

Plastik Enjeksiyon Süreçlerinde Isı Kontrolü: Sıcaklık ve Sürenin Optimizasyonu

Aziz Yazıcı^{1*}, Merdin Danışmaz²

¹Makine Mühendisliği / Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Türkiye

²Makine Mühendisliği / Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Türkiye

³Bölüm / Enstitü, Üniversite, Ülke

*(yaziciaziz98@gmail.com)

(Received: 30 November 2024, Accepted: 06 December 2024)

(3rd International Conference on Recent Academic Studies ICRAS 2024, December 03-04, 2024)

ATIF/REFERENCE: Yazıcı, A. & Danışmaz, M. (2024). Plastik Enjeksiyon Süreçlerinde Isı Kontrolü: Sıcaklık ve Sürenin Optimizasyonu. *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 8(11), 89-99.

Özet – Bu çalışma, plastik enjeksiyon kalıplama süreçlerinde ısıtma sıcaklığı ve süresinin optimize edilmesinin kritik önemini ele almaktadır. Farklı plastik türlerinin termal özellikleri detaylı bir şekilde incelenerek, termoplastikler ve termosetler için uygun ısıtma stratejileri geliştirilmiştir. Uygun sıcaklık profillerinin uygulanmaması durumunda, malzeme akışkanlığında bozulmalar ve istenmeyen kaynak hataları gibi sorunların ortaya çıkabileceği vurgulanmaktadır. Bu amaçla, 150 W, 250 W, 350 W ve 500 W gücündeki ısıtıcılarla yapılan analizlerde eriyik sıcaklığının hedeflenen 207-227 °C aralığına ulaşması sağlanmış, enerji beslemesi ve sıcaklık değişimleri değerlendirilmiştir. Üç farklı kelepçe ısıtıcı konumlarının ve güç seviyelerinin optimizasyonu, en uygun performansı belirlemek üzere gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, belirli güçlerde sağlanan ideal sıcaklık kontrolünün, kalıp dolgu sürecinde malzeme kalitesini artırdığını göstermektedir. Elde edilen bulgular, uygun sıcaklık profillerinin sürdürülmesinin yalnızca optimal malzeme akışını sağlamakla kalmayıp, nihai ürün kalitesini de artırmak için elzem olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, enjeksiyon süreci sırasında sıcaklık dağılımının izlenmesi, kalıp ortamının daha iyi kontrol edilmesine olanak tanıyarak, termal dalgalanmalardan kaynaklanan kalite sorunları riskini azaltmaktadır. Bu araştırma, plastik endüstrisindeki üreticiler için değerli kılavuzlar sunarak enjeksiyon kalıplama operasyonlarında verimlilik ve tutarlılığın artırılmasına katkıda bulunmaktadır. Gelecek çalışmalar, daha karmaşık geometriler ve değişken işleme senaryolarının etkisini inceleyerek bu ısıtma stratejilerinin geliştirilmesine olanak tanıyabilir ve yüksek kaliteli plastik bileşenlerin üretimine katkıda bulunabilir.

Anahtar Kelimeler – Plastik Enjeksiyon, Isıtma Sıcaklığı, Kelepçe Isıtıcı, Termostat (Isı Probu).

I. GİRİŞ

Plastik endüstrisi, dünya genelinde en hızlı büyüyen sektörlerden biri olup, plastik enjeksiyon kalıplama, karmaşık ve hafif bileşenleri yüksek hassasiyetle üretme yeteneği sayesinde baskın bir üretim süreci olarak öne çıkmaktadır. Gelişmiş üretim teknolojilerinin ortaya çıkışı, plastik ürünlerin ticari uygulanabilirliğini artırmış ve bu alanda cihazların küçültülme çabaları, karmaşıklık ve tasarım doğruluğu gibi unsurları ön plana çıkarmıştır. Enjeksiyon kalıplama, kalıp ve süreç tasarımındaki çok yönlülüğü ile uzun yıllardır plastik ürünlerin seri üretiminde önemli bir rol oynamış ve bileşenlerin mükemmel boyutsal toleranslarla neredeyse net şekillerde üretilmesine olanak tanımıştır [1]. Plastik enjeksiyon kalıplama, hafifliği, kimyasal

stabilitesi, iyi izolasyon özellikleri ve düşük maliyeti sayesinde metal malzemelerin yerini alarak yüksek kaliteli ürünlerin üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu süreç, karmaşık şekillerin ve boyutların hızlı ve yüksek hassasiyetle oluşturulmasını sağlar. Enjeksiyon kalıplama makineleri, granüler veya toz halinde polimer hammaddelerini ısıtarak ve mekanik kesme ile eritip plastikleştirerek, soğutma ve katılma işlemi ile kalıp boşluğuna enjekte eder. Bu makineler genellikle enjeksiyon sistemi, kalıp kapama mekanizması, hidrolik sistem ve elektrik kontrol sistemi gibi bileşenlerden oluşur. Enjeksiyon sistemi, plastikleştirme, enjeksiyon ve basınç sürme olmak üzere üç ana kısımdan oluşur. Kalıp kapama mekanizması, kalıbın güvenli bir şekilde kapatılmasını ve açılmasını sağlarken, hidrolik sistem ise enjeksiyon kalıplama makinesinin enerji verimliliğini ve ürün kalitesini etkileyen kritik bir bileşendir [2].

Enjeksiyon kalıplama teknolojisi, hassas enjeksiyon kalıplama ve geleneksel enjeksiyon kalıplama olarak ikiye ayrılabilir. Hassas enjeksiyon kalıplama, tekrar edilebilirlik, parametre kontrolü ve boyut kontrolü açısından geleneksel yöntemlere göre önemli avantajlar sunar. Örneğin, asferik plastik lenslerin kalıplama sürecinde, kalıp tasarımı ve süreç parametrelerinin etkisi araştırılmış ve enjeksiyon süreci parametrelerinin, kalıp tasarımına göre görüntü kalitesi üzerinde daha belirgin bir etkisi olduğu bulunmuştur. Ayrıca, simülasyon yazılımları kullanılarak büyük enjeksiyon kalıplama ürünlerinin kalıp tasarımlarının optimize edilmesiyle, mikro özelliklerin tahmin edilmesi ve doğrulanması sağlanmış, bu da ürünlerin doğruluğunu önemli ölçüde artırmıştır. Bu süreçler, plastik lenslerin kalıntı gerilimi ve deformasyon üzerindeki etkilerini inceleyerek, doğru enjeksiyon kalıplama parametrelerinin seçilmesinin ürün kalitesini artırabileceğini göstermektedir.

Enjeksiyon kalıplama süreci, polimerik malzemelerin ve kompozitlerinin reolojik ve termo-mekanik özelliklerinde önemli değişiklikler içermektedir. Bu değişiklikler, süreç boyunca farklı aşamalarda yaşanan gerilimler, yüksek ergime sıcaklıkları ve nihai ürünlerin hızlı soğuma oranları nedeniyle meydana gelmektedir. Enjeksiyon kalıplama ile üretilen malzemelerin özelliklerini anlamak, nihai ürünün istenen net şeklinin elde edilmesi açısından kritik öneme sahiptir. Enjeksiyon kalıplama sürecinde, malzemeler önemli kesme gerilimlerine maruz kalmakta, bu nedenle reolojik özelliklerin nicel olarak belirlenmesi, hammadde stabilitesinin sağlanması açısından gereklidir. Araştırmacılar, özellikle Newtoniyen olmayan malzemelerde, kesme oranlarındaki küçük değişimlerin önemli viskozite dalgalanmalarına yol açabileceğini göstererek, viskozitenin kesme oranları ile değişimini kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir [3-5].

Plastik enjeksiyon kalıplama süreci döngüsel bir yapıya sahip olup, dört ana aşamadan oluşmaktadır: doldurma, paketleme, soğutma ve çıkarma. İlk olarak, reçine ve katkı maddeleri, hopperlör üzerinden ısıtma/enjeksiyon sistemine aktarılır ve kalıp boşluğu sıcak polimer ergisi ile doldurulur. Paketleme aşamasında, polimerin katılması sırasında meydana gelen büzülme telafi etmek için ek malzeme daha yüksek basınçla enjekte edilir. Ardından, kalıp soğutma aşamasına geçilir; burada kalıp, parçanın çıkarma için yeterince sertleşene kadar soğutulur. Son olarak, kalıp açılır ve parça çıkarılır, böylece döngü tekrarlanır [6]. Enjeksiyon kalıplarının tasarımı karmaşık ve genellikle maliyetli bir süreçtir; bu süreç, geleneksel olarak deneysel yöntemler ve tekrar eden kalıp modifikasyonları ile şekillenmektedir. Ana tasarım faktörleri arasında kalıp boyutu, boşluk sayısı ve düzeni, akış ve kapak sistemleri, büzülme dikkate alınmaları ve çıkarma mekanizmaları yer almaktadır. Kalıpların termal analizi, ürün boyutları üzerindeki termal kalıntı gerilimlerinin etkilerini anlamak için kritik öneme sahiptir; zira düzensiz soğuma, deformasyona ve boyutsal hatalara yol açabilmektedir [6, 7].

Modern enjeksiyon kalıplama teknolojisi, gaz destekli, su destekli, mikro enjeksiyon ve düşük basınçlı kalıplama gibi çeşitli formları kapsamaktadır. Bu süreç, termoplastikler, termoset plastikler, kompozitler ve köpük malzemeleri gibi geniş bir malzeme yelpazesine uyum sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Avantajlarına rağmen, enjeksiyon kalıplama ile üretilen ürünler, kısa enjeksiyon, akış izleri ve deformasyon gibi kusurlar gösterebilir; bu da ek bitirme süreçlerini gerektirebilir ve üretim maliyetlerini ve sürelerini artırabilir [8, 9]. Plastik enjeksiyon kalıplama alanında, sıcaklık kontrolü ile kullanılan malzemelerin özellikleri arasındaki etkileşim, yüksek kaliteli ürünler elde etmek için kritik öneme sahiptir. Bu sürecin merkezinde, plastik enjeksiyon kalıplama makinelerinin sıcaklık yönetimini tam anlamıyla sağlamak için gerekli bir bileşen olan kelepçe ısıtıcı (clamp heater) yer almaktadır. Optimal ısıtma koşullarını koruma

yeteneği, polimerin viskozitelerini ve akış özelliklerini doğrudan etkileyerek, kalıplanmış parçaların genel verimliliğini ve kalitesini etkilemektedir.

Plastik enjeksiyon kalıplama sürecinde, sıcaklık kontrolü ve ısıtma sürelerinin optimize edilmesi, ürün kalitesi için kritik öneme sahiptir; bu noktada CFD (Hesaplamalı Akış Dinamiği) analizi devreye girmektedir. CFD, malzeme akışını ve sıcaklık dağılımını simüle ederek, reolojik ve termo-mekanik özelliklerin belirlenmesine olanak tanır ve böylece çeşitli malzeme türlerinin termal davranışlarının anlaşılmasını sağlar. Bu analizler, enjeksiyon sürecindeki potansiyel kusurların önceden tespit edilmesini ve sıcaklık profillerinin optimum seviyelere ayarlanmasını sağlayarak, nihai ürünün tutarlılığını ve kalitesini artırırken, atıkların azaltılmasına da katkıda bulunmaktadır [4, 10, 11].

Doğru ısıtma sıcaklığının belirlenmesinin önemi büyük bir yer tutmaktadır. Farklı plastik türleri, kendilerine özgü termal özellikler sergilemekte ve bu da ısıtma stratejilerinin özelleştirilmesini gerektirmektedir. Örneğin, termoplastikler, etkili enjeksiyon için istenen akışkanlığı sağlamak amacıyla belirli sıcaklık profillerine ihtiyaç duyarken, termoset plastikler, uygun bir sertleşme sağlamak için dikkatli bir kontrol gerektirmektedir. Bu malzemelerin termal davranışlarını anlamak, üreticilere ısıtma sürecini optimize etme imkânı sunarak, ürün tutarlılığını artırmakta ve atıkları azaltmaktadır [12].

Ayrıca, ısıtma süresi de (ısıtma zamanı) enjeksiyon kalıplama sürecinde kritik bir rol oynamaktadır. Yetersiz bir ısıtma süresi, malzemenin tam olarak erimemesine neden olarak kısa enjeksiyonlar veya zayıf kaynak hataları gibi kusurlara yol açabilirken; aşırı ısıtma, malzeme özelliklerinin bozulmasına neden olabilir. Bu nedenle, sıcaklıkla birlikte doğru ısıtma zamanını belirlemek, kalıplama sürecinin performansını en üst düzeye çıkarma ve nihai ürünün bütünlüğünü sağlama açısından elzemdir [13-16].

Bu çalışma, kelepçe ısıtıcıların, sıcaklık kontrol mekanizmalarının ve bunların plastik enjeksiyon kalıplamadaki etkilerinin kritik yönlerini incelemeyi amaçlamaktadır. Isıtma sıcaklığı, ısıtma süresi ve çeşitli plastiklerin özel gereksinimleri arasındaki ilişkiyi inceleyerek, enjeksiyon kalıplama uygulamalarının optimize edilmesine katkıda bulunacak bilgiler sunmak hedeflenmektedir. Bu çalışma, plastik enjeksiyon kalıplama sürecinde hassas ısıtma sıcaklığı ve sürelerinin önemini vurgulayarak, farklı plastik türlerinin termal özelliklerine dayalı özgün ısıtma stratejileri geliştirmiştir. Analizler, 150-500 W güç seviyeleriyle 207-227 °C aralığında sağlanan uygun sıcaklık profillerinin malzeme akışını optimize ettiğini ve nihai ürün kalitesini artırdığını gösterirken, gelecekteki araştırmalar daha karmaşık geometri ve işleme senaryolarının etkisini inceleyerek bu stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlamayı hedeflemektedir. Nihayetinde, bu faktörlerin kapsamlı bir şekilde anlaşılması, otomotivden tüketim ürünlerine kadar çeşitli endüstrilerin taleplerini karşılayan yüksek kaliteli plastik bileşenlerin üretilmesi için anahtardır.

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, enjeksiyon kalıplama sürecinin matematiksel modellemesi ve optimizasyonu için temel materyal ve yöntemler kullanılmıştır. Aşağıda süreçlerin her bir aşamasında kullanılan modeller, teknikler ve uygulama adımları hesaba katılmıştır.

A. Matematiksel Modelleme

Enjeksiyon kalıplama süreci, çeşitli mühendislik ve evsel polimer bileşenlerinin üretiminde yaygın olarak kullanılan, birden fazla aşama içeren bir süreçtir ve bu çalışma özellikle kalıp boşluğunun polimer eriyiği ile doldurulduğu dolun aşamasına odaklanmakta, ayrıca son yıllarda bu süreçleri simüle edebilme yeteneğine sahip ticari yazılımlardaki gelişmelere de değinmektedir [17, 18].

Doldurma Aşaması: Doldurma aşaması, sıvı polimerlerin kalıp boşluklarını doldurmasını içermektedir. Bu aşamada, Hele–Shaw ve Navier–Stokes denklemleri temel alınarak polimer akışının dinamikleri incelendi. Hele–Shaw modeli, visko-elastik özelliklerin yanı sıra akışın iki boyutlu durumunu işlemek için kullanılırken, Navier–Stokes denklemleri akışın üç boyutlu çözümünü sağlamaktadır. Bu modeller aracılığıyla akış profilinin, dolun süresinin ve kalıp dolun verimliliğinin analizi yapıldı.

Sıkıştırma ve Soğutma Aşamaları: Soğuma sırasında meydana gelen termal büzülme ve malzeme üzerindeki gerilmeler, özel termal iletim denklemleri ile modellendi. Bu aşamada, ısı transferi ve malzeme

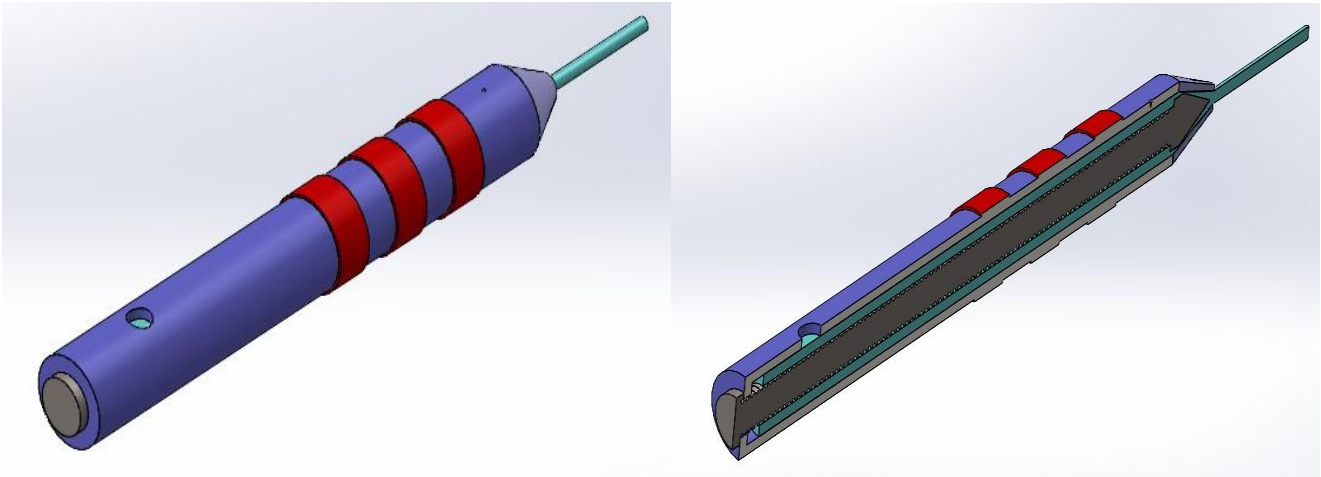
büzülmesi arasındaki ilişki incelendi, bu sayede, üretim sürecinin her aşamasındaki gerilmeleri ve olası deformasyonları minimize etmek için gerekli parametreler araştırıldı.

Plastikleşme: Polimerin eşit bir şekilde eritilmesi ve kalıba taşınması süreçlerine odaklanılarak, ısı transferi ve akışkanlık analizleri gerçekleştirildi. Bu süreçler termodinamik modellerle desteklenmiş ve ısı ile akışkanlık arasındaki denge gözlemlendi.

Süreç parametrelerini iyileştirmek için sistematik pratik uygulamalara paralel tasarım yöntemleri kullanılmıştır. Farklı parametrelerin etkileri, belirli kombinasyonları içeren deneyler aracılığıyla analitik olarak değerlendirilmiştir. Sayısal Simülasyonlar: Bilgisayar destekli çizim (CAD) ve sonlu elemanlar analizi (FEA) programları kullanılarak dolun, soğutma ve sıkıştırma aşamalarında süreç iyileştirmeleri gerçekleştirildi. Bu simülasyonlar sayesinde, süreç parametrelerinin sistem üzerindeki etkileri görselleştirilmiş ve analitik veriler elde edildi.

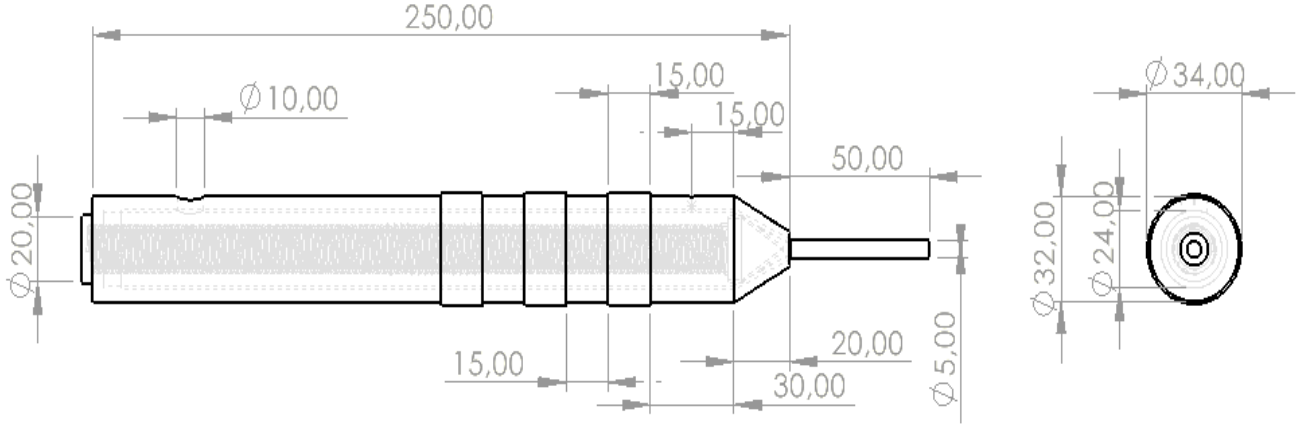
B. Geometri

Şekil 1’de montaj resmi ve numunenin kesit görünümü verilmiştir. Geometride belirtildiği üzere vida, iki aşamada konumlandırılmış ve 50 mm yatay hareket sağlamaktadır. Analiz, kelepçe ısıtıcı gücünün, ısıtıcı kelepçe sayısının ve konumunun optimum düzeylerini belirlemek üzerine yapılmıştır. Bu parametrelerin seçiminde, plastik enjeksiyon sürecinin kalıplama aşaması öncesinde dikkatli bir inceleme gerçekleştirilmiştir. Model oluşturulurken, parçanın gerçek boyutları yerine benzer oranlarda küçültülmüş bir numune kullanılmıştır. Üç boyutlu modelleme ve analiz aşamasında, yaygın olarak kullanılan ve güvenilir sonuçlar veren SolidWorks programından yararlanılmıştır.



Şekil 1. Plastik enjeksiyon modeli

Model temel itibarıyla dört parçadan oluşmaktadır: Plastik eriyiğinin hareket ettiği dış tüp, granülün sıvı çıkışının gerçekleştiği nozul, eriyiğin hareketini sağlayan vida ve plastik eriyiği. Ayrıca, plastik enjeksiyonda granül girişinin gerçekleştiği besleme ağızı da tasarımda yer almıştır. Kelepçe ısıtıcılarının sıcaklık kontrolünün sağlanması için nozula yakın bir pozisyonda termostat eklenmiştir. Kelepçe ısıtıcılar, granül girişinin yanı sıra nozul arasında uygun bir konumda yerleştirilmiştir. Analiz sonucunda, üç adet kelepçe ısıtıcısının kullanılması uygun görülmüştür.



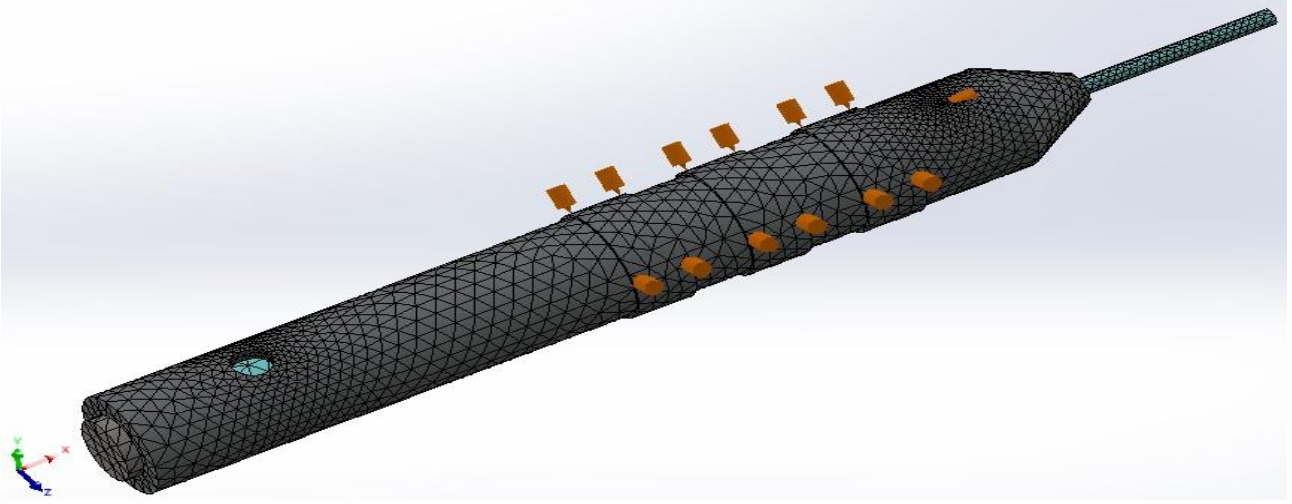
Şekil 2. Geometri ve ölçüler

Parça boyutları ve geometrisi, pratik uygulama koşullarına uyum sağlayacak şekilde ısı işlemine uygun hale getirilmiştir. Plastik enjeksiyon süreci sırasında vida beklemesinin modellenme standardı olarak alınması hedeflenmiştir. Tasarımın tam modeli ve boyutları, teknik resimde Şekil 2’de verilmiştir. Toplam boyutu 250 mm olan parça, istenildiği takdirde model olarak üretilmeye ve çalışmaya uygundur. Bu kapsamda, tasarımın optimizasyonu sayesinde süreç verimliliği artırılmıştır.

C. Mesh Yapısı

Sonlu elemanlar analizi, mühendislik ve bilimsel hesaplamalarda kritik bir rol oynamaktadır ve analiz sonuçlarının güvenilirliği, hücre yapısı, mesh yapısı, eleman sayısı ve node (bağ) sayısı gibi temel parametrelerle doğrudan ilişkilidir. Mesh yapısının kalitesi, modelin karmaşıklığına ve gerilme dağılımına bağlı olarak, daha fazla sayıda eleman ve node kullanılmasıyla artırılabilir; bu, sonuçların doğruluğunu ve çözümün hassasiyetini artırır. Yeterince ince bir mesh yapısı, karmaşık geometrilerin ve yükleme koşullarının daha doğru bir şekilde temsil edilmesini sağlarken, aşırı yüklenmesi gereken alanlarda keskin gerilim değişimlerini yakalayabilmektedir. Ancak, mesh yoğunluğunu optimal seviyede tutmak, hesaplama süresini ve kaynak kullanımını dengelemek açısından da önemlidir. Dolayısıyla, sonlu elemanlar analizi uygulamalarında uygun mesh tasarımı, hassas sonuçlar elde etmek ve güvenilir mühendislik çözümleri geliştirmek için gereklidir [11,15].

Model ne kadar sağlıklı olursa olsun doğruya en yakın sonuçları elde edebilmek için analiz öncesi Mesh yapısına çok önem vermek gerekir. Aşırı büyük geometrilerle elde edilecek mesh doğru sonuçtan bizi uzaklaştıracaktır. Solidworks programında karışık geometriler için daha uygun olan karışık eğrilik tabanlı mesh oluşturma seçeneği en uygun sonuca bizi ulaştıracaktır. Burada seçilen meshin maksimum eleman boyutu 5mm minimum eleman boyutu 1mm olarak tanımlandı ve yüksek kalitede bir mesh oluşturuldu. Meshteki toplam düğüm sayısı 68745 toplam eleman sayısı 38162 adettir. Analiz için oluşturulan mesh yapısına Şekil 3’te yer verildi.



Şekil 3. Model mesh örgüsü

D. Analiz Koşulları

Alt parça ilk sıcaklıkları 25°C değerinde başlatıldı. Kelepçe ısıtıcılar üç adet olarak granül besleme ağzı ile nozul arasında eşit kapasitede konumlandırıldı.

150-250-350-500W kapasitede olan kelepçe ısıtıcılar için elde edilen sonuçlar aşağıda detaylıca yer almaktadır. Analizde kelepçe ısıtıcı kapasitesi, sayısı ve konumunun; sağlıklı parça imali aşamasında oluşabilecek olası hatalar minimize edilmeye çalışıldı. Optimum eriyik sıcaklığı olan 207°C-227°C aralığına uygun düşecek kelepçe ısıtıcı kapasitesini belirlemek üzere Solidworks Thermal modülü üzerinde optimizasyon çalışmasına gidildi. Analizde dört farklı kapasitede kelepçe ısıtıcının sonuç üzerine etkileri derlenip 150 W değerinde üç adet belirtildiği konumlarda olması daha sağlıklı sonuçlar vermektedir.

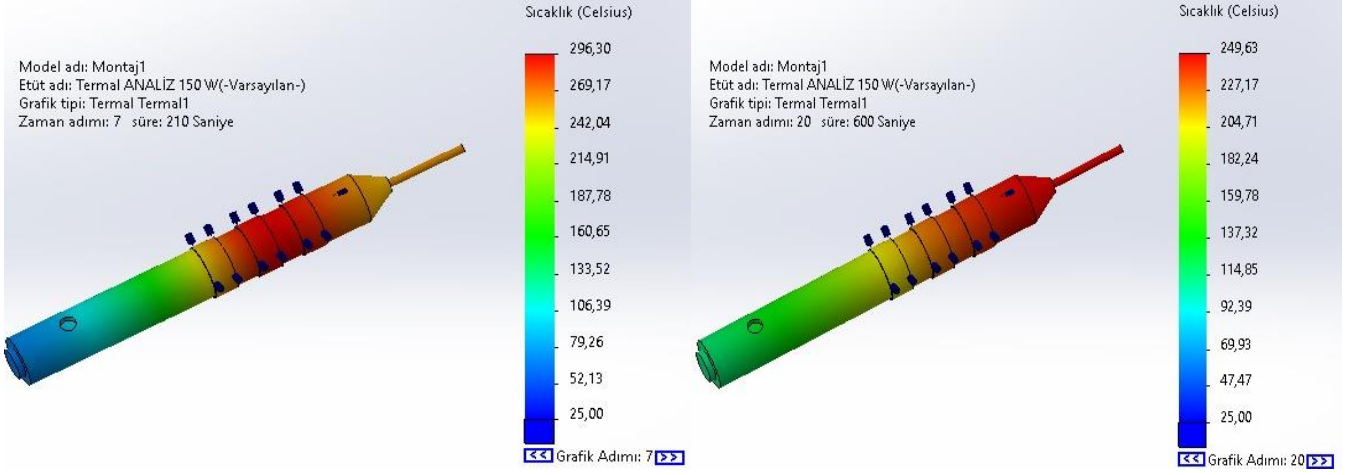
Tablo 1. Analiz koşulları

Isıtıcı Güçleri (W)	İncelenen süreler (sn)	İncelenen adımlar	Prob sıcaklığı
150	180-210, 570-600	7, 20	262°C-248.3°C
250	180-210, 570-600	7, 20	327.8°C-302.3°C
350	180-210, 570-600	7, 20	311.5°C-282.2°C
500	180-210, 570-600	7, 20	434.4°C-392.4°C

III. BULGULAR

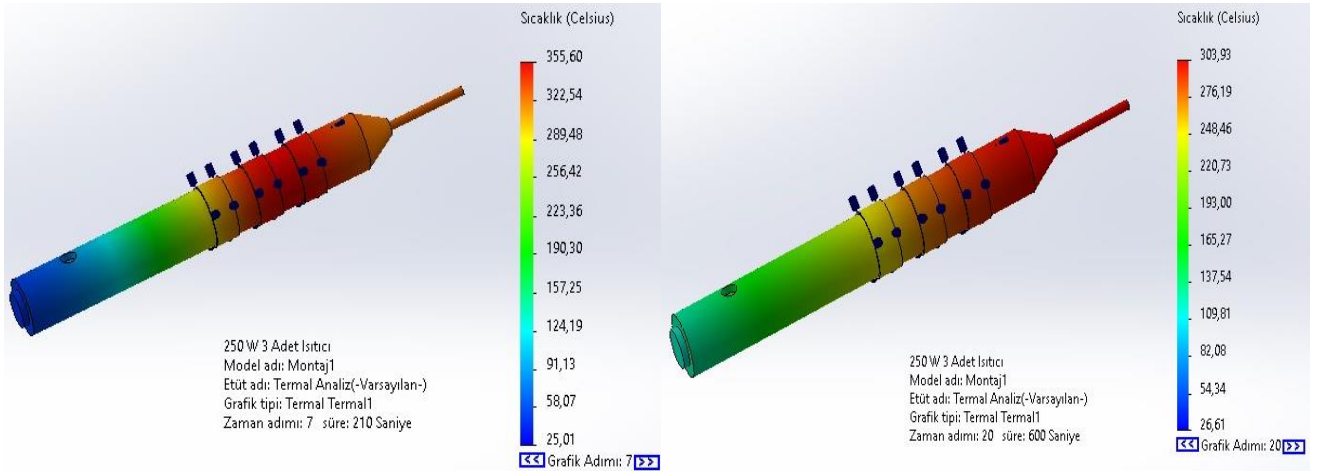
Geometrisi ve hücresel modelleme yapısını sunulan modelin analiz aşaması Solidworks Thermal eklentisinden yararlanılarak gerçekleştirildi. Dört farklı güçte üçer adet ısıtıcı kullanılarak yapılan analiz sonuçlarına detaylıca yer verildi. En ideal kelepçe ısıtıcı gücünü belirlemek için sonuçlar detaylı bir şekilde incelendi ve 150 W üç adet kelepçe ısıtıcının verdiği sonuçlar eriyik sıcaklığından beklenen sıcaklık aralığına daha yakın sonuçlar verdi. Diğer ısıtıcı kapasitelerinde istenilen sıcaklık değerlerinin çok üzerinde olduğu gözlemlendi. Plastik enjeksiyon aşamasında istenilen prob sıcaklık değerleri 207-227°C arasında olmalıdır. Bu değerlerin üstündeki veya altındaki değerlerin plastik malzemede kusurlara neden olacağı bilinmektedir.

Analiz toplamda 600 saniye olacak şekilde 20 adımda ve 30 saniyelik sürelerle gerçekleştirildi. Modelde olan tüm parçaların ilk sıcaklıkları oda koşullarında olduğu düşüncesiyle 25°C değerindedir. Analiz aşamasında grafik adımları dikkatle incelendiğinde belirli bir ana kadar sıcaklık artışı görülmekte sonrasında sıcaklıkta bir miktar düşme olmaktadır. Analiz sonuçları her ısıtıcı gücü için ayrı ayrı Şekil 4,5,6,7 de gösterildi.



Şekil 4. 150 W ısıtıcı ile yapılan analiz 7. ve 20. adımıdaki sonuçları

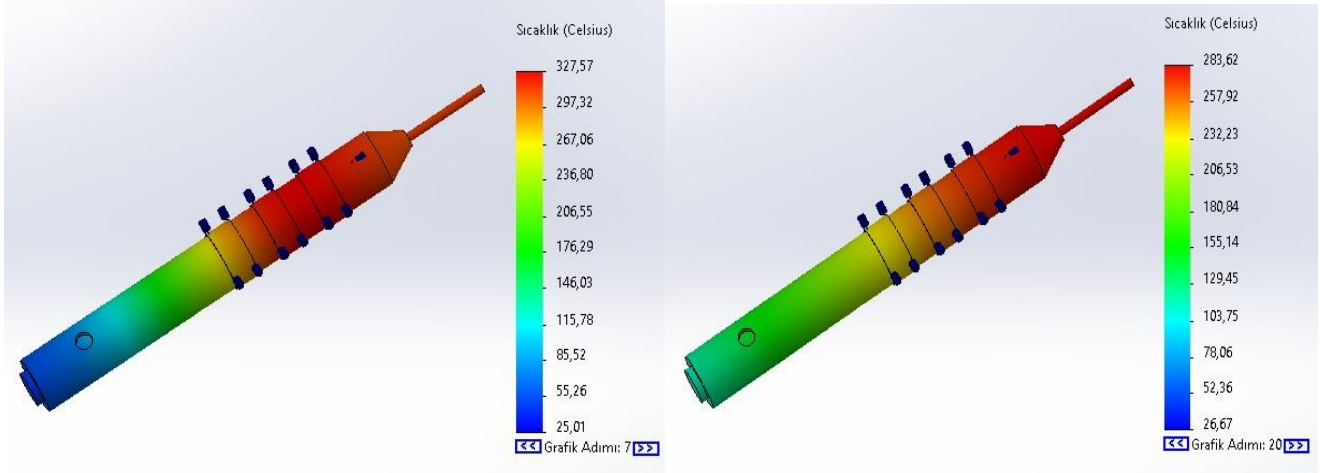
150 W kelepçe ısıtıcılar ile yapılan analiz neticesinde ortaya çıkan sonuçlardan şu anlaşılmaktadır. Kelepçe ısıtıcıların çevresinde oluşan sıcaklık değerleri granül giriş kısmından bir miktar daha yüksek değerlerde elde edildi. 25°C sıcaklıkta sisteme giriş yapan plastik granüller 140 sn sonunda beklenen eriyik sıcaklık değerine ulaştı. Bu değer yakalandıktan sonra termostat devreye girip sıcaklık aralığı bu değerlerde tutulmaya çalışıldı. Grafikler incelendiğinde sıcaklığın analiz sırasında 350 sn civarında maksimum değerlerde olduğu sonrasında düşüşe geçtiği Şekil 8’de görülmektedir. Zamana bağlı sıcaklıkta olan değişim süreci grafiklerle net bir şekilde belirtildi. Toplamda 20 adımda gerçekleşen analizde 7. Ve 20. Adımlarda olan sonuçlara Şekil 5’te yer verildi.



Şekil 5. 250 W ısıtıcı ile yapılan analiz 7. ve 20. adımıdaki sonuçları

Bir diğer ısıtıcı kapasitesi olan 250 W kelepçe ısıtıcılarda elde edilen sonuçlarda sıcaklık değerlerinin eriyik sıcaklığında çok yüksek değerlerde olduğu görüldü. 600 saniye olan deney sürecinde 100. Saniyede istenilen sıcaklığa ulaşıldı. Sonrasında 310°C sıcaklıklarda analizin ilerlediği görüldü. Buda malzemenin yüksek sıcaklıklarda deforme olmasına, parçanın geometrisinde bozulmalara neden olacaktır.

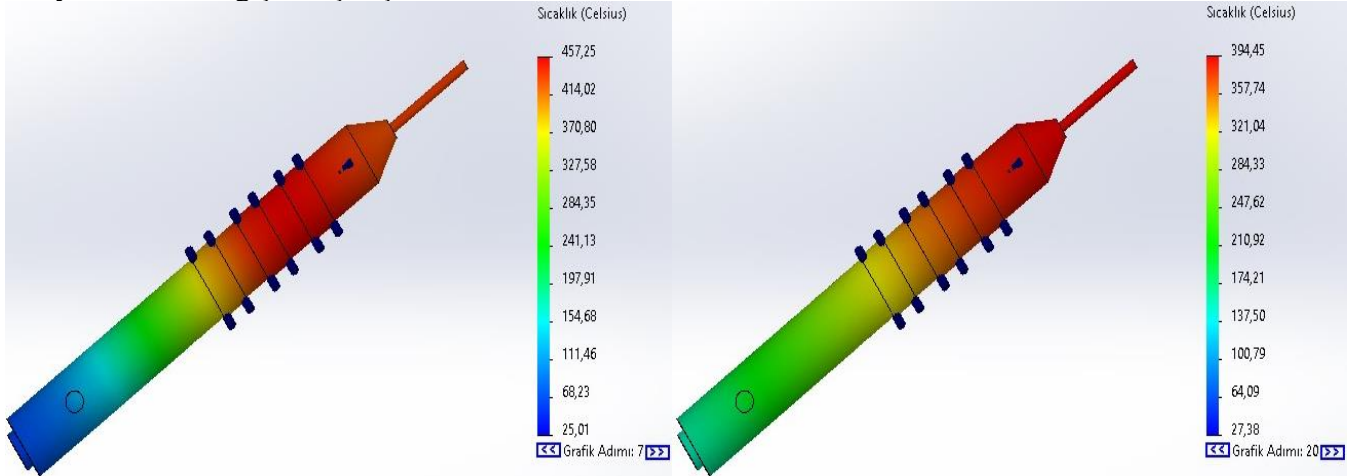
Şekil 5’te verilen resimlerde 210.sn deki ve 600. sn deki sıcaklık değerleri verildi. Bu değerlerde nozuldan çıkan granül sıcaklığının 300°C üzerinde olduğu görüldü. Şekil 9’da verilen sıcaklık zaman grafiğinde bu durum daha iyi incelenmektedir.



Şekil 6. 350 W ısıtıcı ile yapılan analiz 7. ve 20. adımdaki sonuçları

350 W kelepçe ısıtıcılarla yapılan analizde benzer sorunlar ortaya çıktığı gözlemlendi. 100. sn den sonra ulaşılan değerler istenilen değerlerin üzerindedir. Eriyik sıcaklığının yüksek olması plastik enjeksiyonda istenmeyen bir durumdur. Buradan, sıcaklık 350 Watt'da 300°C civarında seyretmektedir. Şekil 6'da 7.adımda eriyik sıcaklığının 326°C 20.adımda ise 282°C de olduğu anlaşıldı.

500 W ile yapılan ilk denemede alınan sonuçlar beklenen değerlerin bir hayli uzağında kaldı. Prob sıcaklığında ulaşılan sıcaklık değerinin 400 °C 'yi aştığı Şekil 7'de görülmektedir. Sağda bulunan resimde ise 20. adımdaki prob sıcaklık değeri 392°C dendir. Bu deneyde sıcaklık 410°C dolayında seyretmektedir. Detaylı sıcaklık değişimi için Şekil 11 incelenebilir.

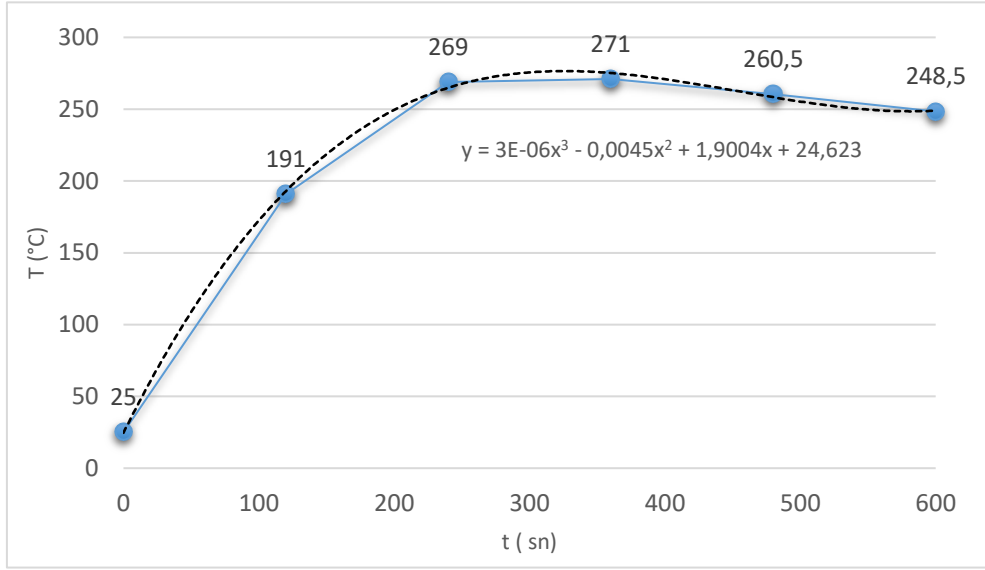


Şekil 7. 500 W ısıtıcı ile yapılan analiz 7.ve20. adımdaki sonuçları

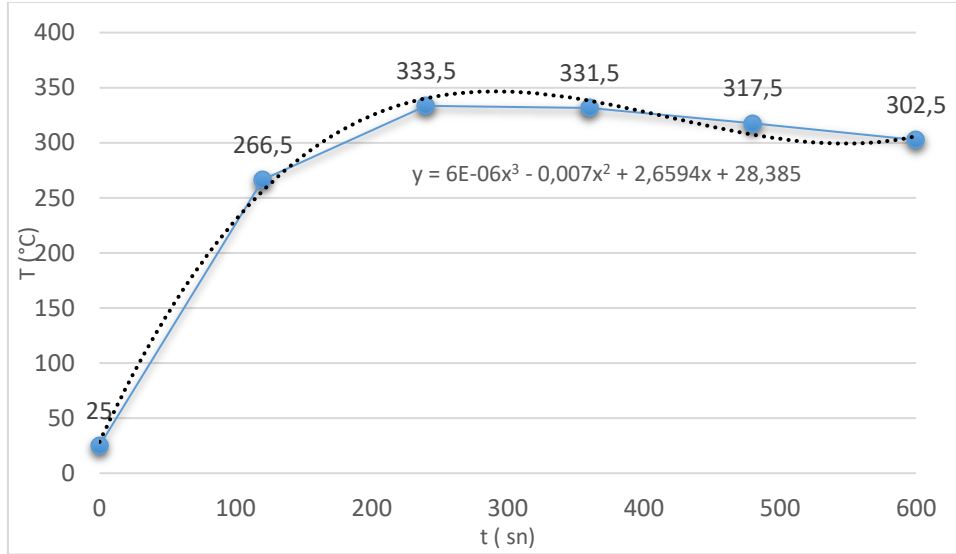
IV. TARTIŞMA

Plastik enjeksiyon işleminde enjeksiyon tüpü içerisindeki sıcaklık dağılımı kalıba basma sürecini doğrudan etkilemektedir. Dolgu malzemesi, kalıp boyutu ve parça geometrisi gibi başlıca koşullar göz önüne alınarak sıcaklık dağılımının kontrol altında tutulması gerekir. Belirli yapı ve boyutlardaki makine için bu sıcaklık değişimi kelepçe ısıtıcılar üzerinden sisteme verilen ısıyla bu ön koşulun sağlanması mümkündür. Bununla birlikte, düzeneğe yerleştirilen ısı probu belirlenen sıcaklıkların aşılmasını engellemek amacıyla kullanılır. Bu çalışmada modellenen makine için sıcaklık değişimleri sisteme verilen dört farklı sabit enerji beslemesiyle (150 W, 250 W, 350 W ve 500 W) sağlanmaktadır. Kalıba basma noktasında probe alt ve üst sınırları 207-227 °C aralıklarında belirlendi. Enerji beslemesine göre erime ve karışım oluşturma bölgesinde elde edilen sıcaklık değişimleri zamana bağlı olarak Şekil 8-11'de sırasıyla verilmiştir. Bu enerji beslemesinin tamamındaki sıcaklıkların zamanla belirli bir polinomal eğri takip

edecek şekilde arttığı görülmektedir. Yaklaşık 180-230 saniye arasında Probe sınır sıcaklıklarına ulaşıldığı için sıcaklık artışı durmaktadır. Bu sürelerden sonra sıcaklık kontrol altında tutulabilmekte ve maksimum sıcaklığın altında bir sıcaklıkta kademeli olarak azalmaktadır.

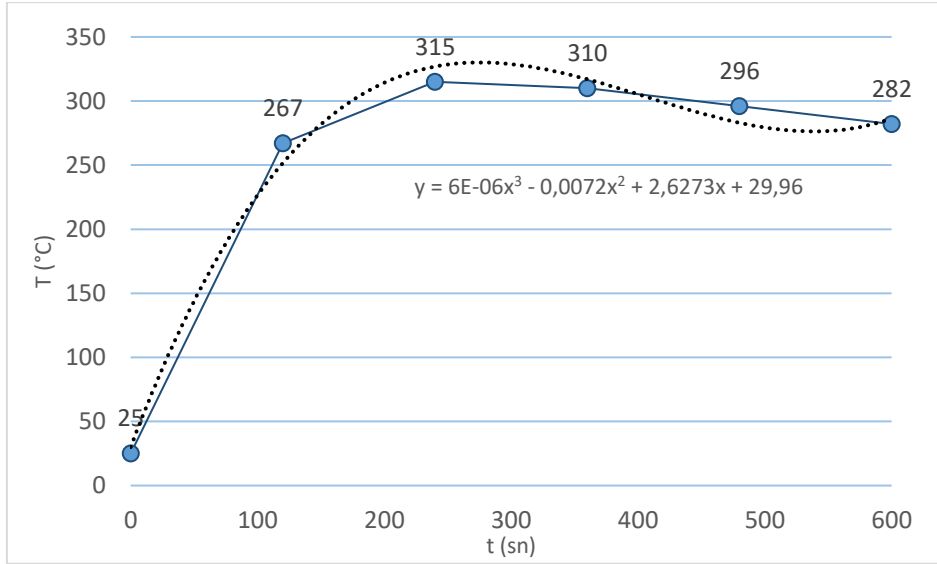


Şekil 8. Zamana bağlı sıcaklık değişimi (150 W)

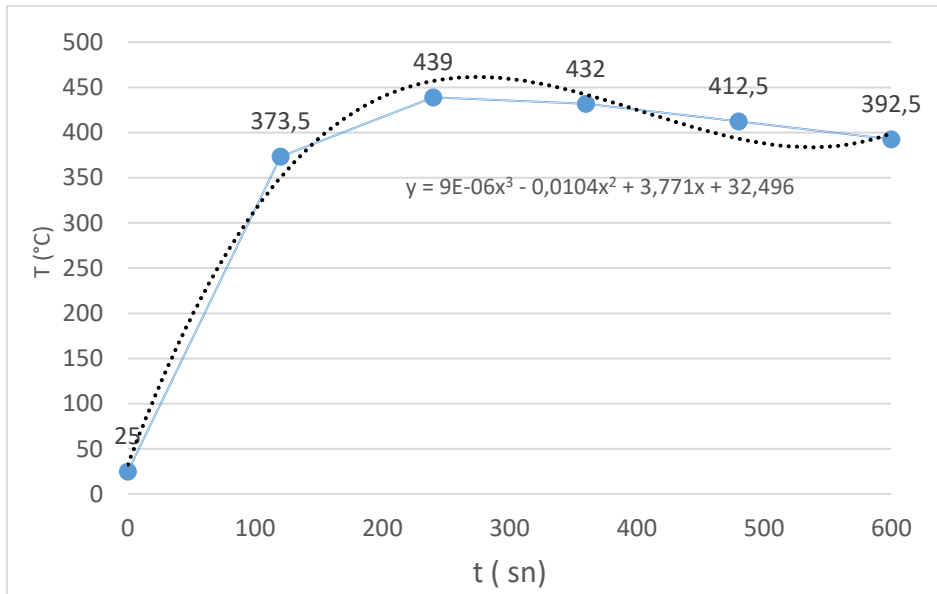


Şekil 9. Zamana bağlı sıcaklık değişimi (250 W)

En yüksek sıcaklık koşulları maksimum ve kontrol sıcaklıklar için en yüksek enerji beslemesi olan 500 W koşulu için ortaya çıkmaktadır. Ancak Şekil 11'den de görüleceği gibi kontrol sıcaklığını sağlamak üzere daha keskin düşüşler elde edilmektedir. Bu beklenen bir durumdur. Ancak, kalıba basılacak malzemeden beklenen özelliklere bağlı olarak bu kontrol süresinin doğru olarak hesaba katılması gerekir. Örneğin karmaşık geometrili parça üretimlerinde katılmanın erken ya da geç gerçekleşebileceği bölgeler ortaya çıkabilir.



Şekil 10. Zamana bağlı sıcaklık değişimi (350 W)



Şekil 11. Zamana bağlı sıcaklık değişimi (500 W)

V. SONUÇLAR

Bu çalışma, plastik enjeksiyon kalıplama sürecinde hassas ısıtma sıcaklığı ve süresinin kritik önemini vurgulamaktadır. Farklı plastik türlerinin termal özellikleri ayrıntılı bir şekilde incelenerek, malzeme akışını optimize eden ve ürün bütünlüğünü sağlayan özgün ısıtma stratejileri geliştirilmiştir. Üç farklı kelepçe ısıtıcı güç seviyesinin analizi, 150-500 W güç kaynağının, istenen erime sıcaklığı aralığı olan 207-227 °C içinde, istikrarlı sonuçlar sağladığını ve bu sayede aşırı ısınma veya yetersiz ısıtma ile ilişkili kusurların en aza indirildiğini ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, uygun sıcaklık profillerinin sürdürülmesinin yalnızca optimal malzeme akışını sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda nihai ürünün genel kalitesini artırmak için de elzem olduğunu göstermektedir. Ayrıca, enjeksiyon süreci boyunca sıcaklık dağılımının izlenmesi, kalıp ortamının daha iyi bir şekilde kontrolünü mümkün kılarak, termal dalgalanmalardan kaynaklanan kalite sorunları riskini azaltmaktadır. Bu araştırmadan elde edilen bilgiler, plastik endüstrisindeki üreticiler için değerli kılavuzlar sunmakta ve enjeksiyon kalıplama operasyonlarında verimlilik ve tutarlılığın artırılması yolunu önermektedir. Gelecek çalışmalar, daha karmaşık geometri ve değişken işleme senaryolarının etkisini araştırarak bu ısıtma stratejilerinin daha da geliştirilmesine olanak

tanıyabilir ve nihayetinde çeşitli uygulamalar için yüksek kaliteli plastik bileşenlerin üretimine katkı sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- [1] R. J. Crawford, "Rubber and plastic engineering design and application." Applied, London 110 (1987).
- [2] M. D. Parind ve ark., "Tablet coating by injection molding technology—Optimization of coating formulation attributes and coating process parameters." European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics 122 (2018): 25-36.
- [3] C. Fernandes, A. J., Pontes, J. C., Viana, & A. Gaspar-Cunha. "Modeling and Optimization of the Injection-Molding Process: A Review". Advances in Polymer Technology, 2018, 37(2), 429-449.
- [4] R., Pantani, I., Coccorullo, V., Speranza, & G. Titomanlio. "Modeling of morphology evolution in the injection molding process of thermoplastic polymers" Progress in polymer science, 2005, 30(12), 1185-1222.
- [5] D. V., Rosato, & G. R. Marlene. "Injection molding handbook" Springer Science & Business Media, 2012.
- [6] Fu, Hongbo, ve ark., "Overview of injection molding technology for processing polymers and their composites." ES Materials & Manufacturing 8.20 (2020): 3-23.
- [7] H. Fu ve ark., "Overview of injection molding technology for processing polymers and their composites. ES Mater Manuf 8: 3–23." 2020
- [8] M. Czepiel, M. Bańkosz, & A. S. Kupiec. "Advanced Injection Molding Methods." Materials 16.17 (2023): 5802.
- [9] J. O., Osarenmwinda, & D. D. Olodu. "Barrel temperature effects on the mechanical properties of injection moulded plastic products." Nigerian Journal of Technology 34.2 (2015): 292-296.
- [10] M., Danışmaz, & M. Demirbilek, "Assessment of heat transfer capabilities of some known nanofluids under turbulent flow conditions in a five-turn spiral pipe flow" Applied Rheology, 2024, 34(1), 20240002. doi.org/10.1515/arh-2024-0002
- [11] L. T. Zubairi, M. Danışmaz, N. J. Yasin & W. A. Al-Shohani, "Comparative Analysis of Thermal Performance in Dual-Flow Solar Air Heaters Utilizing Diverse Absorber Plates", International Journal of Heat & Technology, 2023, 41(4). doi.org/10.18280/ijht.410423
- [12] S. H., Tang, Y. M., Kong, S. M., Sapuan, R., Samin, & S. Sulaiman, "Design and thermal analysis of plastic injection mould." Journal of materials processing technology, 2006, 171(2), 259-267.
- [13] V. Erdem, M. Belevi, & C. Koçhan, Taguchi metodu ile plastik enjeksiyon parçalarda çarpılmanın en aza indirilmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 2010, 12(2), 17-29.
- [14] M. Danışmaz, & C. Demirtaş, "Investigation of the Use of Waste Biomass Fuels in the Production of Syngas in a Downdraft Reactor: A CFD Analysis". Arabian Journal for Science and Engineering, 2024, 1-13. doi.org/10.1007/s13369-024-09654-7
- [15] C. Özek, & Y. H. Çelik, "Plastik Enjeksiyon Kalıplarında Enjeksiyon Sürelerinin Yapay Sinir Ağları ile Modellenmesi". Firat University Journal of Engineering Science, 2011, 23(1).
- [16] M. Danışmaz, (2024). Geleneksel Tahıl Kurutucularındaki Kanal Geometrisinin Kurutma Havası Akışına Etkisinin Gözenekli Ortam Yaklaşımıyla İncelenmesi. Firat University Journal of Engineering Science, 36(1). doi.org/10.35234/fumbd.1338087
- [17] H. Huang, F. Zhang, P. Callahan, & J. Ayoub "Granular fingering in fluid injection into dense granular media in a Hele-Shaw cell". Physical review letters, 2012, 108(25), 258001.
- [18] D. A. de Miranda, W. K. Rauber, Jr. M., Vaz, M. V. C. Alves, F. H. Lafratta, A. L. Nogueira, & P. S. B. Zdanski, "Analysis of numerical modeling strategies to improve the accuracy of polymer injection molding simulations". Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2023, 315, 105033.