

Düşük Üretim Hacimli Enjeksiyon Kalıplama İçin 3B Baskı ile Hızlı Kalıp İmalatı

Omer Eyercioglu¹

Özet

Enjeksiyon kalıplama, polimerik parçalar üretmek için en yaygın üretim yöntemlerinden biridir. Genellikle, seri üretim için çoğu kalıp, uzun takım ömrü sağlayan takım çeliğinden veya daha düşük basınçlar için alüminyum alaşımından yapılır. Ancak, bu malzemelerden üretilen kalıpların önemli dezavantajları; uzun imalat süreçleri ve maliyetleridir. Özellikle istenilen geometri ve yüzey kalitesinin elde edilmesi klasik talaşlı imalat teknolojilerinin beraberinde elektriksel erozyon (EDM) veya elektro-kimyasal (ECM) işleme teknolojilerinin kullanılmasını gerektirir. Bu durum, prototip üretimi veya küçük partiler (küçük üretim hacmi) için takım maliyetlerinin üstesinden gelmeyi gerçekten zorlaştırır. Prototip için eklemeli imalat yöntemlerinin kullanılması önemli bir avantaj sağlasa da, eklemeli imalat yöntemi ile imal edilen parçaların mukavemeti genel olarak enjeksiyon kalıplamadan düşüktür ve ideal bir prototip üretimi için yeterli olmayabilir. Ancak, enjeksiyon kalıplarının eklemeli imalat yöntemi ile üretimi, düşük basınçlı enjeksiyon kalıplama ve düşük üretim hacimleri için önemli avantajlar sunmaktadır. Bu çalışma, iki yöntemi; düşük basınçlı enjeksiyon kalıplama ile 3D baskı/dijital ışık işleme yöntemlerini kalıp imalatı için birleştirmeye yöneliktir. Bu tür hibrit üretim, alüminyum/çelik kalıplardan daha ucuz bir alternatif sunmaktadır. Bu yöntemle imal edilen enjeksiyon kalıpları, yüksek verimlilik ve kısa teslim süreleri ile özellikle karmaşık geometrili parçalar üretme fırsatı sağlar. Bu çalışmada, düz-helisel çift plastik dişli (double gear) seçildi ve dişlinin katı modelleri ve iki parçalı kalıbı bir tasarım yazılımı kullanılarak hazırlandı. Kalıp, UV duyarlı reçine kullanılarak basıldı ve yüksek yoğunluklu polietilen, düşük basınçlı bir enjeksiyon makinesi kullanılarak 3D yazdırılmış kalıba enjekte edildi. Ortaya çıkan parçaların yüzey kalitesine ve boyut doğruluğuna sahip olduğu görüldü. Sonuçlar, eklemeli imalat ve enjeksiyon kalıplamanın birleşiminin düşük miktarda üretim için sağlam bir hibrit yöntem olduğunu göstermektedir. 3D yazdırılmış kalıplar, hızlı takım üretimi sağlayan enjeksiyon sıcaklığını kontrol ederek birçok kez (10-100 adet) kullanılabilir.

1 Gaziantep Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Şehitkamil, 27310 Gaziantep
eyercioglu@gantep.edu.tr, ORCID ID:0000-0002-9076-0972

1. Giriş

Enjeksiyon kalıplama, polimerik parçalar üretmek için en yaygın üretim yöntemlerinden biridir. Genellikle, seri üretim için çoğu kalıp, uzun takım ömrü sağlayan takım çeliğinden veya daha düşük basınçlar için alüminyum alaşımından yapılır. Ancak, bu malzemelerden üretilen kalıpların önemli dezavantajları; uzun imalat süreçleri ve maliyetleridir. Özellikle istenilen geometri ve yüzey kalitesinin elde edilmesi klasik talaşlı imalat teknolojilerinin beraberinde elektriksel erozyon (EDM) veya elektro-kimyasal (ECM) işleme teknolojilerinin kullanılmasını gerektirir. Bu durum, prototip üretimi veya küçük partiler (küçük üretim hacmi) için takım maliyetlerinin üstesinden gelmeyi gerçekten zorlaştırır [1]. Prototip için eklemeli imalat yöntemlerinin kullanılması önemli bir avantaj sağlasa da, eklemeli imalat yöntemi ile imal edilen parçaların mukavemeti genel olarak enjeksiyon kalıplamadan düşüktür ve ideal bir prototip üretimi için yeterli olmayabilir. Ancak, enjeksiyon kalıplarının eklemeli imalat yöntemi ile üretimi, düşük basınçlı enjeksiyon kalıplama ve düşük üretim hacimleri için önemli avantajlar sunmaktadır [2].

Hızlı takım imalatının (rapid tool manufacturing) temel amacı üretim maliyetini ve süresini azaltmak olsa da, aynı zamanda ürünleri özelleştirmeye yönelik artan ihtiyaçlar için de kullanılmaktadır. Günümüzde çoğu hızlı takım tipik olarak karmaşık şekiller elde etmeyi sağlayan eklemeli imalat (3B baskı) yöntemleri ile üretilmektedir [3].

Eklemeli imalat ilkesi, genellikle son frezeleme veya bitirme işlemlerine ihtiyaç duyulmadan, malzemeyi katman katman, hassas geometrik şekillerde biriktirmek için bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımı kullanarak malzemeleri birleştirme sürecidir. Eklemeli imalat teknolojilerinin, sağladıkları avantajlara rağmen, uzun 3B baskı süresi, üretilebilecek parça sayısına kıyasla nispeten yüksek maliyet ve ön hazırlık süreçleri gibi birçok dezavantajı da vardır. Ayrıca, katmanların birbirine bağlanma mukavemeti ve muhtemel gözenekli yapısı, genellikle izotropik olmayan mekanik özelliklere neden olabilmekte ve orantılı olarak pürüzlü yüzeyler oluşturmaktadır. Bahsedilen sorunların tümü, eklemeli imalat yöntemi ile enjeksiyon kalıplamayı birleştirerek hızlı prototipleme için bir hibrit imalat yöntemi geliştirme fikrine yol açmıştır [4-5].

Birçok eklemeli imalat yöntemi (FDM, SLA, SLS, Binderjet, vb.) bu amaçla kullanılmakla beraber, Dijital Işık İşleme (DLP) yöntemi, yüzey kalitesi ve yüksek geometrik hassasiyeti nedeniyle önemli bir potansiyele sahiptir. Bu yöntem, 3B yazıcının parçanın kesitinin görüntüsünü reçine yüzeyine yansıttığı ve reçine polimerizasyon sürecini sağlamak için bir video UV ışık projektörünün kullanıldığı eklemeli imalat yöntemlerinden biridir.

Reçine, cihazın eksenine z eksenine doğru hareket ederken aynı anda katman katman ultraviyole ışınlarına sürekli olarak maruz kalması sonucunda sertleşmeye devam eder ve bu da nihayetinde parçanın yüksek bitirme hassasiyeti ve daha az kusurla tamamen inşa edilmesini sağlar [6]. Ancak, elde edilen parçanın mukavemeti ve özellikle enjeksiyon kalıplamada ihtiyaç duyulan sıcaklıklara dayanımı konusunda çalışmalar devam etmektedir.

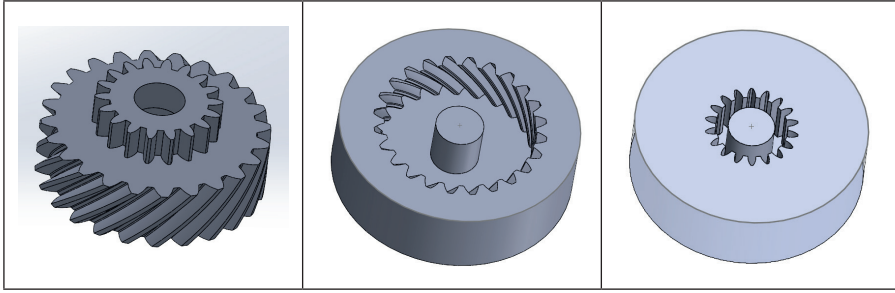
Bu çalışma, düşük basınçlı enjeksiyon kalıplama ve 3D baskı/dijital ışık işleme (DLP) yöntemlerinin birleştirilerek, hızlı kalıplama ile polimerik parça üretiminin fizibilitesini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Çalışma, zaman ve maliyeti minimum seviyelerde tutarken en iyi sonuçları elde edene kadar süreç parametrelerini kontrol etmeyi kapsamaktadır. Vaka çalışması için bir düz-helis çift dişli seçilmiş ve dişlinin katı modelleri ve iki parçalı kalıbı bir tasarım yazılımı kullanılarak hazırlanmıştır. Kalıp, UV duyarlı reçine kullanılarak basılmış ve yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), düşük basınçlı bir enjeksiyon makinesi kullanılarak 3D basılmış kalıba enjekte edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Vaka çalışması için düz-helis çift dişli seçilmiş olup, dişlinin katı modelleri ve iki parçalı kalıbı tasarım yazılımı kullanılarak hazırlanmıştır. Konik dişlinin özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Kalıp, enjeksiyon sonrası parçanın kalıptan kolayca çıkarılmasını sağlamak için gerekli eğim ve toleranslara sahip, üst ve alt kalıp olmak üzere iki parçalı olarak tasarlanmıştır. Kalıp bileşenlerinin katı modelleri Solidworks™ yazılımı kullanılarak tasarlanmış ve 3B baskı için nihai modeller STL formatında üretilmiştir. Kalıp bileşenleri Anycubic™ Workshop Yazılımı kullanılarak baskıya hazırlanmıştır. Katman kalınlığı ve dolgu yoğunluğu sırasıyla 50 μm ve %100 olarak ayarlanmıştır. Bileşenlerin silindirik düz tabanları nedeniyle herhangi bir desteğe gerek duyulmamıştır. Şekil 1'de düz-helis çift dişlinin ve üst-alt kalıbının katı modelleri gösterilmektedir.

Tablo 1 Düz-helis çift dişlinin ölçüleri.

Dişli Tipi	Helisel dişli	Düz Dişli
Modül	1 mm	1 mm
Diş Sayısı	24	18
Mil Çapı	8 mm	8 mm
Basınç Açısı	20 °	20 °
Diş Genişliği	10 mm	5 mm



Şekil 1. Diüz-belis çift dişli ve alt-üst kalıpların 3B katı modelleri.

Alt ve üst kalıbı oluşturulan dilimleme dosyası daha sonra DLP yazıcıya yüklenmiştir. Ön testlerden sonra, 60 saniyelik iki alt katman pozlama süresinin yapı plakasının yapışmasını sağlamak için yeterliydi olduğu tespit edilmiştir ve 8 saniyelik pozlama süresinin diğer katmanları başarıyla kürlediği görülmüştür. 3B Yazıcı LCD tabanlıdır ve UV entegreli bir ışık (dalga boyu 405nm) kaynağına sahiptir. Yazıcının XY çözünürlüğü 47 mikrondur (2560x1440) ve gücü 50W'tır. Bu şartlarda kalıpların baskı süresi 70 dakika olarak gerçekleşmiştir.

DLP baskı için ışığa duyarlı reçine olarak yüksek sıcaklık reçinesi (Phrozen TR300) kullanılmıştır. Reçinenin kimyasal bileşimi akrilat oligomer, Tris (2-hidroksi etil) izosiyanürat triakrilat, akrilolil morfolin, difenil (2, 4, 6-trimetil benzoil) fosfin oksit <%5) ve pigment <%1 içerir. Tablo 2, üreticinin web sitesinde belirttiği gibi Phrozen TR300 reçinesinin mekanik ve fiziksel özelliklerini göstermektedir.

Table 2. PHROZEN TR300 yüksek sıcaklık reçinesinin fiziksel ve mekanik özellikleri.

Yoğunluk	1.17 g/cm ³
Viskozite	160-250 Cp
Sertlik (yüzey)	80 Shore D
Kopma Mukavemeti	54 Mpa
Kopma Uzunluğu	2%
İzod darbe enerjisi	20.2 J/m
Çekme Modülü	2749 Mpa
Isıl Sapma Sıcaklığı HDT 0.45 MPa	156 °C
Cam geçiş Sıcaklığı, T _g	220 °C

3B baskı tamamlandıktan sonra kalıplar, yüzeylerindeki fazla reçineyi çıkarmak için yıkanmıştır. Yapışkan reçineyi çıkarmak için çözücü olarak izopropil alkol (IPA) kullanıldı ve bu işlem 4 dakika sürmüştür. Daha sonra yaklaşık 2 dakika boyunca 40W UV ışığı altında son kürleme gerçekleştirilmiştir. Yıkama ve son kürleme için Şekil 2'de gösterildiği gibi Anycubic yıkama ve kürleme makinesi kullanılmıştır.



Şekil 2. Anycubic DLP 3B photon 3Baskı ve yıkama-kürleme cihazları.

Enjeksiyon kalıbı alüminyum blok ve 3d baskıdan elde edilen kalıp çekirdeğinin montajı ile tamamlanmıştır. 3D yazdırılmış kalıplar alüminyum bloğun silindirik haznesine yerleştirilmiştir. Alüminyum bloğun amacı kalıp ek parçasını enjeksiyon basıncına karşı daha fazla desteklemektir. Şekil 3'te gösterilen düşük basınçlı bir enjeksiyon kalıplama makinesi dişlinin üretimi için kullanılmıştır.



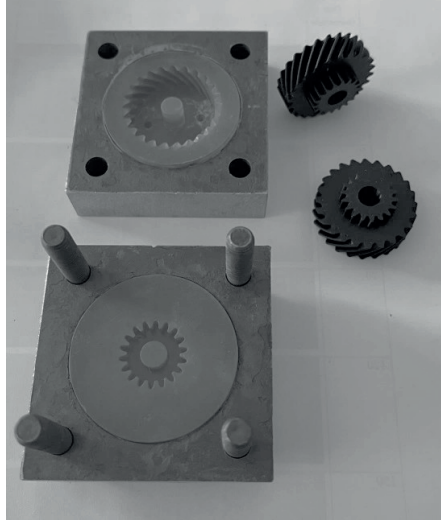
Şekil 3. Düşük basınçlı enjeksiyon kalıplama makinası.

Dişli malzemesi için ticari yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) granüller kullanılmıştır. Enjeksiyon makinesinin haznesi polimer granüllerle doldurulmuş ve enjeksiyon sıcaklığına kadar ısıtılmıştır. HDPE'nin erime noktası 131 °C'dir, ancak kalıbın doldurulmasının tamamlandığından emin olmak için enjeksiyon sıcaklığının daha yüksek olması gerekmektedir.

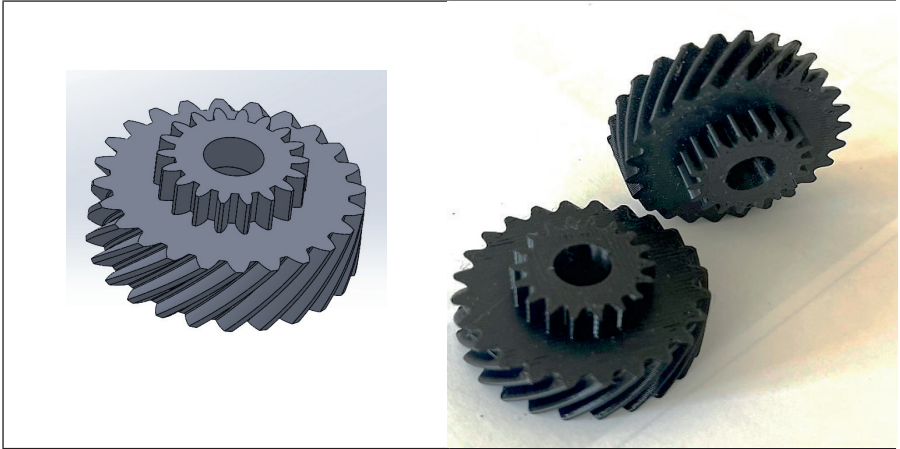
3. DeneySEL Bulgular ve Tartışma

Enjeksiyon sıcaklığı basitlik açısından deneme yanılma yöntemi ile bulunmuş, kalıp doldurma simülasyonları bu aşama kullanılmamıştır. Sonuç olarak, 185 °C enjeksiyon sıcaklığı kalıp dolumu uygun bulunmuştur. Enjeksiyon sıcaklığı, enjeksiyon malzemesine, geometriye ve kalıbın yolluk sistemine bağlıdır. Daha uzun kalıp doldurma süresi için daha fazla aşırı ısıtma gerekebilir. Hem kalıp reçinesi ve hem de sıvı polimerin bozulma tehlikesi nedeniyle enjeksiyon sıcaklığı sınırlı tutulmalıdır. Enjeksiyondan sonra, herhangi bir büzülme boşluğu oluşumunun üstesinden gelmek için kalıp, enjeksiyon basıncı altında bir süre bekletilmiştir. Kalıp malzemesinin (polimer) düşük ısı iletkenliği nedeniyle, dişlinin kalıptan çıkarılması, dişlinin uygun şekilde katılaşması ve soğuması için yaklaşık 3 dakika beklenilmiştir. Bu süreler endüstriyel uygulamalar için simülasyonlarla optimize edilmelidir.

Enjeksiyon işlemi aynı kalıp kullanılarak 10 kez tekrarlanmıştır. Ancak kalıp, çalışmaya devam etmesini engelleyen bir hasara maruz kalmadan şeklini ve boyutlarını koruduğu görülmüştür. Aynı şekilde, enjekte edilen parçalar kabul edilebilir kalitede ve dış görünüşleri oldukça benzer şekilde elde edilmiştir. Şekil 4, alüminyum destek bloğu dahil olmak üzere kalıp montaj bileşenlerini gösterirken, Şekil 5 tasarlanan modeli ve enjekte edilen parçayı göstermektedir.



Şekil 4. Kalıp bileşenleri ve üretilen dişliler

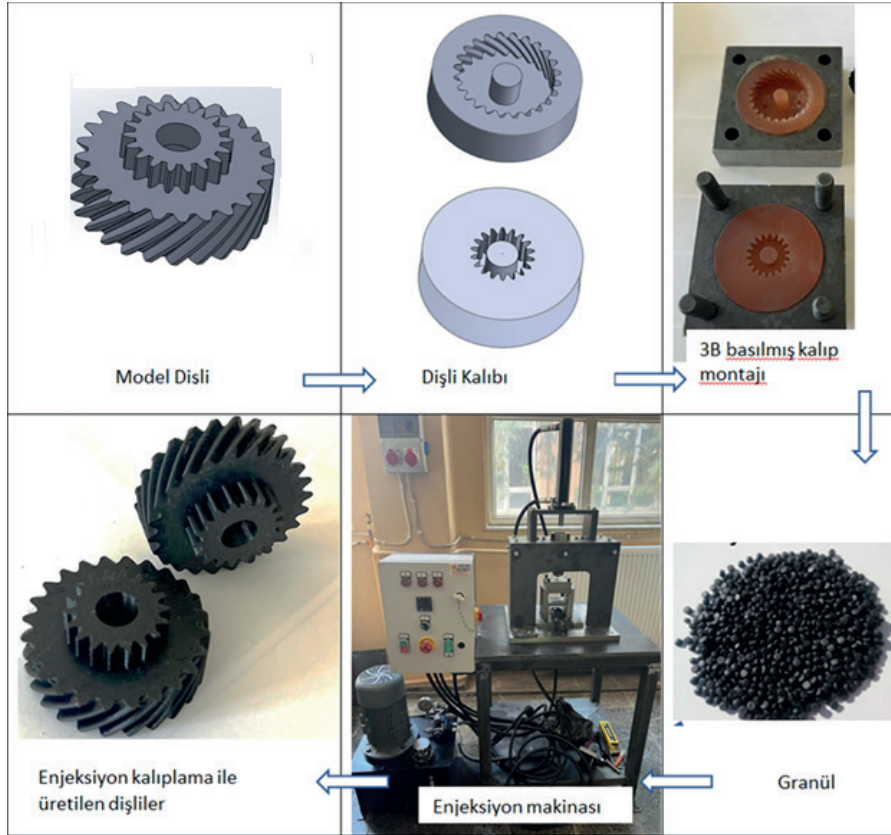


(a)

(b)

Şekil 5. Düz-helis çift dişli a) tasarlanan model b) enjeksiyon ile üretilen dişliler.

Eklemeli imalat ve enjeksiyon kalıplama yöntemlerinin birlikte kullanıldığı hızlı enjeksiyon kalıp imalatının genel süreç döngüsü Şekil 6'da şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 6. Eklemeli imalat ve enjeksiyon kalıplama yöntemlerinin birlikte kullanıldığı hızlı enjeksiyon kalıp imalatının genel süreç döngüsü.

4. Sonuç

Bu çalışmada, düşük basınçlı enjeksiyon kalıplama ile polimerik parça üretiminde, eklemeli imalat yöntemi ile hızlı kalıp üretiminin bir uygulaması gerçekleştirilmiştir. Yukarıda aşamaları sunulan hibrit üretim yöntemi, alüminyum/çelik kalıplardan daha ucuz bir alternatif sunmaktadır. 3D Baskı/dijital ışık işleme (DLP)) ile imal enjeksiyon kalıpları, düşük maliyet ve daha kısa teslim süreleri ile karmaşık geometrili parçaları daha verimli üretme fırsatı sunmaktadır. Kalıp akış simülasyonları, konformal soğutma kanalları ile enjeksiyon kalıplama çevrim sürecinin düşürülmesi ve çeşitli katkılarla

UV reçinelerin daha yüksek sıcaklık ve mukavemete ulaştırılması ile kalıp ömrünün uzatılabilmesi (daha fazla sayıda parça üretimi) mümkün olacaktır.

Teşekkür

Bu çalışmaya sağlanan mali destek için Gaziantep Üniversitesi Bilimsel Araştırmaları Destekleme Projeleri Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Kaynakça

- 1- Bagalkot, D. Pons, D. Clucas, and D. Symons, “ A methodology for setting the injection molding process parameters for polymer rapid tooling inserts,” Rapid Prototyp. J., no. January, p. RPJ-10-2017-0217, Jan. 2019.
- 2- Daniele Fariolia , Matteo Stranoa , Francesco Briatico Vangosab , Veronica Geraldine Zaragozac , Andrea Aicard, Rapid tooling for injection molding inserts, 24th International Conference on Material Forming (ESA-FORM 2021).
- 3- C. M. Cheah, C. K. Chua, C. W. Lee, C. Feng, and K. Totong, “Rapid prototyping and tooling techniques: A review of applications for rapid investment casting,” Int. J. Adv. Manuf. Technol., vol. 25, no. 3–4, pp. 308–320, 2005.
- 4- Hegab,H.A, design for additive manufacturing of composite materials and potential alloys; a review, manufacturing review.2016 ,3,11.
- 5- Guardia, L, Fiore, O , Lovo Italo, P, De Camargo, L, Rejane, C, Carlos, C, Fortulan, A , 3D DLP additive manufacturing: printer and validation , 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, January, 2017.
- 6- VELLA A, ROCHMAN Arif, VELLA P, Rapid tooling development for low volume injection molding of cosmetic compacts, ESAFORM 2023 Materials Research Forum LLC Materials Research Proceedings 28 (2023) 207-216.