eredő deformáció	nagyobb kritikus végzónai elmozdulások	2,378 mm	A végzónai elmozdulások mérséklődtek.

Az összehasonlító eredmények alapján a módosított geometria legnagyobb előnye a beszívódási hajlam és a hűlési állapot javulása. A 11,7%-os tömegcsökkenés arra utal, hogy a beavatkozások nem csupán lokális felületi módosítások voltak, hanem ténylegesen csökkentették azokat az anyaghalmozódásokat, amelyek a kiindulási konstrukcióban a beszívódási probléma fő okait jelentették.

6.2 A geometriai módosítás eredményessége

A módosítások közül a csap környezetében végrehajtott anyagtömeg-csökkentés és a bordafalakba kialakított bevágások bizonyultak a beszívódási viselkedés szempontjából a legfontosabbnak. Ezek a területek az eredeti geometriánál nagy lokális keresztmetszetet hoztak létre, amely a hűlés során később dermedt meg, és a külső felületen beszívódási nyomok kialakulását okozta. A módosított geometrián ezekben a zónákban csökkent a hűlés végén visszamaradó olvadt anyag aránya, ami közvetlenül hozzájárult a beszívódási elmozdulás mérséklődéséhez.

A hátoldali falvastagság 1,5 mm-es csökkentése a teljes alkatrésztömeg és a hűlési viszonyok szempontjából adott kedvező eredményt. Mivel az EndCap hosszú, keskeny alkatrész, a hátoldali anyagtömeg mérséklése a teljes hőmérsékleti és zsugorodási mezőre hatással van. Ez a módosítás hozzájárult ahhoz, hogy a hűtés végére a maradó olvadt mag aránya 5,178%-ról 0,801%-ra csökkenjen.

Fontos kiemelni, hogy a módosítás nem szüntette meg teljesen a kritikus zónákat. A csapfészek, a bordacsatlakozások és a végzónák továbbra is a legnagyobb zsugorodási és deformációs értékeket mutatják. Ez természetes következménye annak, hogy ezek a részek az alkatrész funkciója miatt nem hagyhatók el, és a geometriájuk csak korlátozottan módosítható. A fejlesztés eredménye ezért nem hibamentes, hanem mérnökiileg kedvezőbb kompromisszumot adó geometria.

6.3 Gyárthatósági és funkcionális értékelés

A módosított geometria gyárthatósági szempontból elfogadhatónak tekinthető. A kitöltési idő csak kismértékben nőtt, a nyomásigény nem emelkedett kritikus mértékben, és a záróerő szintje is az eredeti modellhez hasonló tartományban

maradt. A szimuláció nem mutatott olyan kitöltési hiányt vagy áramlási problémát, amely a módosított kialakítás fröccsönthetőségét alapvetően megkérdőjelezné.

A funkcionális követelmények szempontjából a módosítások nem érintették az alkatrész külső befoglaló méreteit, a panelhez való illeszkedést és a csapos rögzítés alapvető geometriáját. A draftszögek megtartása miatt a szerszámmozgás és a kilökés szempontjai is figyelembe lettek véve. Ez különösen lényeges, mert a beszívódás csökkentése önmagában nem elegendő, ha közben az alkatrész nem szerelhető vagy a szerszámból nem távolítható el biztonságosan.

A tömegcsökkenés további előnye, hogy az anyagfelhasználás is mérséklődik. A 17 g körüli alkatrésztömeg-csökkenés sorozatgyártásban már gazdasági szempontból is érzékelhető lehet, ugyanakkor a módosítás elsődleges célja továbbra is az esztétikai minőség javítása volt.

6.4 Következtetések

A szakdolgozatban vizsgált PC/ABS anyagú fröccsöntött EndCap alkatrész kiindulási kialakítása funkcionális szempontból megfelelő volt, azonban a fröccsöntési szimulációk jelentős beszívódási kockázatot jeleztek. A probléma oka elsősorban a lokális anyaghalmozódásokban, a csap környezetében kialakuló nagyobb falvastagságban, valamint a bordák csatlakozási zónáiban volt azonosítható.

A geometriai módosítás során a hátoldali falvastagság 1,5 mm-rel csökkent, a csap belső oldala körüli anyagtömeg szintén 1,5 mm-rel mérséklődött, továbbá a front oldali bordafalakba lokális bevágások kerültek. A módosítások a szerszámgyártási és kilökési szempontok figyelembevételével készültek, a megfelelő draftszögek megtartása mellett.

A módosított geometria szimulációs eredményei alapján a maximális beszívódási elmozdulás 0,069 mm-re csökkent, ami az eredeti geometriához képest körülbelül 40%-os javulást jelent. Az alkatrésztömeg 145,530 g-ról 128,515 g-ra csökkent, a hűtés végén visszamaradó olvadt mag aránya pedig 5,178%-ról 0,801%-ra mérséklődött. Ezek az eredmények azt igazolják, hogy a célzott geometriai anyagcsökkentés hatékony eszköz volt a beszívódási hajlam mérséklésére.

A vizsgálat alapján a módosított EndCap geometria kedvezőbb kompromisszumot képvisel a funkció, a szerelhetőség, a gyárthatóság és az esztétikai megjelenés között. A beszívódás teljes megszüntetése a rendelkezésre álló beépítési tér és a funkcionális követelmények miatt nem volt reális cél, azonban

a szimulációk alapján a módosított kialakítás egyértelműen javítja a termék várható felületi minőségét.

6.5 Összefoglalás

A szakdolgozat egy ipari fejlesztési feladatból származó PC/ABS anyagú fröccsöntött EndCap alkatrész geometriai optimalizálását mutatta be. A munka során először az alkatrész funkcionális és konstrukciós kötöttségei kerültek ismertetésre, majd a fröccsöntési technológia és a beszívódások kialakulásának mérnöki háttere került bemutatásra. Ezt követően a kiindulási geometria Moldex3D szimulációs vizsgálata alapján azonosításra kerültek a kritikus beszívódási és zsugorodási zónák.

A szimulációs eredmények alapján kidolgozott módosított geometria célja a lokális anyaghalmozódások csökkentése volt. A módosítások a hátoldali falvastagság, a csap környezete és a bordacsatlakozások célzott átalakítására irányultak. Az eredmények igazolták, hogy a módosított kialakítás csökkenti a beszívódási elmozdulást, javítja a hűlési állapotot és mérsékli az alkatrész tömegét, miközben a gyárthatóság és az alapvető funkcionális követelmények megmaradnak.

A dolgozat fő eredménye, hogy a fröccsöntési szimuláció segítségével sikerült olyan geometriai módosításokat meghatározni, amelyek nem próbálgatásos alapon, hanem mérnöki ok-okozati elemzés alapján javítják az alkatrész gyárthatóságát és esztétikai megjelenését. A módszer a további fejlesztések során is alkalmazható más, hasonló bordázott, beszívódásra érzékeny fröccsöntött műanyag alkatrészek optimalizálására.

Köszönöm a megtisztelő figyelmet:
Balogh Sámuel

Irodalomjegyzék

[1] Autodesk: Troubleshooting sink marks and voids, Autodesk Moldflow Insight Help, 2021. {online}

https://help.autodesk.com/cloudhelp/2021/ENU/MoldflowInsight-CLC-Troubleshoot/files/Troubleshooting-molding-problems/MoldflowInsight_CLC_Troubleshoot_Troubleshooting_molding_problems_Troubleshooting_sink_marks_and_.html.html (Letöltés időpontja: 2026.04.30.)

[2] Autodesk: Sink-mark Prediction Enhancements for 3D Injection Molding, Autodesk Moldflow Insight 2021 Validation Report. {online}
<https://damassets.autodesk.net/content/dam/autodesk/www/pdfs/autodesk-moldflow-insight-2021-3d-sink-marks-validation-report.pdf> (Letöltés időpontja: 2026.04.30.)

[3] Autodesk / Hanser: Moldflow Design Guide: A Resource for Plastics Engineers. {online}
https://marciaswan.weebly.com/uploads/1/3/5/8/13585698/mfdg_low-res_proof_part1.pdf (Letöltés időpontja: 2026.04.30.)

[4] BASF: Injection-Molding Problems in Engineering Thermoplastics: Causes and Solutions. {online}
https://download.basf.com/p1/8a8082587fd4b608017fd6631d5a24b1/en/Injection-Molding_Problems_in_Engineering_Thermoplastics_-_Causes_and_Solutions_Brochure_German.pdf?view= (Letöltés időpontja: 2026.04.30.)

[5] BASF: Elastollan Processing: Injection Moulding. {online}
https://www.basf.com/dam/jcr%3Adb114308-e458-3dcf-bd1d-ca262c80ac3a/Elastollan_Processing_en-injection-moulding.pdf (Letöltés időpontja: 2026.04.30.)

[6] Autodesk University: Optimize Plastic Part Designs: Injection Molding Simulation. {online} https://static.au-uw2-stg.autodesk.com/Class_Handout_CP500672_ClassHandout-CP500672-VanAst-AU2022.pdf (Letöltés időpontja: 2026.04.30.)

[7] Autodesk: Autodesk Moldflow Adviser Detailed Brochure. {online}
https://images.autodesk.com/adsk/files/autodesk_modflow_adviser_detailedbrochure.pdf (Letöltés időpontja: 2026.04.30.)

[8] Autodesk: Autodesk Moldflow Detailed Brochure. {online}
https://images.autodesk.com/adsk/files/moldflow_detail_brochure_en.pdf
(Letöltés időpontja: 2026.04.30.)