



Yüksek Performanslı Polimerlerde Hacimsel Çekmenin Mold Flow Analizleri ile Belirlenmesi

Hasan Öktem^{1*}, Halit Karasungur²

^{1*} Kocaeli Üniversitesi, Polimer Bilimi ve Teknolojisi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, (ORCID: 0000-0003-2526-8364), hoktem@kocaeli.edu.tr

² Kocaeli Üniversitesi, Polimer Bilimi ve Teknolojisi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-3331-8299), halitkarasungur@gunesplastic.com.tr

(İlk Geliş Tarihi 15 Nisan 2023 ve Kabul Tarihi 22 Haziran 2023)

(DOI: 10.31590/ejosat.1283359)

ATIF/REFERENCE: Öktem, H., & Karasungur, H., (2023). Yüksek Performanslı Polimerlerde Hacimsel Çekmenin Mold Flow Akış Analizleri ile Belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (51), 203-208.

Öz

Yüksek performanslı ileri polimerler ile plastik ürünlerin basımında oluşabilecek ölçüsel hataların daha önceden belirlenmesinde, günümüz teknolojisinde bilgisayar destekli mühendislik analizlerinden önemli ölçüde yararlanılmaktadır. Bu çalışmada, farklı enjeksiyon sıcaklığına sahip PPS (Polipropilen Sülfid) ve PK (Poliketone) gibi yüksek performanslı ileri polimerler ile ürün basımı sonrasında meydana gelebilecek ölçüsel hataların, Mold Flow plastik analiz programı ile tahmin edilmesi hedeflenmiştir. Bu amaç için Taguchi deneysel tasarıma göre (L_9) planlanmış 18 Mold Flow analizi gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, eriyik sıcaklığı, soğutma süresi ve yolluk giriş yeri gibi üç enjeksiyon şartı kullanılarak, hacimsel çekme değerleri elde edilmiştir. Çalışma sonrasında, hacimsel çekmeden kaynaklı ölçüsel hatalar üzerinde en etkili enjeksiyon şartının öncelikle yolluk giriş yeri ve sonra da soğutma zamanı olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, Mold flow akış analizleri sayesinde plastik ürünün basım süreçleri daha önceden belirlenerek maliyet ve zaman üzerinde önemli kazançlar sağlanabilir.

Anahtar Kelimeler: Yüksek performanslı polimerler, Ölçüsel hatalar, Moldflow analizleri.

Determination of Volumetric Shrinkage in High Performance Polymers by Mold Flow Analyses

Abstract

In today's technology, computer-aided engineering analyzes are used to determine the dimensional errors that may occur in the injection of high-performance advanced polymers and plastic products. In this study, it is proposed to determine the dimensional errors that may occur after product injection with high performance advanced polymers such as PPS (Polypropylene Sulfite) and PK (Polyketone) with different injection temperatures, with the Mold Flow plastic flow analysis program. For this purpose, 18 Mold Flow analyzes planned according to Taguchi experimental design (L_9) were conducted. In the analyses, volumetric shrinkage values were obtained by using three injection conditions such as melt temperature, cooling time and runner gate. After the study, it was seen that the most effective injection condition on the dimensional errors caused by volumetric shrinkage was firstly the runner gate and then the cooling time. As a result, thanks to Mold flow flow analysis, the injection processes of the plastic product can be determined in advance, and significant savings can be achieved on the cost and time.

Keywords: High performance polymers, Dimensional errors, Mold Flow analyses.

* Sorumlu Yazar: hoktem@kocaeli.edu.tr

Prof. Dr. Hasan ÖKTEM

Kocaeli Üniversitesi

1. Giriş

Yüksek performanslı ileri mühendislik polimerleri, yüksek dayanım, düşük ağırlık ve iyi yüzey kalitesi gibi özelliklerinden dolayı plastik kalıp endüstrisinde yaygın bir kullanım alanı bulmaya başlamıştır (Akyüz, 2006), (Şavaşçı ve Kovalı, 2008), (Beamunt, v.d., 2000). Yüksek performanslı polimerlerin enjeksiyon sıcaklıkları diğer genel amaçlı polimerlere göre daha yüksek olduğundan, bunların kalıplanması daha zordur (Arıcioğlu vd., 2000), (Akkurt, 2007). Ancak, bu polimerler otomotiv ve uçak endüstrisindeki kritik parçaların üretiminde yüksek mukavemet/düşük ağırlık gibi özelliklerin istendiği durumlarda önemli avantajlara sahiptirler (Ezdeşirler vd., 2007). Bazı araştırmacılar, genel amaçlı polimerler (Polipropilen) kullanarak farklı enjeksiyon şartları (enjeksiyon sıcaklığı, enjeksiyon basıncı, kalıplama süresi ve katkı maddesi) kullanılarak basılan plastik ürünlerin hacimsel çekme miktarını hesaplamışlardır (Çakır vd., 2001), (Iyer vd., 2002). Diğer araştırmacılar ise sekiz farklı polimer kullanarak, enjeksiyon şartlarının hacimsel çekme üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmada oluşturulan, termo-elastik model ile tüm sonuçları tahmin etmeye çalışmışlardır (Jansen vd., 1998). Diğer bir grup araştırmacı, bir telefon kapağının enjeksiyon işlemi sonrasında oluşan hacimsel çekme ve çarpılma problemleri üzerine odaklanmışlardır. Çalışma sonunda, hacimsel çekme ve çarpılmaya etki eden en önemli enjeksiyon şartının ütüleme basıncı olduğunu ifade etmişlerdir (Öktem, 2012), (Liao vd., 2004). Bir çalışmada araştırmacılar, Taguchi deneysel tasarıma göre planladıkları enjeksiyon deneylerini yaparak, enjeksiyon şartlarının çekme üzerindeki etkilerini incelemişlerdir (Huan v.d, 2008).

Eriyik plastiğin kalıp kavite gözlerine dolumunu etkileyen en önemli şartlar, yolluk giriş yeri, sayısı ve biçimidir. Özellikle, yolluk giriş sayısı, plastik parçanın boyutsal değişimi üzerinde önemli etkiye sahiptir. Böylelikle, doğru yolluk giriş sayısının seçilmesi, plastik ürünün de ileri düzeyde parça hassasiyetine sahip olmasını sağlayacaktır. Ancak, yolluk giriş yeri ve sayısının, Mold Flow analizi sayesinde, en düşük çekmeyi veren uygun tasarımların gerçekleştirildiği belirtilmiştir (Chavan v.d., 2023). Bir çalışmada araştırmacılar, konkav ve konveks biçimindeki optik lenslerin Polikarbonat polimerden basım işlemini gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde, ütüleme basıncı, enjeksiyon hızı ve eriyik sıcaklığı gibi üç enjeksiyon işlem şartını Taguchi deneysel tasarıma göre planlamışlardır. Plastik lenslerin paralel ve dik yöndeki ölçüsel sapmaları, analitik formüller ile gerçek ölçümlerden alınan değerleri ile kıyaslanarak ölçüsel hatalar kontrol edilmiştir. Ayrıca, Mold Flow analizleri de gerçekleştirilerek ölçüsel hatalar kontrol edilmiştir. (Zhou v.d., 2020). Diğer bir grup araştırmacı, bir kapı kolu parçasının plastik enjeksiyon basımı işleminde, soğutma işlem şartının, parçanın çarpılma dolayısıyla hacimsel çekme üzerindeki etkisini Mold Flow analizi ile incelemişlerdir. Konformal (bölgesel) soğutmanın parçanın hacimsel çekme ve çarpılma üzerinde çevrim süresini ve ölçüsel hataları azaltmak için önemli bir rol oynadığını ifade etmişlerdir (Deepika, v.d.,2020), (Barghikar v.d., 2019). Bahsedilen çalışmalara benzer fakat mikro ölçüdeki çekmeleri tahmin edebilmek bir başka çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, üretilen plastik parça ile Simülasyon sonuçları karşılaştırılarak kalite indeksi belirlenmiştir. (Huan v.d., 2022). Literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak, özellikle yüksek performanslı polimerlerde mekanik, fiziksel özelliklerin belirlenmesinde deneysel çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, üç enjeksiyon işlem şartı kullanılarak gerçekleştirilen plastik deneyleri sonunda yüzde çekme-uzama, eriyik akış indeksi ve hacimsel çekme değerleri elde edilmiştir. Çalışma sonunda, yolluk giriş yeri ve eriyik sıcaklığının yüksek performanslı ileri polimerlerin mekanik ve ölçüsel hataları üzerinde etkili olduğu belirtilmiştir (Öktem v.d, 2023).

Bu çalışmada, bahsedilen tüm çalışmalardan ve literatürden farklı olarak, iki yüksek performanslı ileri polimerin plastik enjeksiyon işleminde eriyik sıcaklığı, soğutma zamanı ve yolluk giriş tipi kullanılarak L₉ taguchi deneysel tasarıma dayalı Mold Flow plastik eriyik analizleri gerçekleştirilmiştir. Mold Flow analizlerinden, her iki malzemenin dolun zamanları, parça sıcaklıkları ve hacimsel miktarları elde edilmiştir. Ancak, ölçüsel hataların belirlenmesinde hacimsel çekme değerleri daha önemli olduğu için dikkate alınmıştır. Analizler ile gerçek ölçüm sonuçları kıyaslandığında, Mold Flow plastik analiz programının çok etkin sonuçlar verdiği görülmüştür. Böylelikle, plastik numune basılmadan hem güvenilirlik hem de maliyet açısından önemli kazançlar sağlamıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Plastik Enjeksiyon Şartları

Bu çalışmada, Mold Flow analizlerinden elde edilen sonuçları karşılaştırabilmek için plastik enjeksiyon tezgahında gerçekleştirilen deneylerin işlem şartları, Tablo 1 ve Tablo 2’de gösterilmiştir. Bu değerler, üretici firmaların kataloglarından alınmıştır.

Tablo 1. Plastik enjeksiyon şartları (PPS)

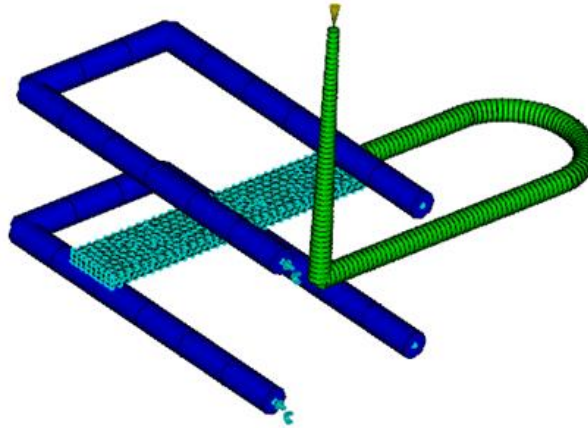
Seviyeler	Eriyik Sıcaklığı	Soğutma süresi	Yolluk Giriş Tipi
1	320	4	1
2	330	8	2
3	340	12	3

Tablo 2. Plastik enjeksiyon şartları (PK)

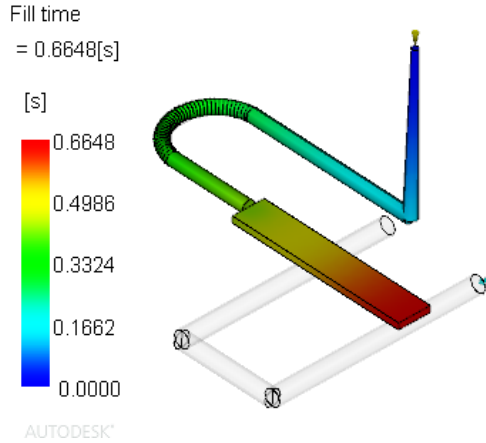
Seviyeler	Eriyik Sıcaklığı	Soğutma süresi	Yolluk Giriş Tipi
1	250	4	1
2	260	8	2
3	270	12	3

2.1.1. Mold Flow Analizleri

Bu çalışmada, $110 \times 20 \times 4 \text{ mm}^3$ ölçülerinde plastik numunenin bilgisayar destekli tasarım (CAD) modeli kullanılarak, plastik kalıp eriyik akış analizleri gerçekleştirilmiştir (MFI, 2005). Şekil 1, PPS ve PK polimerleri için Mold Flow analizlerinde kullanılacak olan mesh (yüzeyi üçgenlere bölerek, noktalar ile birleştirme) modelini göstermektedir. Bu mesh modelinde, 1656 eleman, 2 mm yerel kenar uzunluğu ve Dual Domain tip dilimleme kullanılmıştır. Tablo 1 ve Tablo 2'deki enjeksiyon şartları kullanılarak, PPS ve PK malzemeler için 18 adet Mold Flow analizi, L_9 Taguchi deneysel tasarıma göre sırasıyla gerçekleştirilmiştir (Minitab 17, 2007), (Montgomery, 2005).



Şekil 1. Mold Flow Analizi (Mesh modeli)



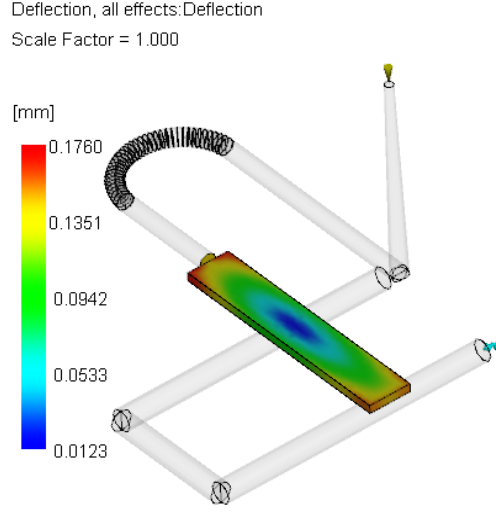
Şekil 2. Dolum analizi

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışmalar

Araştırma sonunda, elde edilen Mold Flow analiz sonuçları ve bu sonuçların yorumlanması, diğer ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması, detaylı olarak açıklanmıştır. Şekil 2 ve 3, plastik numunenin dolum zamanı ve hacimsel çekme analiz uygulamalarını göstermektedir. Şekil 2 incelendiğinde, plastik numunenin 0.6648 saniyede dolduğu görülmektedir. Şekil 3'te ise tüm yönlerdeki hacimsel çekme değerinin en az 0.0123 mm, en fazla 0.1760 olduğu gözlenmiştir. Bu analizde, plastik numune modeline eriyik bir noktadan giriş yaparak dolumu gerçekleştirmiştir. Tablo 3, PPS ve PK polimer malzemeler için Mold Flow analiz sonuçları, gerçek ölçüm sonuçlarını ve ölçüsel doğruluk için hata oranlarını göstermektedir. Tablo 3'deki hata oranları, her iki malzeme için elde edilen gerçek ölçüm ve Mold Flow analiz değerlerini, plastik numune CAD ölçülerini dikkate alarak hesaplanmıştır.

Tablo 3'deki değerler, plastik numunenin uzunluk yönündeki (X), genişlik yönündeki (Y) ve kalınlık yönündeki (Z) hacimsel çekme sonrasında elde edilen değerlerini göstermektedir. PPS malzeme için X yönündeki (numune uzunluğu boyunca) Mold Flow analiz değerleri ile gerçek ölçüm değerleri arasında ölçüsel doğruluk oldukça yüksektir. Y ve Z yönlerinde ise ölçüsel doğruluk daha

düşüktür. PK malzemede ise Y yönündeki ölçüsel doğruluk, X ve Z yönlerindeki ölçüsel doğruluğa göre nisbeten daha yüksektir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, eriyik akış yönündeki hacimsel çekme değerlerinin kullanılmasının daha doğru ve efektif olduğu ifade edilmiştir. En düşük ölçüsel doğruluk, PK polimer malzemesinin Z yönünde elde edilmiştir. Bundan dolayı, hacimsel çekme kaynaklı ölçüsel hataların değerlendirilmesinde, X yönündeki gerçek ölçüm ve analiz değerleri dikkate alınmıştır. PK polimer malzemeden elde edilen değerlerin ölçüsel doğruluğunun daha düşük olmasının sebebinin, polimerlerin morfolofik yapısı ile ilgili olduğu düşünülmektedir (Campo, 2008), (Beamunt, 2002). Diğer taraftan, PPS malzemenin gerçek ölçüm değerlerinin, PK malzemeye göre daha yüksek olduğu görülebilir.



Şekil 3. Hacimsel çekme değerleri

Plastik numunenin, Mold flow analizlerinden elde edilen değeri ile gerçek ölçüm değeri karşılaştırılarak, hacimsel çekme kaynaklı ölçüsel hatalar hesaplanmıştır. Bu ölçümlerde, Şekil 4'te gösterilen 0.001 hassasiyete sahip bir dijital kumpas kullanılarak doğrulama işlemi gerçekleştirilmiştir (Campo, 2008).



Şekil 4. Plastik Numunenin Ölçüsel Hata Kontrolü

Tablo 3. Hacimsel çekme için Karşılaştırılması

Polimerler	Hacimsel Çekme Sonuçları (%)									
	Deneyler	Mold Flow Analiz Değerleri (mm)			Gerçek Ölçüm Değerleri (mm)			Hata Oranları (%)		
		X yönü	Y yönü	Z yönü	X yönü	Y yönü	Z yönü	X	Y	Z
Polipropilen Sülfid (PPS)	1	109.451	19.829	3.974	109.820	20.20	4.02	0.336	1.835	1.157
	2	109.700	19.817	3.975	109.790	20.18	4.02	0.082	1.798	1.112
	3	109.597	19.685	3.973	109.600	20.08	4.03	0.003	1.965	1.414
	4	109.597	19.690	3.973	109.650	20.13	4.02	0.048	2.184	1.167
	5	109.442	19.907	3.973	109.800	20.18	4.02	0.326	1.351	1.172
	6	109.686	19.807	3.974	109.730	20.21	4.01	0.040	1.995	0.890
	7	109.677	19.802	3.973	109.780	20.17	4.02	0.094	1.824	1.159
	8	109.601	19.697	3.973	109.580	20.07	4.01	0.019	1.859	0.933

	9	109.444	19.828	3.973	109.760	20.19	4.02	0.288	1.795	1.164
Poliketon (PK)	1	109.254	19.700	3.957	107.65	19.74	4.01	1.490	0.202	1.319
	2	109.599	19.661	3.957	107.45	19.70	4.02	1.963	0.195	1.578
	3	109.340	19.376	3.950	107.95	19.75	4.02	1.288	1.893	1.741
	4	109.552	19.375	3.949	107.88	19.73	4.02	1.356	1.798	1.773
	5	109.170	19.691	3.755	107.78	19.75	4.02	1.289	0.295	6.577
	6	109.549	19.657	3.956	107.40	19.71	4.02	2.000	0.270	1.585
	7	109.552	19.658	3.955	107.48	19.72	4.02	1.930	0.316	1.597
	8	109.350	19.383	3.950	107.87	19.76	4.02	1.370	1.905	1.746
	9	109.182	19.692	3.955	107.68	19.74	4.02	1.395	0.245	1.614

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, iki farklı morfolojik yapıya sahip yüksek performanslı ileri polimer kullanılarak, bu polimerlerin hacimsel çekme kaynaklı ölçü değişimleri Mold Flow plastik analizi ile incelenmiştir. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

- Yüksek performanslı polimerlerin kalıplanabilme değerleri tespit edilerek uygulanmıştır.
- PPS polimerin işleme sıcaklığı, çok yüksek olduğu için basım işlemi esnasında meydana gelen problemler deneme-yanılma yöntemi ile çözülmüştür.
- Taguchi (L₉) Ortogonal deneysel tasarıma göre dizilmiş, enjeksiyon şartlarının değerleri ve aralıkları, tüm deneyin doğru yapılmasını sağlamıştır.
- Mold Flow analizlerinden hem PPS ve hem de PK malzeme için dolum süreleri tespit edilmiştir.
- Hacimsel çekme kaynaklı, plastik numune boyutlarındaki ölçüsel değişimler, Mold Flow analizi yardımı ile X, Y ve Z yönleri için tahmin edilmiştir.
- En yüksek doğruluk, PPS numunede eriyik akış yönü olan X yönü boyunca elde edilirken, en düşük hassasiyet PK polimer numunenin Z yönü boyunca elde edilmiştir.
- PPS polimer numunesinden elde edilen gerçek ölçüm değerleri, PK'a göre daha hassas sonuçlar vermiştir. Bunun sebebinin, PPS polimerin daha sıkı ve düzenli morfolojik yapıya sahip olduğu söylenebilir (Campo, 2008), (Beamunt, 2002).
- Mold Flow analizleri sonucunda, en etkili enjeksiyon işlem şartının, öncelikle yolluk giriş tipi ve sonra da eriyik sıcaklığı olduğu tespit edilmiştir.
- Sonuç olarak, gerçekleştirilen çalışmada seçilen enjeksiyon şartları ile Mold Flow analizleri yapılarak, plastik ürün basım yapılmadan önce, ürünün maliyet ve zamanından önemli kazançlar sağlanacağı ortaya çıkmıştır.

5. Teşekkür

Araştırmacılar, plastik enjeksiyon deneylerinin ve ölçümlerin yapıldığı GÜNEŞ Plastik Kalıp San. Tic A.Ş.'ye teşekkür etmektedirler.

Kaynakça

- Akyüz, Ö.F. (2006). Introduction of Plastics and Plastic Technologies, (3rd ed.), PAGEV Publications, İstanbul.
- Akkurt, S. (2007). Plastic Material Science and Mold Design, Birsen Publications, (1st ed.), İstanbul.
- Aricioğlu, M.K., Mert, B., Soydan, Y. (2000). Mechanical analysis methods of Polymer materials, Journal of Sakarya University Natural Sciences, 1, 2, 51-58.
- Barghikar, H. Mosaddegh, P., Masoumi, M., Ranjbar M. (2019). The Effect of Packing Phase and Mold Temperature on The Directional Warpage of Spherical Lenses using The Injection Molding Process, SN Applied Sciences, 1, 598. doi: 10.1007/s42452-019-0615-0.
- Beaumont, J.P., Nagel, R., Sherman, R. (2002). Successful Injection Molding: Hanser/Gardner Publications Inc., Cincinnati, USA.
- Campo, A. (2008). Selection of polymeric materials, William Andrew Publishing, Norwich, USA.
- Chavan, H.A., Wani V.P., Suryawanshi, S.R. Optimization of number of gates in plastic cladding tool with the help of mold flow analysis, Materials Today: Proceedings, Article in Press, 2023. doi:10.1016/j.matpr.2023.01.347
- Çakır, Y., Özdemir, A., Gültaş, A. (2001). Investigation of injection parameters affecting shrinkage amount in plastic products, Journal of Technology, 1-2, 19-29.
- Deepika, S.S., Patil, B. T., Shaikh, A. V. (2020). Plastic injection molded door handle cooling time reduction investigation using conformal cooling channels, Materials Today: Proceedings, 27,519-523. doi:10.1016/j.matpr.2019.11.316.
- Ezdeşir, A., Erbay, E., Taşkiran, İ., Yağcı, M.A., Cöbek, M., Bilgiç, T. (2006). Polimerler 1(3rd ed.), PAGEV Publications, İstanbul.
- Iyer, N., Ramani, K. (2002). A study of localized shrinkage in injection molding with high thermal conductivity molds, Journal of Injection Moulding Technology, 6 (2), 73-90. Corpus ID: 138699982.
- Jansen, K.M.B., Van Dijk D.J., Husselman M.H. (1998). Effect of processing conditions on shrinkage in injection molding, Polymer Engineering Science, 38(5), 838-846. doi: 10.1002/pen.10249.
- Liao, S.J., Chang, D., Chen, H.J., Tsou, L.S., Ho, J.R., Yau, H.T. (2004). Optimal Process Conditions of Shrinkage and Warpage of Thin Wall Parts". Polymer Engineering Science, 44, 917-928. doi: 10.1002/pen.20083.
- Minitab Statistical Software, Release 16, (2007). Making data analysis easier, State College, Minitab Corporation, USA.

- Moldblade, Plastic Injection Moulding: Main Defects in Injection Moulded Parts. (2022) .<https://moldblade.com/en/plasticinjection-moulding-main-defects-in-injection-moulded-parts/>. [Accessed: Dec, 30, 2022].
- MFI, (2005). Mold Flow Plastik Insigt Software, Autodesk Cooperation Inc.
- Huan, M.S., Chen, J.Y., Xiao, Y.Q. (2022). Quality Monitoring of Micro-shrinkage Defects in Thick-walled Injection Molded Components, *Measurement*, 201, 111733. doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111733.
- Öktem, H., Karasungur, H., Erođlu, A. Analysis of High Performance Advanced Polymers Reinforced with Glass Fiber, *Gazi University Natural Science Journal*, accepted March 20, 2023.
- Öktem, H. (2012). Optimum process conditions on shrinkage of an injected-molded part of DVD-ROM cover using Taguchi robust method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61, 19-528. doi: 10.1007/s00170-011-3750-3
- Montgomery, D.C. (2005). *Design and Anaysis of Experiments*, John Wiley & Sons Inc., Sixth Edition, USA.
- Savaşçı, Ö.T. Uyanık, N. Kovalı, G. *Plastics and Plastic Technology with Basic Lines*, İstanbul: 3rd edition, PAGEV Publications, 2008.
- Zhou, X., Zhang, Y., Yu, W., Li, M. Chen, Y., Zhou, H. (2020). An imaging performance analysis method correlated with geometrical deviation for the injection molded high-precision aspheric negative plastic lens, *Journal of Manufacturing Processes*, 58, 1115-1125. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.09.017.